



École Doctorale  
Sciences de la Matière, de l'information et du Vivant  
(ED SMIV 0373)

THÈSE DE DOCTORAT  
DE  
L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

*Spécialité : Traitement du Signal*

présentée par

**Gilles LE CHENADEC**

pour obtenir le titre de Docteur d'Université

# Analyse de descripteurs énergétiques et statistiques de signaux sonar pour la caractérisation des fonds marins

Soutenue le 8 Juillet 2004 devant le jury composé de Messieurs :

P. Cervenka	Directeur de recherche au CNRS	<i>Rapporteur</i>
Y. Delignon	Maître de conférence à l'ENIC	<i>Rapporteur</i>
X. Lurton	Ingénieur de Recherche, IFREMER	<i>Directeur de thèse</i>
J.M.Boucher	Professeur à l'ENST de Bretagne	<i>Directeur de thèse</i>
P. Vilbé	Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale	
G. Burel	Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale	

Équipes d'accueil : Laboratoire Acoustique et Sismique - IFREMER  
Département Signal et Communication - ENST-Bretagne



Cette thèse a été réalisée au sein du laboratoire d'acoustique et sismique de l'Ifremer en collaboration avec l'ENST-Bretagne, financée par ces deux organismes et la région Bretagne. Je souhaite remercier tous ces acteurs de m'avoir fourni la possibilité de faire mes premiers pas dans le domaine de la recherche.

Ma première pensée va bien évidemment aux personnes qui m'ont encadrées, conseillées et supportées.

Je voudrais en premier lieu remercier Xavier Lurton de m'avoir encadré au cours de ce travail. Merci pour tes précieux conseils ; ta rigueur scientifique m'a fait progresser. Merci aussi pour les deux croisières auxquelles j'ai eu la chance de participer et pour le temps passé à corriger mes écrits.

Je remercie sincèrement Jean-Marc Boucher de m'avoir permis de terminer cette thèse et pour toutes les discussions enrichissantes dans le domaine des statistiques et de la segmentation. Merci de m'avoir accompagné avec ton inconditionnel soutien, tout au long de ces trois années et demi dans l'accomplissement de ce travail.

Comment pourrais-je oublier Jean-Marie Augustin (l'ingénieur système expert windows) pour sa disponibilité, sa bonne humeur et ses claquages de clavier ? Merci à toi pour toutes les fois où je t'ai embêté et où tu as pris le temps de me répondre.

Je tiens à remercier les deux rapporteurs de cette thèse, Yves Delignon et Pierre Cervenka pour leur relecture critique. Je les remercie également ainsi que l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail.

J'ai également une pensée pour tous les membres de TMSI/AS pour leur humeur joviale au cours des discussions, repas, pots, . . . Je remercie plus particulièrement Sandie pour les nombreuses discussions autour du café de 15h pile. Je désire aussi rendre hommage aux spécialistes des mesures acoustiques du DF1000, Yves Le Gall (le squasheur) et Marc Derrien (le chasseur) pour l'épique semaine de bassin. Merci à Roman Fablet, l'homme vecteur de support pour ses précieux conseils et ses enrichissantes discussions. Merci à tous ceux qui m'ont donné un coup de main au cours de cette thèse, qu'il soit matériel ou informatique : Claude Auris pour les données de Canard, l'équipe Caraïbes (Marie-Paume Corer et Jean-Marc Sinquin) et Éliane Le Drezen.

Enfin, à titre plus personnel, merci à tous ceux qui m'ont permis de conserver mon équilibre ; je pense à la bande des brestois qui m'ont intégré et supporté depuis maintenant deux ans, aux lorientais et aux Croix-valmériens. La dernière pensée est pour celle qui m'accorde un soutien inconditionnel dans tout notre partage.

# Table des matières

<b>Introduction.</b>	<b>1</b>
<b>1 Eau de mer, sédiments et onde acoustique</b>	<b>3</b>
1.1 L'eau de mer . . . . .	3
1.1.1 Composition et paramètres . . . . .	3
1.1.2 Propriétés acoustiques . . . . .	4
1.1.2.1 Célérité acoustique dans l'eau de mer . . . . .	4
1.1.2.2 Atténuation . . . . .	5
1.1.3 Effets sur la propagation dans la masse d'eau . . . . .	6
1.1.3.1 Pertes par transmission . . . . .	6
1.1.3.2 Courbures des rayons acoustiques . . . . .	6
1.2 Description géoacoustique des fonds marins . . . . .	7
1.2.1 Description géologique des sédiments / classes granulométriques . . . . .	8
1.2.1.1 Classes granulométriques . . . . .	9
1.2.2 Acoustique et sédiments . . . . .	11
1.2.2.1 Célérité . . . . .	12
1.2.2.2 Atténuation . . . . .	13
1.2.3 Description de l'interface sédimentaire . . . . .	14
1.2.3.1 Stationnarité . . . . .	15
1.2.3.2 Ergodicité . . . . .	15
1.2.3.3 Isotropie . . . . .	15
1.3 Rétrodiffusion par les fonds marins . . . . .	17
1.3.1 Indice de rétrodiffusion . . . . .	17
1.3.2 Constatations expérimentales et état de l'art des modélisations . . . . .	18
1.3.3 Contribution de l'interface . . . . .	20
1.3.3.1 Méthode des petites perturbations - approximation de Rayleigh-Rice . . . . .	21
1.3.3.2 Méthode des plans tangents - approximation de Kirchhoff . . . . .	22
1.3.4 Contribution de volume . . . . .	23
1.3.5 Application aux systèmes sonars - Modèle de Jackson . . . . .	24
1.4 Conclusion . . . . .	28
<b>2 Systèmes acoustiques d'imagerie sous-marine</b>	<b>29</b>
2.1 Principes de la formation de l'image acoustique . . . . .	29
2.1.1 Principe, géométrie et chaîne d'acquisition . . . . .	30
2.1.2 Signaux d'émission . . . . .	31

2.1.2.1	Caractéristiques du signal d'émission . . . . .	31
2.1.2.2	Impulsion bande étroite ( <i>burst</i> ) . . . . .	31
2.1.2.3	Signal modulé linéairement en fréquence ( <i>chirp</i> ) . . . . .	32
2.1.3	Transducteurs et antennes . . . . .	33
2.1.4	Propagation dans la masse d'eau . . . . .	34
2.1.4.1	Pertes par divergence sphérique . . . . .	34
2.1.4.2	Pertes par amortissement . . . . .	34
2.1.4.3	Modification géométrique des ondes . . . . .	35
2.1.5	Impact sur le fond . . . . .	35
2.1.6	Traitements en réception . . . . .	36
2.1.6.1	Gain variable en temps - Loi de TVG . . . . .	36
2.2	Correction des données . . . . .	37
2.3	Le sondeur multifaisceau Simrad EM1000 . . . . .	38
2.3.1	Chaîne d'acquisition et caractéristiques ([Hel 98, Sim 92]) . . . . .	39
2.3.2	Correction . . . . .	40
2.4	Le sonar latéral Edgetech DF1000 . . . . .	41
2.4.1	Principe . . . . .	41
2.4.2	Caractéristiques et performances . . . . .	42
2.4.2.1	Directivités et sensibilités des antennes . . . . .	42
2.4.2.2	Signal d'émission . . . . .	44
2.4.2.3	Performances et résolutions du système . . . . .	44
2.4.3	Corrections appliquées . . . . .	45
2.4.3.1	Principes et géométrie . . . . .	45
2.4.3.2	Divergence sphérique et aire insonifiée . . . . .	47
2.4.3.2.1	Champ proche /champ lointain . . . . .	47
2.4.3.2.2	Simulation numérique . . . . .	48
2.4.3.3	Absorption . . . . .	50
2.4.3.4	Changement des statistiques dû aux particularités d'acquisition . . . . .	51
2.4.3.5	Diagrammes de directivité . . . . .	53
2.4.3.5.1	Diagramme mesuré . . . . .	53
2.4.3.5.2	Diagramme empirique . . . . .	54
2.4.4	Résultats . . . . .	56
2.5	Conclusion . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Exploitation de l'indice de rétrodiffusion</b> . . . . .	<b>59</b>
3.1	Introduction . . . . .	59
3.2	Présentation des données acoustiques . . . . .	59
3.3	Dépendance angulaire de l'indice de rétrodiffusion . . . . .	61
3.3.1	Méthodologie . . . . .	61
3.3.2	Analyse locale de l'indice . . . . .	62
3.3.3	Description de l'indice moyen en fonction du type de fond . . . . .	64
3.4	Dépendance azimutale de l'indice de rétrodiffusion . . . . .	66
3.4.1	Méthodologie . . . . .	66
3.4.2	Simulations . . . . .	70
3.4.3	Résultats expérimentaux . . . . .	75
3.4.3.1	Sable fin (sites 2 et 5) . . . . .	76
3.4.3.2	Vase compacte (site 3) . . . . .	82

3.4.3.3	Sable grossier (site 4)	84
3.5	Conclusion	89
<b>4</b>	<b>Exploitation des statistiques de la rétrodiffusion</b>	<b>91</b>
4.1	Introduction	91
4.2	Modèles statistiques de la rétrodiffusion	91
4.2.1	Modèle des points réverbérants - Lien entre modélisations physiques et statistiques	91
4.2.2	Modèle gaussien du speckle totalement développé	94
4.2.2.1	Hypothèses	94
4.2.2.2	Distribution des variables dérivées	94
4.2.2.3	Modèle produit	95
4.2.3	Modèle de chatoiement non gaussien	96
4.2.3.1	Introduction	96
4.2.3.2	Approche physique du chatoiement non gaussien	96
4.2.3.2.1	Modèle produit	96
4.2.3.2.2	Distribution de R	97
4.2.3.2.3	Distributions de I et A	98
4.2.3.3	Approche paramétrique du chatoiement non gaussien	98
4.3	Applications aux données des systèmes sonar	98
4.3.1	Méthodologie et présentation des données	100
4.3.2	Adéquation des distributions angulaires empiriques	102
4.3.2.1	Sondeur multifaisceau EM1000	102
4.3.2.2	Sonar latéral DF1000	105
4.3.3	Evolution angulaire en fonction du type de fonds	105
4.3.3.1	Introduction	105
4.3.3.2	Présentation de la dépendance angulaire	107
4.4	Dépendance angulaire du paramètre de forme	109
4.4.1	Modélisations	109
4.4.1.1	Introduction	109
4.4.1.2	Le modèle de Oliver - Introduction de la corrélation	110
4.4.1.2.1	Le modèle de surface	110
4.4.1.2.2	Le processus de diffusion	112
4.4.1.2.3	Dérivation des moments de l'intensité diffusée	112
4.4.1.3	Modèle de Hellequin	115
4.4.1.4	Extension à un modèle de rétrodiffusion plus complet	118
4.4.2	Confrontation expérimentale	119
4.4.2.1	Résultats sur un fond de sable fin <i>homogène</i>	120
4.4.2.2	Résultats sur l'ensemble des zones	121
4.5	Conclusions	126
<b>5</b>	<b>Application à la segmentation d'images sonar</b>	<b>127</b>
5.1	Présentation et notations	128
5.2	Champs de Markov	130
5.3	Méthodes SVM	131
5.3.1	Minimisation du risque	132
5.3.2	Marges et dimension $VC$	133

5.3.3	SVM : cas linéaire sans erreur. . . . .	134
5.3.4	SVM : cas linéaire avec erreurs . . . . .	135
5.3.5	SVM : cas non-linéaire avec erreurs . . . . .	137
5.3.6	Méthodes multiclassées . . . . .	138
5.3.7	Méthodes SVM multiclassées probabilisées . . . . .	140
5.4	Applications aux images sonar de cartographie . . . . .	141
5.4.1	Données acoustiques et méthodologie . . . . .	142
5.4.2	Apport de la loi $\mathcal{K}$ angulaire . . . . .	145
5.4.3	Comparaison des méthodes SVM et loi $\mathcal{K}$ angulaire . . . . .	149
5.4.4	Régularisation markovienne . . . . .	152
5.5	Conclusions . . . . .	154
<b>Conclusions.</b>		<b>155</b>
<b>Annexes.</b>		<b>157</b>
<b>A Correction des données du sondeur multifaisceau EM1000</b>		<b>159</b>
A.1	Méthode de correction . . . . .	160
A.2	Résultats . . . . .	161
A.2.1	Étude sur une zone de référence homogène . . . . .	162
A.2.2	Comparaison sur des zones sédimentaires différentes . . . . .	165
A.2.3	Conclusion . . . . .	165
<b>B Lois Statistiques</b>		<b>167</b>
B.1	La loi de Rayleigh . . . . .	167
B.2	Mélanges de loi de Rayleigh . . . . .	167
B.3	La loi Exponentielle négative . . . . .	168
B.4	La loi $\Gamma$ et $\Gamma$ généralisée . . . . .	168
B.5	La loi log-normale . . . . .	168
B.6	La loi de Weibull . . . . .	169
B.7	La loi $\mathcal{K}$ . . . . .	169
<b>C Campagne d'acquisition <i>Reflacou</i></b>		<b>173</b>
C.1	Protocole d'acquisition . . . . .	173
C.2	Site 1 et 6 : vase + crépidules . . . . .	176
C.3	Site 2 et 5 : sable fin . . . . .	177
C.4	Site 3 : Vase compacte . . . . .	181
C.5	Site 4 : Sable grossier . . . . .	183



# Introduction

Face à l'incapacité des ondes électromagnétiques à se propager sur de longues distances dans l'eau de mer, l'acoustique s'est rapidement imposée comme moyen privilégié de prospection et de communication en milieu sous-marin. De son avènement au début du 20ème siècle jusqu'à aujourd'hui, elle a permis le développement de nombreux outils à usage scientifique ou industriel pour améliorer la connaissance du milieu sous-marin dans ses diverses composantes. L'ensemble des systèmes de détection/localisation d'une cible ou d'un obstacle à l'aide d'un signal acoustique est couramment désigné par le terme générique *sonar* (SOund NAvigation and Ranging). Leurs principales catégories d'applications sont :

- ★ les sondeurs et les sonars de pêche destinés à la détection et à la localisation de bancs de poissons ;
- ★ les sondeurs profileurs de sédiments liés à l'étude de la structure interne stratifiée des fonds marins ;
- ★ les systèmes à effet Doppler pour mesurer la vitesse du sonar ou celle de l'eau ;
- ★ les sondeurs bathymétriques spécialisés dans la mesure de la hauteur d'eau ;
- ★ les sonars d'imagerie du fond marin.

Cette thèse s'inscrit dans le contexte de la mise au point de méthodes de caractérisation des fonds marins à partir de l'information acoustique enregistrée par deux systèmes acoustiques d'imagerie : les sondeurs multifaisceaux et les sonars latéraux. L'Ifremer<sup>1</sup> regroupant des compétences en géosciences marines, traitement du signal et acoustique sous-marine, mène depuis quelques années des recherches dans ce domaine. Les efforts les plus importants ont été réalisés pour :

- ★ accroître la connaissance des liens existants entre la géologie marine et l'acoustique ;
- ★ fournir des outils d'aide à la construction de cartes sédimentaires.

Orientés principalement vers l'utilisation des sondeurs multifaisceaux (EM12 et EM1000), les études réalisées à l'Ifremer portent sur l'identification :

- ★ des particularités d'acquisition des systèmes sonar et de leur impact sur les signaux acoustiques rétrodiffusés par le fond ;
- ★ de descripteurs utiles à la caractérisation des fonds marins.

Construit autour de ces deux axes directeurs, le présent travail a été mené dans la continuité de ces recherches en proposant une étude des réponses de deux systèmes acoustiques d'imagerie (le sondeur multifaisceau EM1000 et le sonar latéral Edgetech DF1000) fonctionnant dans la même gamme de fréquence (autour de 100 kHz).

Le premier axe ne peut être étudié sans une réelle connaissance des différents phénomènes physiques (liés au milieu ou au capteur) associés au fonctionnement des systèmes sonar. La

---

<sup>1</sup>Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.

---

première partie du chapitre 1 présente les déformations subies par l'onde au cours de sa propagation acoustique dans l'eau de mer. Dans un second temps, la description géologique et acoustique des sédiments marins est introduite ainsi que les liens existants entre elles. Enfin, le phénomène de rétrodiffusion acoustique par les fonds marins, sur lequel sont basées les opérations de caractérisation, fait l'objet d'une synthèse bibliographique.

Le second chapitre présente les différentes caractéristiques d'acquisition des systèmes acoustiques d'imagerie sous-marine et leur influence sur les données mesurées. Les deux systèmes utilisés au cours de cette thèse sont ensuite présentés en détail de manière à introduire le processus de correction adapté, nécessaire à une exploitation quantitative des amplitudes. Alors que le sondeur multifaisceau EM1000 a déjà fait l'objet d'une étude approfondie ([Hel 98]), les signaux issus du sonar latéral DF1000 n'avaient jamais été exploités quantitativement. Une méthode de correction des données est donc proposée.

Lorsque les artefacts dus aux conditions d'acquisition ont été éliminés, les données reflètent uniquement les caractéristiques géoacoustiques des fonds marins ; l'étude des descripteurs peut alors être réalisée. Le troisième chapitre propose donc l'étude de l'indice moyen de rétrodiffusion. Dans un premier temps, l'analyse de ce descripteur énergétique pour différents types de sédiment confirme son rôle prépondérant dans la caractérisation des fonds. Dans un second temps, une analyse en fonction de la direction d'insonification est proposée. La structure du microrelief est rendue responsable de variations importantes de ce descripteur montrant dans le même temps les difficultés de la caractérisation des fonds.

Lorsqu'un descripteur énergétique moyen ne peut discriminer les signaux sonar associés aux sédiments marins, une approche statistique peut être menée. Le chapitre 4 propose donc une telle étude pour les deux systèmes sonar. En particulier, la loi  $\mathcal{K}$  modélise précisément la distribution de l'intensité rétrodiffusée et permet une description à la fois énergétique et texturale grâce à ses deux paramètres. Le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  est proposé comme descripteur en vue de la discrimination des types de fond.

Enfin le dernier chapitre concerne l'application des résultats obtenus dans les trois chapitres précédents à la construction d'un processus de segmentation des images sonars. L'utilisation des deux descripteurs énergétiques et statistiques est appliquée à deux approches de segmentation débouchant sur un algorithme markovien angulaire et un algorithme également angulaire combinant les méthodes SVM et le cadre markovien. L'application des algorithmes à des données expérimentales montre une amélioration de la qualité de la segmentation grâce d'une part à la prise en compte de la dépendance angulaire et d'autre part à une modélisation adaptée des données.

# Chapitre 1

## Eau de mer, sédiments et onde acoustique

Dans ce chapitre, nous présentons succinctement les différents phénomènes physiques affectant les signaux acoustiques utilisés en cartographie sous-marine. Ceux-ci dépendent, en dehors des caractéristiques du système d'acquisition<sup>1</sup>, des propriétés des milieux rencontrés via deux processus prépondérants : la propagation acoustique dans l'eau de mer et la rétrodiffusion par une interface sédimentaire. Premièrement, la propagation d'une onde acoustique est provoquée par la transmission d'un mouvement vibratoire de molécule à molécule. Ainsi, la propagation du son est étroitement liée aux types de molécules présentes dans le milieu considéré mais aussi aux conditions locales de température et de pression. Ensuite, le principe de base de la caractérisation acoustique sous-marine stipule que l'interaction entre un son et une surface sédimentaire provoque une réponse dont les caractéristiques dépendent du type de fond marin.

Ainsi, dans cette partie, seront présentés successivement l'eau de mer et les sédiments marins au travers de leurs caractéristiques géologiques et acoustiques ; puis leurs interactions respectives avec une onde acoustique seront exposées.

### 1.1 L'eau de mer

#### 1.1.1 Composition et paramètres

L'eau de mer couvre 70% du globe et constitue 97% de toute l'eau de la terre. Elle est composée essentiellement d'eau pure et de sels minéraux :

- ★ l'eau pure provient de la condensation de la vapeur d'eau primitive ;
- ★ les sels minéraux (sulfate de magnésium, acide borique, ...) proviennent de l'érosion du sol. Depuis des millions d'années, les sels minéraux contenus dans le sol sont dissous par l'eau de pluie pour être ensuite emportés vers les océans par les rivières et les fleuves.

En outre, de nombreuses hétérogénéités sont présentes dans les océans : particules minérales, organismes vivants (planctons, poissons,...), bulles près de la surface (dues à l'agitation, sillages de bateaux).

Trois paramètres physiques permettent de décrire l'eau de mer :

---

<sup>1</sup>Celles-ci seront étudiées au chapitre 2.

- ★ La température des eaux marines 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 (brassage, soleil, courants, apports extérieurs) jusqu'à environ 1000 mètres. En dessous, la température moyenne décroît lentement en fonction de la profondeur et la position géographique a moins d'influence.
- ★ 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. Alimentés par l'eau de pluie, les lacs et les rivières ont une salinité très faible. Dans les régions tropicales, où règnent une chaleur intense, les océans sont soumis à une forte évaporation ; l'eau s'évapore pour former les nuages et la concentration en sels minéraux augmentent. Si la salinité est variable en fonction de la zone géographique, elle est très peu dépendante de la profondeur ; à l'exception des estuaires, des zones de mélange (par exemple Méditerranée/Atlantique).
- ★ La pression hydrostatique est fonction de la latitude et de la profondeur ; elle augmente d'environ 1 bar par 10 mètres<sup>2</sup>.

### 1.1.2 Propriétés acoustiques

D'un point de vue acoustique, l'eau de mer se comporte comme un milieu fluide dissipatif et est donc caractérisée par une atténuation et une célérité acoustique.

#### 1.1.2.1 Célérité acoustique dans l'eau de mer

La vitesse du son dans l'eau de mer  $c_w$  joue un rôle majeur dans la propagation acoustique ; elle est étroitement corrélée aux caractéristiques du milieu de propagation (température et salinité) mais dépend aussi de la pression hydrostatique. Nous avons vu dans la partie précédente que :

- ★ la température varie en fonction de la profondeur et des conditions locales ;
- ★ la salinité varie essentiellement en fonction des conditions locales ;

Ainsi, la célérité du son dans l'eau de mer est une fonction de la situation géographique et de la profondeur.

De nombreux modèles paramétriques ont été largement développés sur le sujet (par exemple [Wil 60], [Ler 69], [Del 74]). Le plus largement utilisé est le modèle développé par Chen et Millero dont l'expression est ([Che 77a]) :

$$c_w = p_0 + p_1 P + p_2 P^2 + p_3 P^3 + s_1 S + s_2 S^{3/2} + s_3 S^2. \quad (1.1)$$

Les quatre premiers termes correspondent à la contribution de l'eau pure et les trois derniers à la salinité ; tous ces coefficients dépendant de la profondeur.

Depuis des années, de nombreuses mesures *in-situ* ont été réalisées permettant notamment la construction de bases de données locales. Les profils de célérité en fonction de la profondeur sont désormais connus et on sait qu'ils sont composés de plusieurs éléments caractéristiques (Fig. 1.1) :

- ★ une couche homogène de **célérité constante** dans les premiers mètres de profondeur ;

---

<sup>2</sup>Le lecteur trouvera dans [Ler 68] l'expression précise.

- ★ un **chenal de surface** correspondant à une vitesse du son en augmentation généralement due à une couche d'eau isotherme ;
- ★ une **thermocline** appelée ainsi car la température y varie de manière monotone en fonction de la profondeur ;
- ★ un **chenal profond** où la célérité atteint une valeur minimale ;
- ★ une **couche isotherme** où la température est constante, la célérité du son augmente avec la pression hydrostatique.

Ces différents éléments se combinent pour former de nombreux types de profils de célérité dépendant des conditions locales.

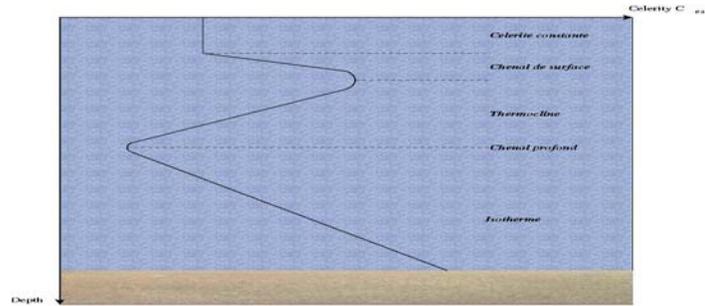


FIG. 1.1 – Les différents éléments caractéristiques d'un profil de célérité du son dans l'eau de mer.

### 1.1.2.2 Atténuation

L'eau de mer, milieu de propagation dissipatif, absorbe une partie de l'onde émise, qui est dissipée par frottement ou par réaction chimique. Cette perte de propagation, traduite par un coefficient d'amortissement  $\alpha_w$  (exprimé en dB/km), est due à ([Fra 82a]) :

- ★ la viscosité de l'eau pure,
- ★ la relaxation des molécules de sulfate de magnésium  $MgSO_4$ , autour de 100 kHz,
- ★ la relaxation des molécules d'acide borique  $B(OH)_3$  autour de 1kHz.

Le phénomène de relaxation est causé par le réarrangement des molécules dû à un changement de pression. La perte d'énergie acoustique dépend alors du temps pendant lequel les molécules se réordonnent : le temps de relaxation. 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 basse, plus le coefficient d'absorption est faible.

De nombreux modèles sont disponibles pour estimer l'atténuation des ondes dans l'eau de mer. Les plus récents sont de la forme :

$$\alpha_w = C_1 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + C_2 \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + C_3 f^2. \quad (1.2)$$

Les deux premiers termes de cette équation décrivent les contributions des deux processus de relaxation alors que le dernier terme représente le phénomène de viscosité de l'eau pure. Les fréquences de relaxation  $f_i; i = 1, 2$  et les coefficients  $C_i; i = 1, 2$  dépendent de la température, de la pression et de la salinité. Le modèle le plus souvent utilisé reprend cette terminologie et a été développé par Francois et Garrison ([Fra 82a] et [Fra 82b]). La figure (1.2) représente la

dépendance fréquentielle pour ce modèle du coefficient d'absorption tracée pour trois valeurs de température différente. La salinité est prise égale à 35‰ et la profondeur est de 0 mètre.

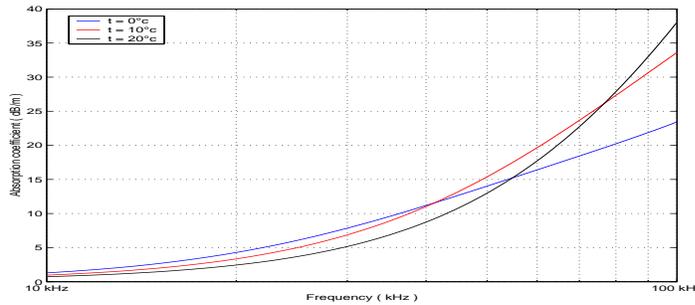


FIG. 1.2 – Evolution de l’absorption dans l’eau de mer en fonction de la fréquence ([Fra 82b]) pour une salinité de 35‰ et une profondeur nulle.

### 1.1.3 Effets sur la propagation dans la masse d’eau

L’onde acoustique subit plusieurs phénomènes de caractéristiques différentes au cours de la propagation dans la masse d’eau. D’une part, du fait du caractère dissipatif de l’eau de mer et de la structure de l’onde acoustique, celle-ci est soumise à une diminution d’intensité. D’autre part, du fait de l’hétérogénéité spatiale du milieu de propagation (couches de célérités différentes), l’onde subit une déformation géométrique du fait de la réfraction.

#### 1.1.3.1 Pertes par transmission

La propagation d’une onde acoustique depuis une source sonore correspond à un étalement de l’énergie acoustique émise sur une surface de plus en plus importante, et donc à une diminution d’intensité proportionnellement à cette surface (perte par divergence). Dans le cas des systèmes sonar, en supposant que la source est située à une distance suffisamment éloignée de l’observation (hypothèse de champ lointain), l’onde émise est sphérique et la perte de transmission par *divergence sphérique*  $PT_{div}$  (exprimé en dB), est donnée par :

$$PT_{div} = 20 \cdot \log_{10}(R/R_1), \quad (1.3)$$

où  $R$  est la distance source/cible et  $R_1$  est la distance de référence de 1 mètre.

En outre, l’eau de mer est un milieu dissipatif caractérisé par un coefficient d’absorption  $\alpha_w$ . Au cours de la propagation acoustique, l’onde subit une perte de transmission par absorption  $PT_{abs}$  :

$$PT_{abs} = \alpha_w \cdot R. \quad (1.4)$$

#### 1.1.3.2 Courbures des rayons acoustiques

L’eau de mer possède des caractéristiques de célérité acoustique dépendant de la profondeur, formant ainsi un ensemble de milieux de propagation de caractéristiques différentes. Ce changement de caractéristiques provoque une courbure des rayons acoustiques basée sur la loi de réfraction de Snell-Descartes ([Cla 77b]).

Considérons l’interface plane entre deux milieux fluides homogènes (Fig. 1.3). La couche supérieure est caractérisée par une célérité  $c_1$ , et la couche inférieure par une célérité  $c_2$ . Une

onde se propage dans le milieu 1 et rencontre l'interface entre les deux milieux avec un angle d'incidence  $\theta_1$  par rapport à la normale à l'interface. La direction de l'onde transmise dans le milieu 2 est modifiée et se trouve caractérisée par un angle d'incidence  $\theta_2$ . La relation entre  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  est donnée par la loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2}. \quad (1.5)$$

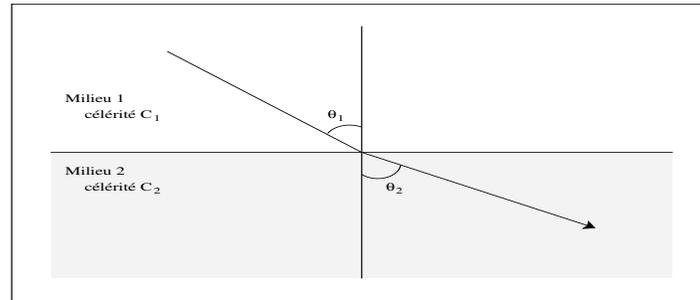


FIG. 1.3 – Réfraction due à un changement de célérité entre deux milieux.

Le milieu de propagation est souvent considéré comme horizontalement stratifié ; la vitesse du son dans l'eau de mer dépend alors seulement de la profondeur. Dans ce cas, le profil de célérité peut être discrétisé (Fig. 1.4) et l'application de la loi de Snell-Descartes permet de suivre les modifications de directions du trajet sonore quand il passe du milieu 1 au 2, du 2 au 3 et ainsi de suite :

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2} = \frac{\sin(\theta_3)}{c_3} = \dots = \frac{\sin(\theta_n)}{c_n}. \quad (1.6)$$

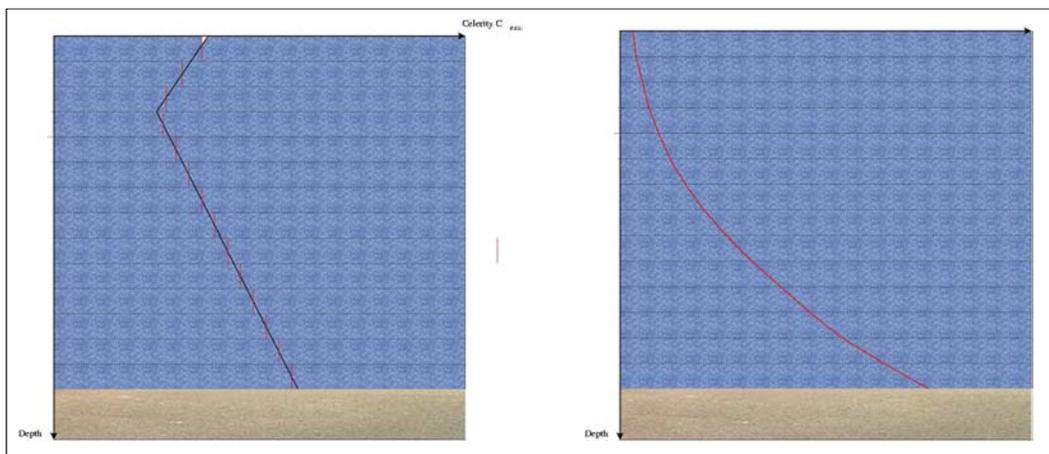


FIG. 1.4 – (*Gauche*) Discrétisation du profil de célérité. (*Droite*) Modification de la trajectoire des ondes acoustiques.

## 1.2 Description géoacoustique des fonds marins

Il existe deux catégories bien distinctes de reliefs sous-marins (Fig. 1.5) :

- ★ la marge continentale ou pré-continent, on y reconnaît en partant du continent :
  - ★★ la plate-forme ou plateau continental, avec ses formes subaériennes immergées (vallées fluviales, dunes,...),
  - ★★ un talus incliné, à partir de -200 m., fréquemment lacéré de vieux canyons,
  - ★★ un glacis<sup>3</sup> périphérique.
- ★ les cuvettes océaniques, basaltiques en principe, elles peuvent être :
  - ★★ des bassins à fond plat, entre -4000 et -6000 m,
  - ★★ des plateaux et seuils porteurs de nombreux pitons sous-marins,
  - ★★ des dorsales (qui sont toutes des lignes de haute activité sismique et volcanique, jalonnées de fumerolles à 300°C et d'îles volcaniques telle l'Islande),
  - ★★ des fosses abyssales, profondes et allongées, situées soit au pied d'arcs insulaires volcaniques (fosse des Mariannes : -11034 m.), soit au pied de cordillères continentales (fosse d'Atacama : -8066 m.).

**Le cadre de cette thèse concerne exclusivement l'étude des fonds marins superficiels du plateau continental.** Le plateau continental correspond à 20% des fonds marins, soit 14% de la surface du globe. Cette zone assure la transition entre terres immergées et grands fonds océaniques (Fig. 1.5).

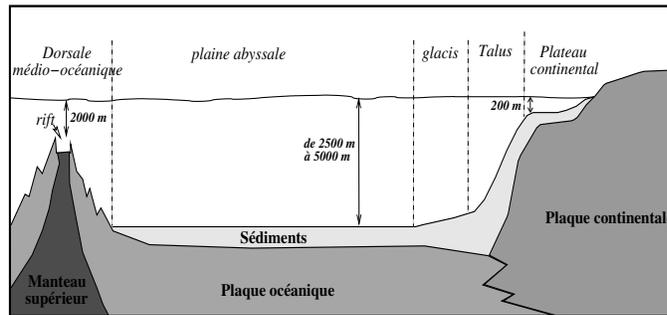


FIG. 1.5 – Schéma structural général des fonds océaniques.

Cette partie est consacrée à l'étude géoacoustique des sédiments du plateau continental. Le lecteur prendra ainsi connaissance de leur classification géologique, des liens avec l'acoustique et enfin des paramètres décrivant leur agencement sur le fond.

### 1.2.1 Description géologique des sédiments / classes granulométriques

Les sédiments marins présents sur le plateau sont le fruit de l'érosion et du transport sédimentaire et de l'activité biologique. Tous les phénomènes d'érosion, de frottements, de collisions, de dissolution chimique, de transports par les courants, d'accumulation, de dépôt de sédimentation contribuent à façonner d'une part une très grande diversité de faciès sédimentaires et d'autre part une variabilité temporelle rapide (en ce qui concerne le plateau continental).

Les problèmes essentiels que pose la caractérisation géologique des sédiments ont pour origine le caractère fondamentalement hétérogène de ceux-ci :

- ★ hétérogénéité spatiale aussi bien dans le sens vertical (révélant l'historique de la sédimentation) que dans le plan horizontal (géographique) ;

<sup>3</sup>Surface d'érosion en pente (Petit Robert).

- ★ hétérogénéité interne des sédiments aussi bien par leur constitution en particules de tailles ou de natures diverses, ou par la présence d'hétérogénéités (activité biologique) modifiant les propriétés d'origine du sédiment (présence d'agrégats calcaires, de coquilles de mollusques, de bulles d'air, de végétaux,...).

Il existe dans la littérature deux grands types de classification géologique des sédiments :

- ★ la **classification minéralogique** (basée sur la composition chimique des particules) ;
- ★ la **classification granulométrique** (taille des particules).

La classification minéralogique est basée sur la nature chimique des éléments caractéristiques ou dominants (présence de quartz, de calcaires, ...). D'une précision très fine, ce type de classification n'est malheureusement pas adapté aux réponses enregistrées par les systèmes d'imagerie acoustique. Pour de tels systèmes, seule une aide à la classification granulométrique est envisageable, c'est à dire une classification réalisée selon l'hypothèse qu'il existe une relation biunivoque entre les caractéristiques des signaux acoustiques réverbérés par le fond et la taille des grains.

L'existence de cette relation suppose que :

- ★ les dimensions de l'interface (rides, rugosité,...) et des diffuseurs volumiques du fond soient d'un ordre de grandeur comparable à la longueur d'onde acoustique incidente afin que l'interaction entre cette onde et le sédiment fasse apparaître des réponses différentes selon la nature du sédiment ;
- ★ la géomorphologie et les paramètres géoacoustiques soient des paramètres discriminants des différents sédiments rencontrés.

Ces hypothèses fixent les limites de la classification des sédiments marins par des systèmes acoustiques.

### 1.2.1.1 Classes granulométriques

De façon simplifiée, on distingue trois grands types de sédiments correspondant à des tailles de grains croissantes :

- ★ les **vases** : sédiments fins et meubles, à forte teneur en eau (très poreux) ;
- ★ les **sables** : sédiments produits par l'érosion rocheuse ;
- ★ les **graviers** : composés d'éléments de roche ou d'agglomérats incohérents d'origine variée (débris de coquilles de mollusques par exemple).

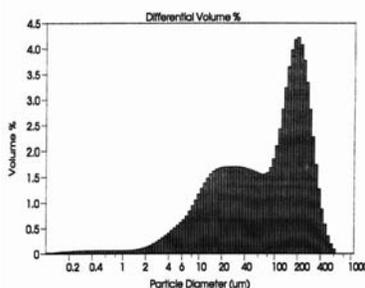


FIG. 1.6 – Exemple d'une distribution granulométrique d'un sable mesurée par un granulomètre laser.

A l'intérieur de ces familles de sédiment, il est possible de faire apparaître des nuances entre les tailles de grains (par exemple sable fin, sable moyen, sable grossier,..). Malheureusement, deux éléments compliquent l'analyse d'échantillons sédimentaires. D'une part, il n'existe pas de frontière marquée entre ces différentes classes. D'autre part et plus gênant, le processus de sédimentation engendre des fonds faisant preuve d'hétérogénéités ; un prélèvement réalisé peut montrer qu'un sédiment n'est pas constitué d'une seule taille de particules. La granulométrie d'un échantillon montre au contraire une distribution des tailles de grains autour d'un ou plusieurs modes principaux. La figure (1.6) montre un exemple d'une telle distribution obtenue par un granulomètre laser. Dans ce cas, il y a présence de deux modes : le principal à  $200 \mu\text{m}$  et le second autour de  $30 \mu\text{m}$ . Ce sédiment sera alors nommé sable fin silteux par un expert. Dans chacun des cas, des grandeurs statistiques sont calculées : mode principal, moyenne, médiane, passant à  $n\%$ <sup>4</sup>... La variété des appellations possibles, basées sur les proportions volumiques de chaque classe, est très grande et très difficile à évaluer dans le cadre des méthodes d'inversion géoacoustique.

Plusieurs auteurs ([She 54], [Sle 84], [Wen 78], [Tuc 89]) se sont attachés à définir des caractéristiques, des encadrements de taille des grains et une nomenclature pour chacune des classes considérées.

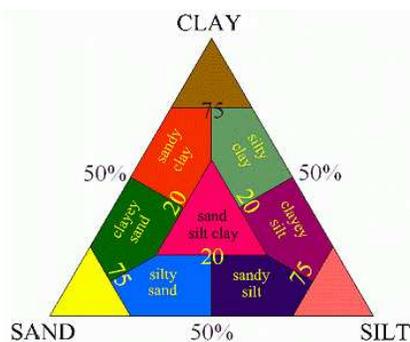


FIG. 1.7 – Diagramme de Shepard ([She 54]).

Un échantillon composé exclusivement de sable (par exemple) se situera sur le sommet correspondant. Un échantillon dont la composition manque entièrement d'un composant se situera sur le côté opposé au sommet correspondant (sa position dépendant des pourcentages des autres composants). Le diagramme de Shepard suit les conventions de tous les diagrammes ternaires ; les échantillons de sédiments sont ainsi répartis en dix classes. Par exemple, les argiles doivent contenir au moins 75% de particules argiles. "Silty Sands" et "Sandy Silts" ne contiennent pas plus de 20% d'argile, et "Sand-Silt-Clays" contiennent au moins 20% des trois composants. Ce type de classification peut être qualifié d'exclusivement sédimentaire car son facteur de limitation est de ne pas classer les graviers, cailloux et galets.

Ce problème est résolu par Sleath ([Sle 84]) qui propose la classification donnée par le tableau (1.1). Cette classification est basée sur une découpe en six grandes classes, des galets à l'argile, elles-même séparées en plusieurs catégories ; au total 24 groupes sont constitués.

<sup>4</sup>Le passant à  $n \%$  est la taille des particules telle que  $n \%$  de celles-ci lui sont inférieures.

Nom	taille en mm	taille en $\mu\text{m}$	taille en $\phi_d$
<b>Boulders (galets)</b>			
Very large	4096 $\rightarrow$ 2048		-12 $\rightarrow$ -11
Large	2048 $\rightarrow$ 1024		-11 $\rightarrow$ -10
Medium	1024 $\rightarrow$ 512		-10 $\rightarrow$ -9
Small	512 $\rightarrow$ 256		-9 $\rightarrow$ -8
<b>Cobbles (cailloux)</b>			
Large	256 $\rightarrow$ 128		-8 $\rightarrow$ -7
Small	128 $\rightarrow$ 64		-7 $\rightarrow$ -6
<b>Gravel (graviers)</b>			
Very coarse	64 $\rightarrow$ 32		-6 $\rightarrow$ -5
Coarse	32 $\rightarrow$ 16		-5 $\rightarrow$ -4
Medium	16 $\rightarrow$ 8		-4 $\rightarrow$ -3
Fine	8 $\rightarrow$ 4		-3 $\rightarrow$ -2
Very fine	4 $\rightarrow$ 2		-2 $\rightarrow$ -1
<b>Sand (Sable)</b>			
Very coarse	2 $\rightarrow$ 1	2000 $\rightarrow$ 1000	-1 $\rightarrow$ 0
Coarse	1 $\rightarrow$ 0.5	1000 $\rightarrow$ 500	0 $\rightarrow$ 1
Medium	0.5 $\rightarrow$ 0.25	500 $\rightarrow$ 250	1 $\rightarrow$ 2
Fine	0.25 $\rightarrow$ 0.125	250 $\rightarrow$ 125	2 $\rightarrow$ 3
Very fine	0.125 $\rightarrow$ 0.062	125 $\rightarrow$ 62	3 $\rightarrow$ 4
<b>Silt</b>			
Coarse	0.062 $\rightarrow$ 0.031	62 $\rightarrow$ 31	4 $\rightarrow$ 5
Medium	0.031 $\rightarrow$ 0.016	31 $\rightarrow$ 16	5 $\rightarrow$ 6
Fine	0.016 $\rightarrow$ 0.008	16 $\rightarrow$ 8	6 $\rightarrow$ 7
Very fine	0.008 $\rightarrow$ 0.004	8 $\rightarrow$ 4	7 $\rightarrow$ 8
<b>Clay (argile)</b>			
Coarse	0.004 $\rightarrow$ 0.002	4 $\rightarrow$ 2	8 $\rightarrow$ 9
Medium	0.0020 $\rightarrow$ 0.0010	2 $\rightarrow$ 1	9 $\rightarrow$ 10
Fine	0.0010 $\rightarrow$ 0.0005	1 $\rightarrow$ 0.5	10 $\rightarrow$ 11
Very fine	0.0005 $\rightarrow$ 0.00024	0.5 $\rightarrow$ 0.24	11 $\rightarrow$ 12

TAB. 1.1 – Classification granulométrique de Sleath ([Sle 84]).

La dernière colonne exprime la taille des grains en unité  $\Phi_g$  :

$$\Phi_g = -\log_2(d_g), \quad (1.7)$$

où  $d_g$  est le diamètre moyen des particules en millimètres. Cette classification établit le passage d'une classe à l'autre en modifiant la valeur de  $\Phi_g$  par pas de 1.

### 1.2.2 Acoustique et sédiments

Dans la section précédente, le lecteur aura pu prendre conscience de la complexité de l'analyse sédimentaire. Cet aperçu laisse envisager les problèmes générés par l'interaction entre la diversité des fonds marins et une onde acoustique. En effet, l'analyse de signaux acoustiques réverbérés par les fonds marins ne permet pas d'avoir directement accès aux

critères habituels de classification en géologie (granulométrie, minéralogie). Ainsi, le problème inverse<sup>5</sup> à partir de tels systèmes nécessite une connaissance précise du comportement acoustique des sédiments et donc d'un modèle géoacoustique du sol permettant de lier paramètres géologiques caractéristiques du type de fond (densité, porosité, taille des grains) et paramètres géoacoustiques (célérité et atténuation des ondes ; caractéristiques du micro-relief).

Les relations liant ces paramètres sont complexes révélant la diversité des sédiments marins. Même si les différentes particules de base sont parfaitement connues, l'ensemble des configurations possibles de mélange, conjugué à la présence d'événements acoustiquement perturbateurs (bulles de gaz par exemple) pénalise la détermination d'un modèle fédérateur et bijectif.

Néanmoins, l'obtention de tels modèles a fait l'objet de nombreuses études ; deux familles d'approches ont été utilisées :

- ★ La première consiste à rassembler le plus de données possibles, obtenues *in situ* ou en laboratoire, et à établir des relations permettant d'obtenir les paramètres acoustiques de la plus grande variété de sédiments possibles. L'avantage de cette méthode est de fournir des estimations et/ou des ordres de grandeurs des paramètres acoustiques. Les travaux les plus complets sont ceux effectués par Hamilton ([Ham 80], [Ham 82]).
- ★ Une approche théorique a été aussi envisagée. A partir d'une description physique et mécanique du sédiment, les relations entre paramètres acoustiques et géotechniques sont dérivées. Dans ce contexte, deux grandes théories s'opposent. La première considère le sédiment d'un point de vue acoustique comme un fluide et permet d'obtenir la célérité à partir de la densité et du module d'élasticité. La seconde suppose que le sédiment est constitué de deux phases (une liquide et une solide appelé "squelette") et est ainsi considéré comme un matériau poreux.

Cette section s'appuie sur les résultats de Hamilton pour présenter les paramètres acoustiques des sédiments et donner des ordres de grandeurs en fonction de différents types de fonds. Cette étude se base sur une mesure systématique des échantillons provenant d'une part du plateau continental et d'autre part des plaines abyssales. Bien évidemment, seuls les résultats issus du plateau continental seront présentés ici.

### 1.2.2.1 Célérité

La célérité du son dans le sédiment est un facteur important pour la caractérisation du fond. En effet, celle-ci dépend de la vitesse du son dans le fluide interstitiel du sédiment, et des caractéristiques du milieu solide (squelette constitué par les particules). Elle croît avec la profondeur : ceci est dû au poids des sédiments accumulés qui compresse les particules et expulse ainsi l'eau.

Hamilton et Bachman ([Ham 82]) proposent toute une série de valeurs de célérité du son dans des sédiments mesurées sur des échantillons. En classant ces données en trois grandes catégories, ils obtiennent des ordres de grandeur de la célérité dans les sédiments :

---

<sup>5</sup>obtenir les paramètres géologiques à partir des données acoustiques.

Sédiment	min. (m/s)	max (m/s)
Argile	1493	1577
Silt	1522	1644
Sable	1596	1836

Dans cette étude, les auteurs présentent les mesures de célérité en fonction de trois paramètres géotechniques (porosité, taille des grains, célérité). Aucune conclusions définitives ne sont déterminées compte tenu de la grande dispersion des résultats. Néanmoins, Hamilton montre que (Fig. 1.8) :

- ★ Lorsque la porosité décroît, la célérité augmente dans le sédiment (*gauche*).
- ★ Lorsque la densité augmente, la célérité augmente (*droite*).
- ★ Lorsque la taille des grains augmente, la célérité augmente (*milieu*).

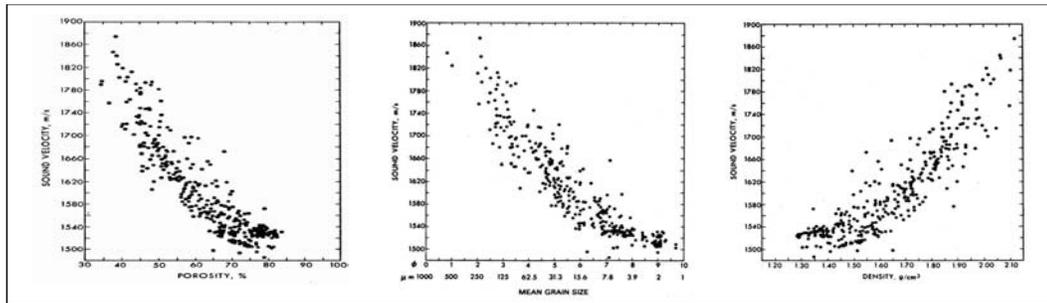


FIG. 1.8 – Célérité en fonction ([Ham 82]) de la porosité des fonds (*gauche*), de la taille des grains (*milieu*) et de la densité (*droite*).

### 1.2.2.2 Atténuation

Le coefficient d'atténuation  $\alpha_{sed}$  de l'onde dans le sédiment correspond à une perte d'énergie en fonction de la distance et est exprimé en dB/m. Ce coefficient dépend du fond marin, et aussi de la fréquence de l'onde. Plus la fréquence est importante, plus l'onde est atténuée dans le sédiment. Hamilton propose les mesures d'atténuation  $k_p$ <sup>6</sup> en fonction de la porosité et de la taille des grains (Fig. 1.9). Ainsi, l'atténuation augmente avec la taille des grains jusqu'à une certaine valeur puis redescend. Cette frontière correspond au passage du silt au sable.

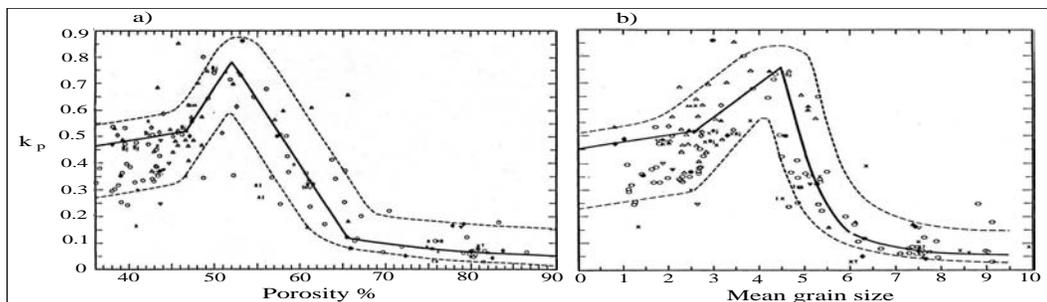


FIG. 1.9 – Atténuation  $k_p$  en fonction de la porosité (*gauche*) et de la taille des grains (*droite*).

<sup>6</sup> $\alpha_{sed} = k_p \cdot f$  où  $\alpha_{sed}$  est l'absorption dans le sédiment en dB/m et  $f$  la fréquence en kHz.

### 1.2.3 Description de l'interface sédimentaire

En dehors de leur diversité de composition, les interfaces sédimentaires ne sont pas dotées d'une configuration déterministe mais multiforme. Un modèle phénoménologique ne peut prendre en compte l'étendue des différentes formes de types de fonds. En conséquence, le relief du fond est considéré comme un processus aléatoire. De ce fait, l'observation de sa surface se fait par l'intermédiaire de descripteurs statistiques. Les descripteurs de l'interface sédimentaire sont des sources d'informations faisant partie intégrante du processus de caractérisation acoustique :

- ★ le relief est révélateur du processus de dépôt sédimentaire mais est aussi étroitement corrélé au type de sédiment déposé ;
- ★ le relief interagit fortement avec la rétrodiffusion de l'onde acoustique (cf. section 1.3).

Les caractéristiques géométriques des événements d'une surface naturelle sont très variées et occupent une large gamme d'ordre de grandeurs, depuis les rides/dunes de sables jusqu'aux micro-événements (activité biologique, débris coquillés, ...). De manière classique, on sépare le relief en deux composantes (Fig. 1.10) :

- ★ le relief **macro-échelle** traduisant les variations de hauteurs sur de grandes distances (typiquement plusieurs mètres).
- ★ le relief **micro-échelle** relatif aux élévations locales et qui est caractéristique de la nature du fond considéré.

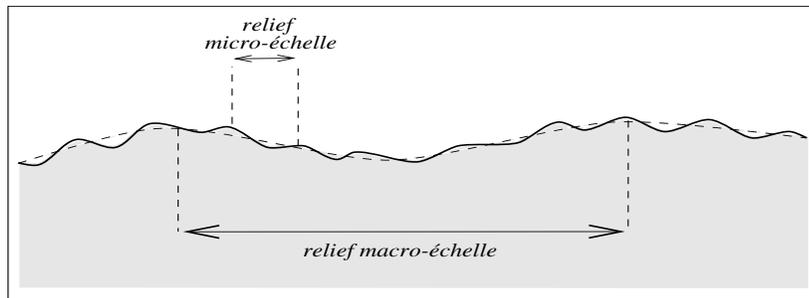


FIG. 1.10 – Exemple de séparation du relief sédimentaire en micro et macro échelle.

La détermination de la séparation entre les deux échelles est le plus souvent arbitraire. Elle est en général, fixée de manière à satisfaire à une hypothèse théorique (cf. 1.3) ou en fonction d'événements particuliers à détecter (étude du micro-relief sur les statistiques rétrodiffusées (cf. chapitre 4)).

Les relations existant entre les paramètres d'interface et les différents types de fonds sont assez mal connues. En effet, il existe peu de mesures systématiques précises ; les levés bathymétriques des sondeurs multifaisceaux représentent une source d'informations intéressantes mais ne révèlent pour le moment que des macro-événements. Seules des photographies sous-marines et quelques mesures de spectre de rugosité (par photogrammétrie [Bri 89] et/ou conductivité électrique [Bri 02]) nous permettent d'estimer des valeurs de hauteurs et de pentes pour différents types de fonds. Pourtant, l'idée de discriminer les différentes natures de fonds apparaît naturelle ; il est difficile d'imaginer un fond de boue très chahuté ou un fond de roche totalement lisse. Certes, les exceptions existent mais pourront être traitées comme des cas particuliers. Globalement, il paraît naturel de penser que plus un sédiment est dur,

plus son organisation spatiale sera chahutée (roches). A contrario, un sédiment très fluide ne pourra pas présenter de pentes de sa surface supérieure.

Une surface rugueuse est typiquement décrite par ses variations de relief. Soit  $\zeta(x, y)$ , la valeur de la hauteur d'un point de l'interface repéré par le point de coordonnées  $(O, \vec{r}) = (x, y)$ . Le plan de référence est choisi horizontal et situé de telle façon que  $\mathbb{E}[\zeta] = 0$ .

Plusieurs hypothèses sont communément faites pour les représentations statistiques de surfaces rugueuses aléatoires : stationnarité, ergodicité et isotropie.

### 1.2.3.1 Stationnarité

Un processus  $\zeta(\vec{r}) = \zeta(x, y)$  est dit **stationnaire** si ses propriétés, i.e probabilités, ne dépendent pas de  $r$ . On fait souvent cette hypothèse dans les processus physiques car sinon il n'y aurait aucun espoir de déduire quoique ce soit d'une observation d'un processus. Si cette hypothèse n'est pas valable, on peut aussi se limiter à une stationnarité de second ordre. Dans ce cas, les probabilités peuvent évoluer mais on suppose que les moments (et plus particulièrement la moyenne et la variance) ne dépendent pas de la position sur l'interface.

Un processus stochastique  $\zeta(\vec{r}), \vec{r} \in \mathbb{R}^2$  est dit **stationnaire du second ordre** si :

- ★ les moments du second ordre du processus existent et sont finis.
- ★ la fonction de covariance du processus  $\text{Cov}[\zeta(\vec{r}), \zeta(\vec{s})]$  ne dépend que de la différence  $|\vec{r} - \vec{s}|$ , c'est à dire qu'il existe une fonction  $F$  telle que :

$$\forall \vec{r}, \vec{s} \in \mathbb{R}^2, \text{Cov}[\zeta(\vec{r}), \zeta(\vec{r} + \vec{s})] = F(\vec{s}). \quad (1.8)$$

Ainsi, une surface sera dite stationnaire si la probabilité qu'un point de la surface ait une hauteur  $\zeta$  est indépendante de sa position sur la surface, et si tout descripteur statistique établissant une mesure en deux ou plusieurs points, dépend uniquement du vecteur reliant ces points et non de leurs positions sur l'interface. En conséquence, la surface possédera une caractéristique d'invariance statistique par translation.

### 1.2.3.2 Ergodicité

Un processus aléatoire est dit ergodique s'il a la propriété que toute moyenne statistique estimée à partir d'un ensemble fini d'évènements peut être utilisée comme approximation pour la statistique globale correspondante. Dans de nombreux cas, la rugosité d'interface est supposée être un processus aléatoire ergodique. La zone à partir de laquelle sont estimées les statistiques, doit alors être suffisamment grande pour véritablement pouvoir représenter la nature aléatoire de la surface.

### 1.2.3.3 Isotropie

Une surface sera dite isotrope si ses statistiques de rugosité sont indépendantes de la direction. La plupart des surfaces des fonds marins sont isotropes (graviers, vases). Cependant, cette hypothèse exclut des reliefs à structure orientée dans le plan horizontal comme les fonds présentant des rides de sables.

Ces notions étant introduites, nous pouvons désormais définir les différentes variables descriptives de l'interface sédimentaire rencontrées dans la suite. Considérons une fonction

d'espace  $\zeta(\vec{r}) = \zeta(x, y)$ , hauteur d'un point de l'interface repéré par  $(x, y)$ . Le plan de référence est choisi tel que  $\mathbb{E}[\zeta] = 0$ . Supposons alors que ce processus est aléatoire, réelle, ergodique, stationnaire d'ordre 2 et isotrope.

La **rugosité locale** est alors définie par l'écart-type des hauteurs  $\sigma_s$ . La fonction de corrélation d'un profil de surface représente la **mesure des longueurs d'échelles** pour lesquelles les hauteurs d'interface changent :

$$\Gamma_s(r) = \mathbb{E} \left[ \zeta(\vec{r}_1) \zeta(\vec{r}_2) \right], \quad (1.9)$$

avec  $r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|$ .

Soit  $W_s$  la **densité spectrale de rugosité normalisée** définie par :

$$W_s(\vec{k}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_s(r) e^{-i\vec{k} \cdot \vec{r}} d\vec{r}, \quad (1.10)$$

où  $k$  est le nombre d'onde spatial. La densité spectrale de rugosité montre la distribution de l'énergie des différentes composantes harmoniques du relief. Le spectre présentera un pic important si le relief est périodique (par exemple, dans le cas de rides de sables) ou un spectre sans discontinuité si le relief est complètement aléatoire. Les modèles supposent le plus souvent des reliefs stationnaires et isotropes et utilisent un spectre de rugosité en loi de puissance négative  $\gamma$  :

$$W_s(k) = w_o k^{-\gamma}. \quad (1.11)$$

Le dernier paramètre est l'**écart-type des pentes**  $\delta_s$ , défini par :

$$\delta_s^2 = \mathbb{E} \left[ \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (1.12)$$

La distribution gaussienne  $\mathcal{N}(0, \sigma_s)$  est généralement choisie pour décrire les variations de hauteurs  $\zeta$ ; ce qui est raisonnablement vérifié en première approche sauf pour des fonds périodiques comme pour les rides de sable. Dans ce cas (gaussien), les calculs sont analytiques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_s(r) = \sigma_s^2 e^{-\frac{r^2}{L_c^2}}, \\ \delta_s = \frac{2\sigma_s}{L_c}, \end{array} \right. \text{ où } L_c \text{ est la longueur de corrélation spatiale.} \quad (1.13)$$

Les études de relief connaissent un intérêt nouveau depuis le développement récent de nouveaux appareillages. Aux deux techniques existantes (photogrammétrie (aussi nommée stéréophotographie) et systèmes mesurant la conductivité) s'ajoute désormais un dispositif de photogrammétrie digital ([Lyo 02]) et un système de mesures par laser ([Moo 02]). Les plus récentes études montrent que le spectre de rugosité en loi de puissance classiquement utilisé, n'ajuste pas correctement les mesures ([Bri 02]). Les auteurs utilisent un modèle multiple de loi de puissance décomposé par bande de fréquences spatiales. Enfin, ils constatent une non-stationnarité spatiale pour un décalage de 1 à 2 mètres. Lyons *et al.* ([Lyo 02]) déterminent le spectre de rugosité 2D pour un fond composé de rides de sable. Les résultats montrent que les surfaces sédimentaires sont souvent anisotropes et la distribution des hauteurs ne possède pas le plus souvent, de caractère gaussien. Ainsi, les auteurs démontrent la dangerosité de ces hypothèses pour de tels types de fonds. Pour modéliser le spectre de rugosité sur l'ensemble de la gamme de fréquence spatiale, ils introduisent une composante périodique basse fréquence à la loi de puissance classique.

## 1.3 Rétrodiffusion par les fonds marins

Les systèmes d'imagerie d'acoustique sous-marine exploitent la réponse du fond à un son (cf. chapitre 2). Afin de s'affranchir des caractéristiques du système d'acquisition, une phase de correction est indispensable pour permettre d'accéder à l'**indice de rétrodiffusion angulaire**  $BS$  (ne dépendant alors, à une fréquence donnée, que des caractéristiques propres du fond). Cet outil de caractérisation des fonds marins a favorisé le développement de modèles phénoménologiques acoustiques permettant d'estimer les paramètres acoustiques et topographiques des sédiments. Afin de dériver leurs expressions analytiques, les différentes théories intervenant dans le phénomène acoustique de la réverbération d'une onde acoustique par un fond marin rugueux, vont être exposées.

### 1.3.1 Indice de rétrodiffusion

Les fonds marins sont généralement assimilés à une interface (eau / sédiment) rugueuse en dessous de laquelle se trouve un volume inhomogène (Fig. 1.11). L'**indice de diffusion** définit comme le pouvoir diffusant intrinsèque d'une cible indépendamment de sa taille et de la distance entre la cible et le point d'observation. Cet indice est assimilé à un processus issu de la sommation de deux contributions énergétiques :

- ★ la réverbération **surfactive** due à l'interface entre l'eau et le sédiment, est liée à la rugosité de la surface et au contraste d'impédance existant entre les deux milieux.
- ★ la réverbération **volumique** due aux phénomènes conjugués de pénétration dans le sédiment et de présence d'inhomogénéités dans celui-ci.

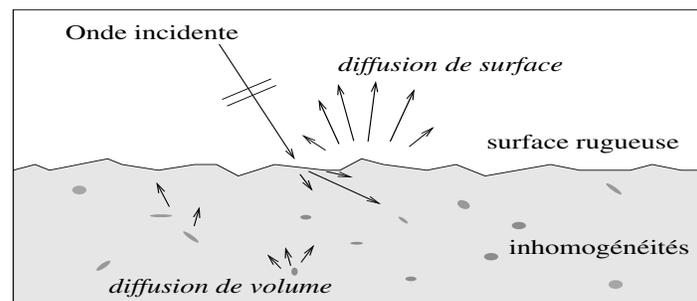
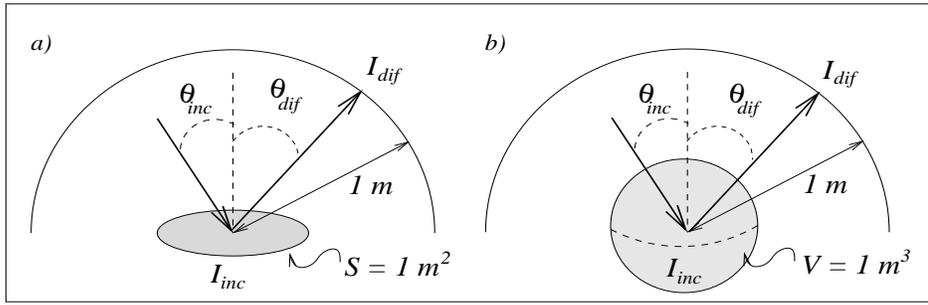


FIG. 1.11 – Diffusion de surface et de volume d'une onde acoustique par un fond marin rugueux.

L'indice de diffusion bidirectionnel permet de relier l'intensité diffusée à l'intensité incidente sur l'espace diffusant (surface ou volume). Soient  $I_{inc}$  l'intensité du champ d'ondes incidentes supposées planes dans la direction donnée par l'angle  $\theta_{inc}$ ,  $I_{dif}$  l'intensité du champ de pression diffusée par une surface ou un volume unité, à une distance de 1 mètre dans la direction donnée par  $\theta_{dif}$  (Fig. 1.12).


 FIG. 1.12 – Géométrie de la diffusion par une surface  $S$  et par un volume  $V$ .

Les indices de diffusion  $M_s$  de surface et  $M_v$  de volume sont définis par :

$$\begin{cases} M_s(\theta_{inc}, \theta_{dif}) = 10 \log_{10} (m_s(\theta_{inc}, \theta_{dif})), \\ M_v(\theta_{inc}, \theta_{dif}) = 10 \log_{10} (m_v(\theta_{inc}, \theta_{dif})). \end{cases} \quad (1.14)$$

où  $m_s$  et  $m_v$  sont les **coefficients de diffusion** d'interface et de volume, grandeurs homogènes à une section efficace. En respectant les conditions de champ lointain<sup>7</sup>, l'expression du champ de pression diffusé  $I^s$  (resp.  $I^v$ ) à une distance  $R$  d'une surface diffusante  $S$  (resp. d'un volume  $V$ ) s'exprime de la façon suivante ([Bre 91]) :

$$\begin{cases} I_{dif}^s = \frac{I_{inc} \cdot m_s(\theta_{inc}, \theta_{dif})}{R^2}, \\ I_{dif}^v = \frac{I_{inc} \cdot m_v(\theta_{inc}, \theta_{dif})}{R^2}. \end{cases} \quad (1.15)$$

Les systèmes sonars actifs enregistrent les réponses acoustiques provenant de la direction se confondant avec la direction d'émission (i.e  $\theta_{dif} = \theta_{inc} = \theta$ ) ; les indices de réverbérations deviennent alors **indices de rétrodiffusion**  $BS(\theta)$ . Dans le cadre de cette thèse, les systèmes

sonars utilisés sont incapable de séparer les deux types de contributions. L'information enregistrée est alors un indice global de rétrodiffusion :

$$BS(\theta) = 10 \cdot \log_{10} [m_s(\theta) + m_v(\theta)]. \quad (1.16)$$

Cet indice représente le seul lien entre la mesure d'énergie acoustique et les paramètres géoacoustiques des fonds. Ainsi la compréhension de ce processus est indispensable pour toute étude de caractérisation des fonds marins.

### 1.3.2 Constatations expérimentales et état de l'art des modélisations

Depuis Urick en 1954, qui présenta des mesures de diffusion par des sédiments marins, de très nombreuses campagnes de mesure de l'indice de rétrodiffusion ont été menées dans l'optique de mieux comprendre le phénomène. Ces différentes études ont montré qu'il dépend de la fréquence de l'onde incidente, de son angle et des propriétés locales du sédiment (paramètres géoacoustiques et de surface).

<sup>7</sup> $R \gg \frac{l^2}{\lambda}$ ,  $l$  étant la dimension linéaire moyenne de la cible diffusante. Cette condition assure l'hypothèse d'ondes planes.

La dépendance angulaire de l'indice de rétrodiffusion est globalement bien connue (Fig. 1.13). Trois régimes peuvent être distingués. Pour les faibles incidences, l'indice de rétrodiffusion est dominé par la réflexion spéculaire et caractérisé par une décroissance marquée. L'indice montre une décroissance angulaire très lente dont les caractéristiques sont dominées par le micro-relief et le volume sédimentaire. Enfin, pour les fortes incidences, l'indice s'effondre. Ce comportement général varie suivant les types de fonds ce qui fait de l'indice de rétrodiffusion un paramètre important de discrimination. Les limites de celui-ci ont été révélées par les mesures expérimentales. En effet, à l'intérieur d'une même classe de fond, les niveaux des réponses sont très variables à cause de la grande diversité des configurations sédimentaires.

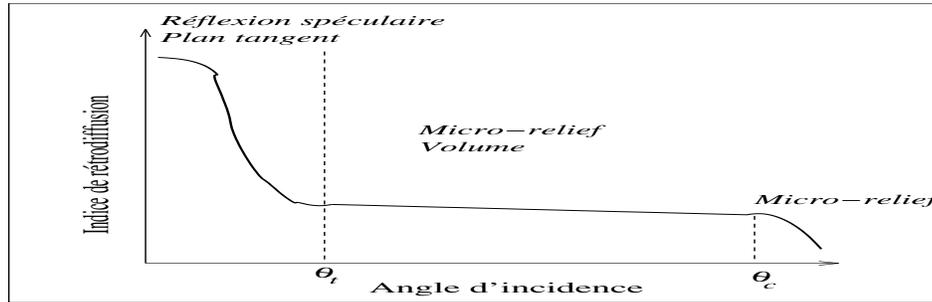


FIG. 1.13 – Comportement angulaire typique de l'indice de rétrodiffusion.

En outre, de nombreuses lois empiriques ont été proposées pour modéliser le comportement des données. Une loi purement mathématique s'adaptant idéalement aux données sans interprétation physique, est utile en fonction des applications. Dans le reste de ce document, nous aurons recours à un modèle composé des fonctions suivantes :

- ★ une fonction gaussienne décrivant les angles d'incidence spéculaire (proche de la verticale) ; elle est paramétrée par le niveau maximum  $A$  en incidence verticale et la largeur angulaire  $\alpha$  du lobe gaussien ;
- ★ une fonction de type  $\beta$ -Lambert pour les angles rasants dont les paramètres sont le niveau en incidence verticale  $B$  et l'exposant  $\beta$  d'une loi en cosinus ;
- ★ une seconde loi gaussienne permettant de lier les deux contributions pour les angles intermédiaires, est ajoutée de manière à tenir compte de décroissance angulaire moins rapide rencontrée pour certains types de fonds.

Ainsi, l'expression totale de cette loi est :

$$BS(\theta) = 10 \log_{10} \left[ Ae^{-\alpha\theta^2} + B \cos^\beta(\theta) + Ce^{-\chi\theta^2} \right] \quad (1.17)$$

où les couples  $(A, \alpha)$ ,  $(B, \beta)$  et  $(C, \chi)$  sont des constantes.  $A$  représente l'intensité de la rétrodiffusion spéculaire ( $\theta = 0$ ) ;  $B$  est la valeur du palier

Parallèlement à ces études expérimentales, de nombreux travaux ont porté sur la modélisation de la rétrodiffusion d'ondes par des surfaces rugueuses afin de paramétrer les sédiments en fonction de caractéristiques géoacoustiques.

Deux approches existent dans la littérature. L'approche classique décrit un modèle hybride se basant, en fonction du domaine angulaire, sur les théories classiques de l'acoustique (modèle des petites perturbations et approximation de Kirchhoff). Une nouvelle approche, la méthode des faibles pentes (Small Slope Approximation, SSA) relie le champ acoustique diffusé par un

milieu inhomogène au champ incident grâce à la théorie introduite par Voronovich ([Vor 94]). Alors que l’approche classique décompose un modèle de spectre de rugosité en deux échelles pour utiliser deux théories, l’approche des faibles pentes permet de traiter le cas de surfaces sans restriction sur leur spectre de rugosité et de fournir une réponse exacte sur tout le domaine angulaire. Ce modèle est basé sur la théorie des matrices T reliant un champ diffusé par un milieu inhomogène au champ incident ([Vor 94]). Les derniers développements ont permis de factoriser l’expression de cette matrice par un produit de deux termes dépendant de deux propriétés physiques différentes ([Gra 01]). Le premier terme représente l’effet des paramètres géoacoustiques et le second dépend de la rugosité d’interface et de la fréquence. Le coefficient de rétrodiffusion est alors obtenu par un développement limité en série des matrices T, l’ordre du développement s’ajustant en fonction de la précision désirée. Thorsos a montré que cette méthode englobe à la fois l’approximation de Kirchhoff et la théorie des petites perturbations et ce au plus petit ordre de l’expansion ([Tho 98]). En outre, en développant à l’ordre 3, Thorsos ([Tho 98]) a comparé cette théorie à l’expression exacte issue de l’équation intégrale de Helmholtz-Kirchhoff du champ réverbéré. Les résultats sont en excellent accord dans les limites d’un angle de pentes de 30 degrés.

En plus du débat sur l’approche théorique de la diffusion, la modélisation des caractéristiques physiques des sédiments est un problème à part entière. En effet, étant donné la vaste gamme de sédiments présents dans la nature, tantôt les auteurs les considéreront comme fluides, tantôt comme ayant un comportement élastique ou même ayant une structure intermédiaire de matériau poreux (une phase fluide et un squelette solide). Ainsi, de multiples modèles existent basés sur le modèle de réverbération choisi (SSA ou approximation de Kirchhoff et/ou petites perturbations) puis sur la façon d’appréhender le sédiment (fluide, élastique ou poreux (théorie de Biot)).

Toutes ces modélisations sont encore dans le domaine de l’étude ; c’est pourquoi aucune pour l’instant ne permet réaliser une inversion géoacoustique précise des données. L’étape en cours consiste encore à injecter les mesures en laboratoire de paramètres géotechniques pour vérifier le lien entre les modèles et les données acoustiques.

Dans la suite, seule l’approche classique de la contribution d’interface va être développée. L’approche des faibles pentes est intéressante mais son utilisation n’est toujours pas aisée.

### 1.3.3 Contribution de l’interface

La rétrodiffusion d’une onde acoustique par une surface rugueuse est un phénomène très complexe dépendant de deux types de caractéristiques :

- ★ celles du fond (nature, rugosité de l’interface),
- ★ celles de l’onde (fréquence, angle d’incidence).

Les comportements rencontrés varient très fortement en fonction de ces paramètres et plus particulièrement suivant le rapport entre la longueur d’onde et la rugosité. Rayleigh a défini un paramètre confrontant localement la longueur d’onde avec la dimension verticale des irrégularités d’une surface aléatoire.

Soit une surface aléatoire définie par l’élévation autour de la surface plane  $\zeta(\vec{r}) = \zeta(x, y)$ , son écart-type  $\sigma_s$  et une onde acoustique plane provenant de la direction donnée par  $\theta$ , caractérisée par son nombre d’onde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Le **paramètre de Rayleigh** est alors donné par :

$$\mathcal{P} = 2k\sigma_s \cos(\theta). \tag{1.18}$$

Ce paramètre caractérise la différence de phase entre les points de l'interface rugueuse (Fig. 1.14).

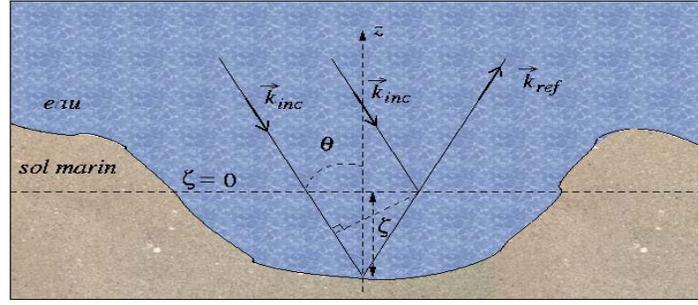


FIG. 1.14 – Géométrie utilisée pour le calcul du paramètre de Rayleigh.

Il s'obtient par le calcul de la différence de marche locale entre deux rayons ([Med 98])  $\Delta\varphi = 2k\zeta \cos(\theta)$  et permet d'évaluer le rapport entre les hauteurs de l'interface  $\sigma_s \cos(\theta)$  et la longueur d'onde et ainsi de déterminer les proportions entre ondes réfléchies spéculairement et les ondes diffusées omnidirectionnellement. Les différents régimes de diffusion dépendent de l'ordre de grandeur de  $\mathcal{P}$  :

★  $\mathcal{P} \ll 1$

La longueur d'onde est grande par rapport aux variations verticales de la surface. La rugosité provoquera une faible perturbation du champ acoustique. Les effets de diffusion à l'interface sont mineurs, la réflexion est quasi spéculaire. La différence de phase étant faible, le champ est dit cohérent. Le problème pourra alors être traité suivant la méthode des petites perturbations ([Bre 91]).

★  $\mathcal{P} \gg 1$

La rugosité est nettement supérieure à la longueur d'onde. La diffusion domine totalement le phénomène du fait de la rugosité et le champ acoustique est incohérent. Le problème est devenu celui de la diffusion géométrique et la méthode du plan tangent sera utilisée.

### 1.3.3.1 Méthode des petites perturbations - approximation de Rayleigh-Rice

Lorsque la rugosité apparente est faible devant la longueur d'onde acoustique et que les pentes sont suffisamment faibles, il est possible d'appliquer la méthode des petites perturbations.

Soit une surface aléatoire paramétrée par  $\zeta(x, y)$  telle que  $\mathbb{E}[\zeta(x, y)] = 0$ , la méthode des petites perturbations est applicable si :

- ★ la différence de phase due aux variations d'élévations est inférieure à  $2\pi$ ,
- ★ les pentes locales sont suffisamment faibles.

En d'autres termes :

$$\left\{ \begin{array}{l} |k\zeta \cos(\theta)| \ll 2\pi, \\ \left| \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right| \ll 1, \\ \left| \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right| \ll 1. \end{array} \right. \quad (1.19)$$

La notion de base de cette méthode réside dans le fait que l'interface perturbe faiblement le champ d'onde réverbéré et donc que la partie incohérente diffusée est du second ordre. Ainsi, le champ acoustique dans l'eau est défini par :

$$\begin{cases} p_t(\vec{r}) = p_o(\vec{r}) + p_s(\vec{r}), \\ p_s(\vec{r}) \ll p_o(\vec{r}), \end{cases} \quad (1.20)$$

où  $p_o$  est le champ acoustique en l'absence de perturbations et  $p_s$  le champ diffusé.

Afin d'obtenir l'expression du coefficient de rétrodiffusion, deux autres hypothèses viennent compléter le modèle :

- ★ le relief de spectre de rugosité  $W_s$ , est supposé stationnaire (cf. 1.2.3),
- ★ le point d'observation est loin de la surface par rapport à la longueur d'onde utilisée (hypothèse de Fraunhofer).

Dans le cas d'une surface parfaitement réfléchissante, le coefficient de rétrodiffusion vaut ([Bre 91]) :

$$m_s(\theta) = 4k^4 \cos^4(\theta) W_s(2k \sin(\theta)), \quad (1.21)$$

Pour une interface rugueuse séparant deux milieux fluides de célérité  $c_1$  et  $c_2$ , de densité  $\rho_1$  et  $\rho_2$ , Kuo a obtenu le coefficient de rétrodiffusion ([Kuo 64]) :

$$m_s(\theta) = 4k^4 \cos^4(\theta) F(\theta, \rho, \nu) W_s(2k \sin(\theta)), \quad (1.22)$$

$$\text{avec } \begin{cases} F(\theta, \rho, \nu) = \frac{[(\rho - 1)^2 \sin^2(\theta) + \rho^2 - \nu^{-2}]^2}{[\rho \cos(\theta) + (\nu^{-2} - \sin^2(\theta))^{1/2}]^4} & \text{pour } \theta < \theta_c, \\ F(\theta, \rho, \nu) = \frac{[(\rho - 1)^2 \sin^2(\theta) + \rho^2 - \nu^{-2}]^2}{[(1 - \rho^2) \sin^2(\theta) + \rho^2 - \nu^{-2}]^2} & \text{pour } \theta > \theta_c, \end{cases} \quad (1.23)$$

$\theta_c = \arcsin(c_1/c_2)$  étant l'angle d'incidence critique<sup>8</sup>,  $\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1}$  et  $\nu = \frac{c_2}{c_1}$ . La fonction  $F(\theta, \rho, \nu)$  quantifie la part de l'énergie transmise et réfléchi à l'interface.

### 1.3.3.2 Méthode des plans tangents - approximation de Kirchhoff

Soit une onde plane de longueur d'onde  $\lambda$ , de nombre d'onde  $k$ , diffusée par une surface aléatoire rugueuse. L'approximation de Kirchhoff est valide dans le cas où la longueur d'onde  $\lambda$  est petite devant les dimensions horizontales de rugosité de l'interface et non verticales. Cette condition peut s'exprimer de la façon suivante :

$$2k\mathcal{R} \cos(\theta) \gg 1, \quad (1.24)$$

où  $\mathcal{R}$  est le rayon de courbure local au point de diffusion. Cette hypothèse ressemble beaucoup à celle sur le paramètre de Rayleigh<sup>9</sup>. Cependant,  $\mathcal{R}$  représente les variations horizontales de l'interface. En se basant sur cette hypothèse, l'approximation de Kirchhoff reflète l'existence locale d'une réflexion de l'onde sur des **plans tangents** ([Lur 02]).

<sup>8</sup>L'angle critique est la valeur de séparation entre le palier des angles intermédiaires et la décroissance aux angles rasants.

<sup>9</sup> $\mathcal{P} \gg 1 \iff 2k\sigma \cos(\theta) \gg 1$ .

Les lois de l'acoustique géométrique ([Bru 98]) fixent le cadre de cette méthode et les conditions locales sur l'interface s'écrivent :

$$\begin{cases} p_s(\vec{r}) = R p_i(\vec{r}), \\ \frac{\partial}{\partial \vec{n}} p_s(\vec{r}) = -R \frac{\partial}{\partial \vec{n}} p_i(\vec{r}), \end{cases} \quad (1.25)$$

où  $R$  est le coefficient de réflexion,  $\vec{r}$  le vecteur source/cible et  $\vec{n}$  la normale au plan tangent. Le champ diffusé par la surface peut alors être écrit sous la forme de l'équation intégrale de Helmholtz-Huygens en fonction du champ à la surface et de la fonction de Green du problème  $G(\vec{r}, \vec{r}')$  ([Ish 78]) :

$$p(\vec{r}) = \iint_S \left[ p(\vec{r}') \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial n'} - G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial p(\vec{r}')}{\partial n'} \right] dS'. \quad (1.26)$$

En outre, l'approximation de Fraunhofer est utilisée pour compléter le calcul. Les principaux résultats suivants ont été obtenus :

Brekhovskikh et Lysanov ([Bre 91]) effectuent le calcul en supposant l'indépendance du coefficient de réflexion par rapport à  $\theta$  - ce qui est une bonne approximation pour les faibles incidences - et en utilisant la méthode de la phase stationnaire. Dans le cas d'une distribution isotrope normale des pentes de la surface, ils obtiennent l'expression suivante pour le coefficient de rétrodiffusion :

$$m_s(\theta) = \frac{R^2}{8\pi\delta_s^2 \cos^4(\theta)} \exp \left[ \frac{-\tan^2(\theta)}{2\delta_s^2} \right]; \quad (1.27)$$

où  $\delta_s$  est l'écart-type des pentes de la surface.

**Ishimaru** ([Ish 78]) effectue le calcul en séparant le coefficient de réflexion en une partie due à une surface lisse et une autre partie représentant l'effet de la rugosité. Il intègre alors l'équation (1.26) par parties et obtient le coefficient sous la forme de l'équation intégrale suivante :

$$m_s(\theta) = \left( \frac{kR}{2\pi \cos(\theta)} \right)^2 \iint [\chi_2(\nu_z, -\nu_z) - |\chi(\nu_z)|^2] e^{2ik \sin(\theta)x} dx dy; \quad (1.28)$$

$$\text{avec } \begin{cases} \nu_z = -2k \cos(\theta), \\ \chi(\nu_z) = \mathbb{E} \left[ e^{i\nu_z \zeta(x,y)} \right], \\ \chi_2(\nu_z, -\nu_z) = \mathbb{E} \left[ e^{i\nu_z [\zeta(x'+x, y'+y) - \zeta(x', y')]} \right]. \end{cases} \quad (1.29)$$

### 1.3.4 Contribution de volume

L'objet de cette partie est de présenter de façon non-exhaustive la modélisation de la rétrodiffusion de volume. Le lecteur intéressé pourra se reporter à la partie consacrée dans la thèse de Guillon ([Gui 99]).

Lorsque l'onde acoustique pénètre dans le sol marin, elle rencontre des inhomogénéités qui vont provoquer un processus de diffusion. Dans les modélisations qui suivent, les inhomogénéités représentent de petites fluctuations<sup>10</sup> des grandeurs acoustiques autour de leur valeur moyenne.

De nombreux modèles sont proposés dans la littérature, citons [Hin 90], [Bre 91], [Lyo 94] et [Jac 96]. Bien que basé sur des hypothèses différentes, leur point de départ commun est la technique des petites perturbations pour un fluide dans le cadre de l'acoustique linéaire ; les différentes expressions du coefficient de rétrodiffusion obtenues sont par conséquent très similaires. Ainsi, la forme générique de  $m_v$  peut s'écrire :

$$m_v \propto k_s^4 W_v(2k_s \vec{e}_i) . \tag{1.30}$$

où  $k_s = \omega/c_s$  est le nombre d'onde relatif à la propagation acoustique dans le sédiment et  $\vec{e}_i = \vec{x}/r$  est le vecteur unitaire de propagation (direction  $\vec{x}$ , distance  $r$ ). Les différences choisies entre les modèles proviennent essentiellement des paramètres acoustiques choisis pour mener le calcul d'une part et d'autre part, de la forme du spectre des inhomogénéités de volume,  $W_v$ .

### 1.3.5 Application aux systèmes sonars - Modèle de Jackson

Les systèmes sonars "éclairent" la scène sur un très large secteur angulaire (cf. chapitre 2) et exploitent la réponse du fond provenant de la direction d'émission. Le paramètre de Rayleigh  $\mathcal{P}$  (Eq. 1.18) présente donc une dépendance angulaire (Fig. 1.15) mettant en évidence le fait que la rugosité apparente  $\sigma \cos(\theta)$  n'est pas stationnaire le long de la fauchée.

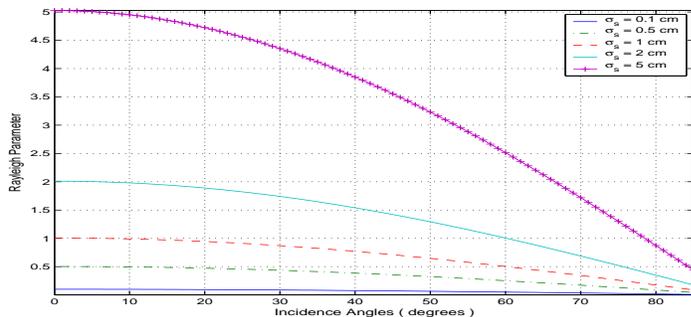


FIG. 1.15 – Evolution angulaire du paramètre de Rayleigh pour une fréquence de 100 kHz et pour différentes valeurs de  $\sigma_s$ .

Tracé (Fig. 1.15) pour des caractéristiques de surface différentes, pour une fréquence de 100 kHz<sup>11</sup>,  $\mathcal{P}$  présente des valeurs généralement supérieures à 1. Toutefois, dans le cas de surfaces peu rugueuses et pour des angles d'incidence relativement rasants,  $\mathcal{P}$  peut être inférieur à 1. Le problème se posant alors est de déterminer le domaine de validité des différentes théories tout au long de la fauchée couverte de part et d'autre du navire porteur. En étudiant les hypothèses des différents modèles, les informations suivantes peuvent être dégagées :

<sup>10</sup>Se reporter à [Gui 99] pour l'étude de grosses inclusions dans le sédiment (éclats de roches, galets,...).

<sup>11</sup>Il s'agit de la fréquence d'utilisation des systèmes décrit tout au long de cette thèse.

- ★ La première condition du modèle des petites perturbations sera satisfaite lorsque  $\mathcal{P} \ll 1$  et la figure (1.15) nous montre que ce phénomène se situera pour des angles d'incidence pas trop faibles et pour des fonds peu chahutés, ce qui confirme la seconde hypothèse de ce modèle.
- ★ L'approximation de Kirchhoff est soumise à l'existence locale de plans tangents. Dans le cas des systèmes sonars, si le fond est insonifié à la verticale du navire (nadir), l'interface est supposée être composée d'une mosaïque de plans tangents ([Lur 02]) réfléchissant l'onde incidente dans la direction spéculaire. Lorsque la direction de l'onde s'éloigne de la verticale, de moins en moins de plans tangents avec la correcte orientation seront présents. Cette constatation fixe le domaine de validité de la méthode aux angles proches de la verticale.

Les différents modèles utilisés dans l'étude de la rétrodiffusion angulaire des fonds marins reprennent ces éléments pour définir un schéma général (Fig. 1.16). Au moment où une onde acoustique rencontre l'interface rugueuse, une partie de son énergie est diffusée par le relief d'interface de la manière suivante :

- ★ aux faibles incidences, le modèle de Kirchhoff est valide car de nombreux plans tangents sont présents ;
- ★ aux incidences plus rasantes, le modèle des petites perturbations est utilisé ; la rugosité domine le processus.

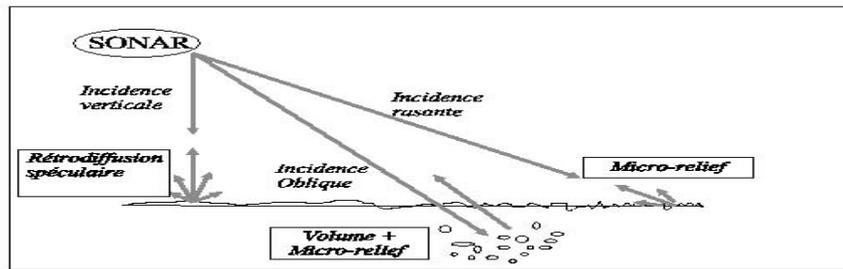


FIG. 1.16 – Processus physique provoquant la rétrodiffusion angulaire.

L'autre partie de l'énergie pénètre dans le sédiment et est rétrodiffusée par les inhomogénéités de volume. Alors que pour les faibles angles d'incidence, ce phénomène est mineur par rapport à la réflexion spéculaire, il peut devenir prédominant aux incidences obliques. Enfin, en vertu de la loi de Snell-Descartes, la pénétration est inexistante pour les incidences rasantes.

Le modèle de Jackson ([Jac 86] et [Mou 89]), valable pour la gamme de fréquence [10 – 100] kHz, rassemble toutes ces caractéristiques. Il est largement utilisé aujourd'hui dans la modélisation de la rétrodiffusion des sédiments. Dans ce modèle, le fond marin est considéré comme un volume de fluide sédimentaire semi-infini possédant une interface rugueuse. Dans ce volume, tous types de gradients ou discontinuités sont ignorés.

En outre, les auteurs prennent comme hypothèse de départ que les statistiques de la surface sont gaussiennes et isotropes et que son spectre de rugosité est de la forme :

$$W(K) = W_o K^{-\gamma}. \quad (1.31)$$

L'originalité de ce modèle réside dans le fait que le spectre de rugosité est coupé en une rugosité petite échelle et une rugosité grande échelle. Le nombre d'onde spatial de coupure

$K_c$  est alors choisi de telle manière qu'il satisfasse les hypothèses d'applications des modèles utilisés pour calculer le coefficient de rétrodiffusion angulaire. Ainsi :

★ **Pour des angles d'incidence supérieurs à  $30^\circ$ .**

Les auteurs utilisent le modèle de rugosité composée : la rétrodiffusion est due à la rugosité petite échelle mais l'angle d'incidence local est dépendant de la rugosité grande échelle. En supposant que la rugosité grande échelle est suffisamment douce (écart-type des pentes de la surface grande échelle  $\delta_{sg} < 0.1$ ), l'approximation des petites perturbations est valide et l'expression de Kuo (Eq. 1.22) est utilisée pour le calcul du coefficient de rétrodiffusion.

★ **Pour des angles d'incidence inférieurs à  $30^\circ$ .**

En supposant l'existence de plans tangents locaux (Eq. 1.24), le calcul du coefficient est effectué grâce à l'expression de Ishimaru (Eq. 1.28).

Les deux contributions sont ensuite raccordées par une fonction d'interpolation afin de fournir un coefficient unique pour la rétrodiffusion de l'interface. La contribution volumique utilisée, est issue des travaux de Stockhausen ([Sto 63]) dans laquelle Jackson *et al.* ([Jac 96]) ont incorporé un modèle physique de rétrodiffusion volumique dont l'expression est :

$$m_v = \frac{\pi}{2} k_s^4 W_v(2k_s \vec{e}_i). \quad (1.32)$$

Le spectre d'inhomogénéités qu'ils utilisent s'exprime sous la forme :

$$W_v(\vec{k}) = \frac{w_3}{h_0^{\gamma_3} (k^2 + 1/l_c^2)^{\gamma_3^2}} \quad (1.33)$$

où  $w_3$  étant la puissance spectrale,  $\gamma_3$  l'exposant spectral,  $l_c$  la longueur de corrélation et  $h_0$  une longueur de référence destinée à homogénéiser l'expression.

L'indice total de rétrodiffusion angulaire, somme de la contribution de l'interface et du volume, est alors un modèle composé d'un jeu de 6 paramètres (Tab. 1.2) décrivant :

- ★ les propriétés géoacoustiques du sédiment (célérité, densité et atténuation) ;
- ★ la surface du sédiment (exposant et force spectrale) ;
- ★ la rétrodiffusion volumique.

Symbole	Définition	Nom
$\rho$	Rapport de la densité du sédiment sur celle de l'eau de mer	Rapport de densité
$\nu$	Rapport de la vitesse du son dans le sédiment sur celle dans l'eau de mer	Rapport de célérité
$\delta$	Rapport de la partie imaginaire du nombre d'onde dans le sédiment sur sa partie réelle	Paramètre de perte
$\sigma_2$	Rapport du coefficient volumique de diffusion sur le coefficient d'atténuation dans le sédiment	paramètre de volume
$\gamma$	Exposant du spectre de rugosité de l'interface	Exposant spectral
$w_2$	Amplitude du spectre de rugosité de l'interface ( $cm^4$ ) au nombre d'onde $2\pi/\lambda = 1cm^{-1}$	Puissance spectrale

TAB. 1.2 – Paramètres décrivant un fond marin dans le modèle de Jackson. La variable  $\delta$  est liée à l'atténuation  $\beta$  dans le sédiment (en dB/ $\lambda$ ) par  $\beta = \frac{40\pi\delta}{\ln(10)}$ .

Enfin, des ajustements systématiques du modèle sur des mesures expérimentales ont été réalisés ce qui a amené à une synthèse des paramètres géoacoustiques des sédiments ([Apl 94]). Néanmoins, les auteurs mettent en garde contre l'utilisation intempestive de ces valeurs (Tab. 1.3) à cause de variations importantes de l'indice de rétrodiffusion selon le type de fond. La figure (1.17) présente l'indice de rétrodiffusion calculé par ce modèle pour l'ensemble de paramètres du tableau (1.3) et une fréquence de 100 kHz.

Sediment Name	Bulk Grain Size $M_z(\phi)$	Density Ratio $\rho$	Sound Speed Ratio $\nu$	Loss Parameter $\delta$	Attenuation (dB/ $\lambda$ ) $\alpha$	Volume Parameter $\sigma_2$	Spectral Exponent $\gamma$	Spectral Strength $w_2(cm^4)$
Rough Rock		2.5	2.5	0.01374	0.750	0.002	3.25	0.20693
Rock		2.5	2.5	0.01374	0.750	0.002	3.25	0.01862
Cobble/Gravel/Pebble		2.5	1.8	0.01374	0.750	0.002	3.25	0.016
Sandy Gravel	-1	2.492	1.337	0.01705	0.931	0.002	3.25	0.012937
Very Coarse Sand	-0.5	2.401	1.3067	0.01667	0.910	0.002	3.25	0.010573
Muddy Sandy Gravel	0	2.314	1.2778	0.0163	0.890	0.002	3.25	0.008602
Coarse Sand/Gravelly Sand	0.5	2.231	1.2503	0.01638	0.894	0.002	3.25	0.006957
Gravelly Muddy Sand	1	2.151	1.2241	0.01645	0.898	0.002	3.25	0.005587
Medium Sand	1.5	1.845	1.1782	0.01624	0.886	0.002	3.25	0.004446
Muddy Gravel	2	1.615	1.1396	0.0161	0.879	0.002	3.25	0.003498
Fine Sand/Silty Sand	2.5	1.451	1.1073	0.01602	0.874	0.002	3.25	0.002715
Muddy Sand	3	1.339	1.08	0.01728	0.943	0.002	3.25	0.00207
Very Fine Sand	3.5	1.268	1.0568	0.01875	1.023	0.002	3.25	0.001544
Clayey Sand	4	1.224	1.0364	0.02019	1.102	0.002	3.25	0.001119
Coarse Silt	4.5	1.195	1.0179	0.02158	1.178	0.002	3.25	0.000781
Sandy Silt/Gravelly Mud	5	1.169	0.9999	0.01261	0.688	0.002	3.25	0.000518
Medium Silt/Sand-silt-clay	5.5	1.149	0.9885	0.00676	0.369	0.001	3.25	0.000518
Sandy Mud	6	1.149	0.9873	0.00386	0.211	0.001	3.25	0.000518
Fine Silt/Clayey Silt	6.5	1.148	0.9861	0.00306	0.167	0.001	3.25	0.000518
Sandy Clay	7	1.147	0.9849	0.00242	0.132	0.001	3.25	0.000518
Very Fine Silt	7.5	1.147	0.9837	0.00194	0.106	0.001	3.25	0.000518
Silty Clay	8	1.146	0.9824	0.00163	0.089	0.001	3.25	0.000518
Clay	9	1.145	0.98	0.00148	0.081	0.001	3.25	0.000518

TAB. 1.3 – Paramètres d'entrée du modèle de Jackson ([Apl 94])

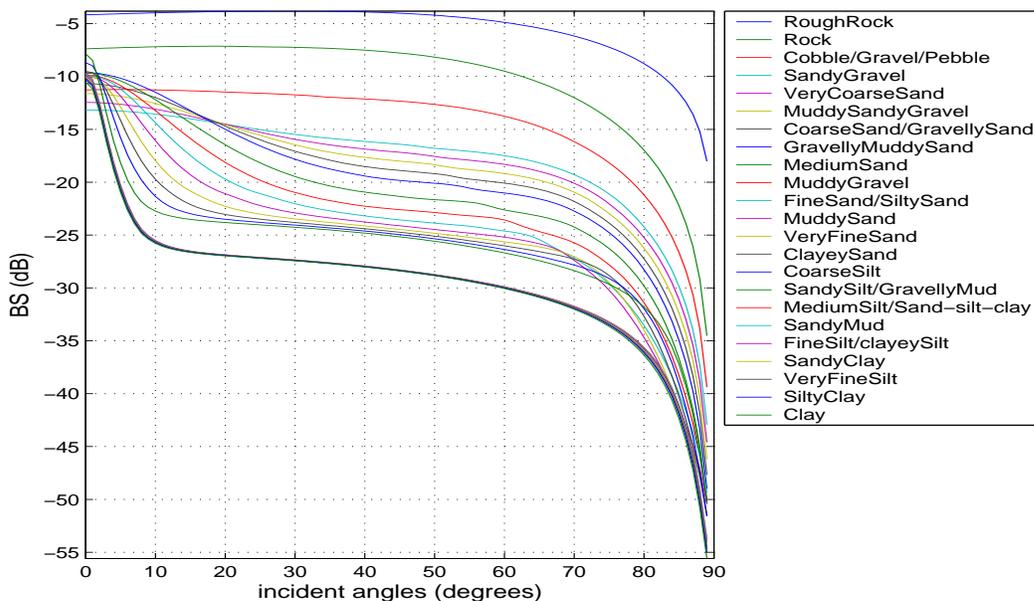


FIG. 1.17 – Indices de rétrodiffusion synthétique résultant du modèle de Jackson pour une fréquence de 100 kHz.

## 1.4 Conclusion

Les deux phénomènes de base de la caractérisation des fonds par les systèmes sonar ont été exposés : propagation et rétrodiffusion acoustique.

Il nous a été permis de découvrir en particulier que la variété géologique des fonds marins est très grande. En outre, les liens entre paramètres géologiques et acoustiques ne sont pas évidents à identifier.

Alors que les modélisations de l'indice de rétrodiffusion ont été explicitées, le chapitre suivant se propose de faire l'étude des différents systèmes sonar utilisés au cours de cette thèse.

## Chapitre 2

# Systemes acoustiques d'imagerie sous-marine

L'acoustique sous-marine s'est dotée depuis de nombreuses années de systèmes sonars exploitant la réponse acoustique des fonds marins. Au-delà de la mesure bathymétrique du relief, une fonction essentielle des sonars de cartographie est de dresser des images acoustiques de la rétrodiffusion des fonds marins (cf. chapitre 1). Ces données sont d'un intérêt majeur pour les géosciences marines car les caractéristiques acoustiques qu'elles traduisent (impédance, rugosité, ...) sont corrélées aux caractéristiques géologiques des sédiments marins.

Dans l'analyse du processus d'extraction des informations de ces images, deux types de processus physique de l'image sont à distinguer. D'une part, l'indice de rétrodiffusion, objet de notre étude, traduit les caractéristiques du fond (nature, rugosité, ...). D'autre part, les signaux enregistrés sont modulés par les caractéristiques du système d'acquisition et du milieu de propagation, perturbant une mesure absolue du pouvoir rétrodiffusant d'un fond marin.

Une procédure de correction rigoureuse est une démarche primordiale pour toute étude de caractérisation acoustique des fonds (analyse énergétique, des statistiques, des textures, estimation des paramètres de relief). Les données corrigées pourront permettre une meilleure compréhension du processus physique de rétrodiffusion et une inter-comparaison des résultats issus de différents systèmes.

Dans une première partie généraliste, les propriétés des systèmes d'imagerie acoustique sont exposées ainsi que le processus de formation de l'image. Ensuite, les deux systèmes utilisés au cours de cette thèse sont détaillés. Enfin, le processus de correction de leurs données est décrit, élaboré de manière à découpler les paramètres des fonds marins de ceux du système d'acquisition.

### 2.1 Principes de la formation de l'image acoustique

Un système acoustique d'imagerie sonar exploite dans un premier temps, la réponse d'un fond marin à une onde acoustique puis le déplacement du porteur (navire ou poisson remorqué) pour former une image. Après avoir introduit le principe et la géométrie d'acquisition, les paramètres et processus physiques importants seront exposés en mettant l'accent sur les conséquences subies par l'image.

### 2.1.1 Principe, géométrie et chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition, commune à tous les systèmes acoustiques d'imagerie commence par un générateur/amplificateur de signaux électriques appelé *transmetteur*. Un *transducteur* convertit le signal électrique en onde acoustique et l'émet dans la masse d'eau avec des caractéristiques sélectives de directivité. L'onde se propage dans le milieu puis, au contact d'un fond rugueux, est diffusée dans toutes les directions (cf. chapitre 1). A la fin du trajet retour, un transducteur directif (éventuellement le même) capte et convertit l'onde rétrodiffusée en signal électrique. Enfin, l'électronique de réception réalise alors les premiers traitements (préamplification, filtrage, numérisation) en vue du stockage des échantillons.

La répétition de ce processus, conjuguée au déplacement du porteur permettra l'empilement de lignes de pixels associées aux signaux temporels et donc la formation d'une image (Fig. 2.1). La fréquence de répétition des impulsions (FRI) est fixée de manière à émettre lorsque la réception de l'écho précédent est terminée (i.e : lorsque le niveau devient trop faible).

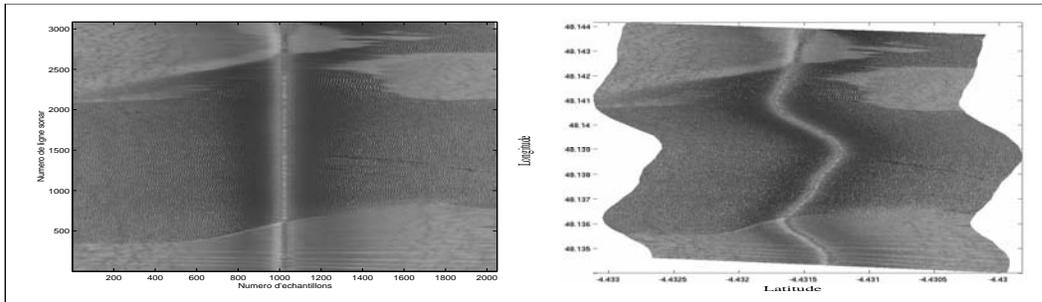


FIG. 2.1 – (Gauche) Image de lignes de pixels empilées, obtenues avec un sonar latéral sur une zone mixte (rides de sables et vase).(Droite) Mosaïque sonar (image géoréférencée).

La géométrie d'acquisition est décrite en figure (2.2). La direction de la route du navire donnée par l'axe  $(O,x)$ , est appelée **direction longitudinale**. La direction perpendiculaire, axe  $(O,y)$  sera la **direction transversale**.

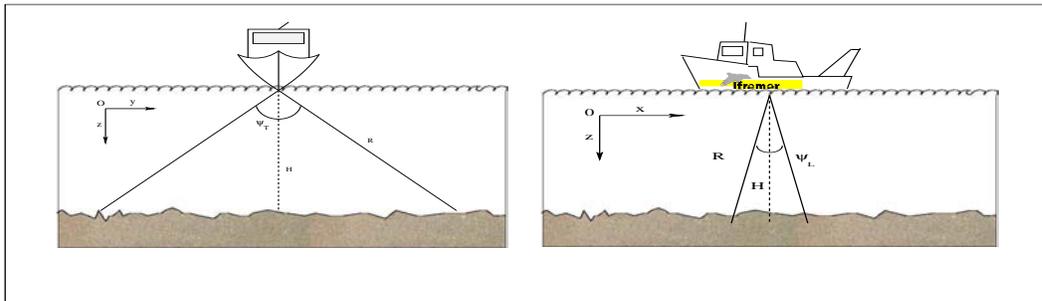


FIG. 2.2 – Géométrie de base des systèmes d'imagerie

Le navire (ou poisson remorqué) qui se déplace à la vitesse  $V$  et qui est positionné à l'altitude  $H$ , porte un système acoustique d'imagerie (sonar ou sondeur) qui insonifie le fond

de la mer selon une faible ouverture ( $\Psi_L$ ) dans le plan longitudinal et large ( $\Psi_T$ ) dans le plan transversal.

Des informations supplémentaires d'attitude (roulis, tangage, pilonnement) et de navigation (position géographique) du porteur permettent la détermination totale de la géométrie d'acquisition et ainsi de la position des échantillons enregistrés ; une mosaïque (image acoustique géoréférencée) peut alors être dressée (Fig. 2.1).

### 2.1.2 Signaux d'émission

Le transmetteur est destiné à la génération des signaux, leur amplification et l'adaptation d'impédance des transducteurs. Les puissances électriques à l'émission sont typiquement de plusieurs centaines de watts à quelques kilowatts. Les niveaux atteints à l'émission ( $NE$ ) sont en général largement supérieurs à 200 dB (ref.  $1\mu\text{Pa}$  à 1 m.), et peuvent atteindre 220 à 230 dB (ref.  $1\mu\text{Pa}$  à 1 m.).

#### 2.1.2.1 Caractéristiques du signal d'émission

La **fréquence centrale**  $f_o$  du signal émis fixe l'ordre de grandeur des **microévénements** que peut détecter avec précision le signal ; plus la fréquence sera haute, plus les événements détectés individuellement seront petits. Cet ordre de grandeur est approximativement égal à la longueur d'onde du signal  $\lambda_o = c_w/f_o$  ;  $c_w$  étant la célérité du son dans l'eau. En outre,  $f_o$  limite également la pénétration de l'onde dans le sédiment. Enfin, la fréquence impose, via l'absorption du son, la portée du système sonar.

La **résolution temporelle**  $\tau$  d'un signal traduit la possibilité pour ce signal de séparer deux événements successifs : elle est égale à l'intervalle de temps minimal mesurable par le signal. La **résolution spatiale** associée traduit la possibilité pour le système de discriminer deux cibles spatialement et est reliée à la résolution temporelle par  $\Delta_L = c_w\tau/2$ .

La fréquence centrale, les résolutions spatiales et temporelles sont les caractéristiques importantes pour l'image résultante. Les systèmes sonars utilisés dans le cadre de cette thèse utilisent des signaux de fréquence centrale  $f_o \approx 100$  kHz. Ainsi, l'ordre de grandeur des événements individuellement détectés est de 1.5 cm. La pénétration est bien sûr dépendante de la nature sédimentaire mais pour cette fréquence centrale, est limitée aux premiers centimètres ([Pou 92]).

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

- ★ l'impulsion bande étroite (ou *burst*),
- ★ le signal modulé linéairement en fréquence (ou *chirp*).

#### 2.1.2.2 Impulsion bande étroite (*burst*)

Ce type de signal est le plus couramment utilisé du fait de sa simplicité de génération et de traitement en réception. Il s'agit d'une sinusoïde d'amplitude constante  $A$ , de fréquence centrale  $f_o$ , de durée  $\tau$  et de spectre  $S$  :

$$\begin{cases} s(t) = A \cdot \sin(2\pi f_o t); & \text{pour } -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2}; \\ S(f) = \frac{Ai\tau}{2} [\text{sinc}((f + f_o)\tau) - \text{sinc}((f - f_o)\tau)]; & \text{où } \text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \text{ et } i^2 = -1; \end{cases} \quad (2.1)$$

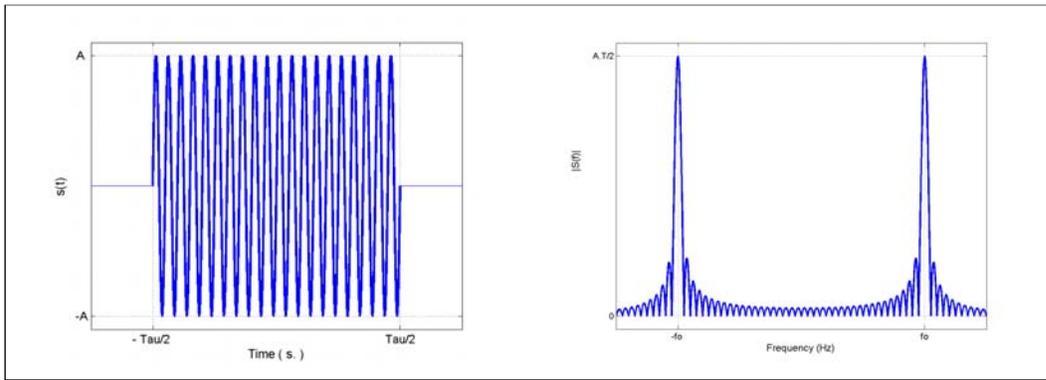


FIG. 2.3 – Impulsion bande étroite dans le domaine temporel (*gauche*) et fréquentiel (*droite*).

La largeur (à -3 dB) de la bande fréquentielle est couramment approchée par l'inverse de la durée du signal  $B \approx 1/\tau$ . La résolution spatiale associée à ce type de signaux est alors :

$$\Delta_L = \frac{c_w \tau}{2} \approx \frac{c_w}{2B}. \quad (2.2)$$

Le récepteur utilisé pour ce type de signal consiste classiquement en ([Lur 02]) :

- ★ un filtre passe bande correspondant autant que possible au spectre du signal,
- ★ une quadrature du signal filtré
- ★ une intégration de durée  $\tau$  adaptée à la durée du signal.

Le principe du traitement consiste donc en une détection de l'énergie présente dans la bande et la durée du signal ; on parle de traitement non-cohérent.

L'intérêt principal de ce type de signal est sa simplicité en émission et en traitement, associée à des bonnes performances. Ils nécessitent des rapports signal sur bruit assez élevés, donc d'émettre des niveaux instantanés importants.

### 2.1.2.3 Signal modulé linéairement en fréquence (*chirp*)

Le *chirp* est une sinusoïde dont la fréquence instantanée varie linéairement avec le temps :

$$s(t) = A \sin \left[ 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} m t^2 \right] \quad \text{pour} \quad -T/2 \leq t \leq T/2; \quad (2.3)$$

où  $A$  est l'amplitude du signal,  $f_0$  sa fréquence centrale et  $T$  sa durée.

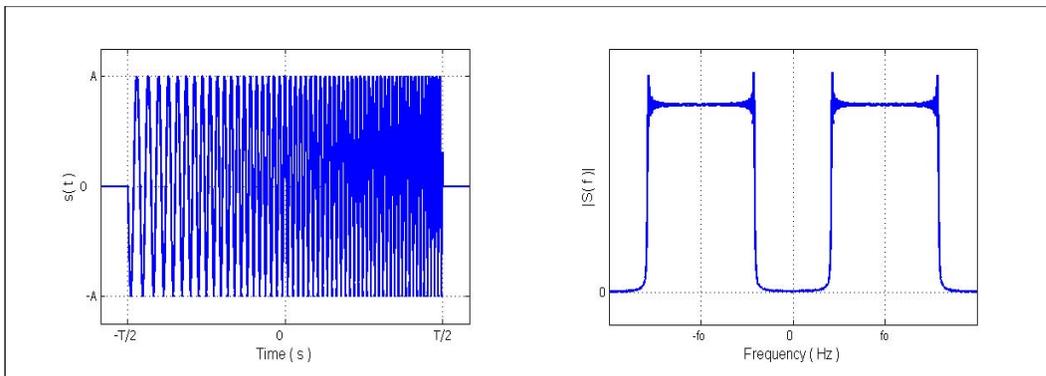


FIG. 2.4 – Chirp dans le domaine temporel (*gauche*) et fréquentiel (*droite*).

La fréquence varie de  $f_o - mT/2$  à  $f_o + mT/2$ , soit une largeur de bande  $B = mT$ . Ce type de signal est traité en réception par un procédé de *compression d'impulsion* (i.e : par corrélation du signal reçu  $x(t)$  avec une copie du signal émis  $s(t)$ ).

$$\begin{cases} y(t) = \int_0^T x(t')s(t' - t)dt'; \\ z(t) = |y(t)|^2. \end{cases} \quad (2.4)$$

Ce procédé permet de concentrer l'énergie du signal sur une durée  $\tau$  alors qu'elle s'étalait sur une durée  $T$  ; la résolution est ainsi améliorée, alors que le gain de rapport signal à bruit est égal au produit  $B.T$ .

Le choix d'un type de signal résulte d'un compromis entre rapport signal à bruit de bonne qualité et simplicité de mise en œuvre. L'utilisation du chirp devient impérative quand un rapport signal sur bruit élevé est requis au détriment d'une complexité de traitement importante. L'emploi du burst est justifié dans les cas contraires.

### 2.1.3 Transducteurs et antennes

Les **transducteurs** électroacoustiques sous-marins sont indispensables pour l'émission comme pour la réception des signaux acoustiques transmis dans l'eau : ils effectuent la transformation d'énergie électrique en énergie acoustique, ou l'inverse.

Les transducteurs sont généralement constitués de matériaux piézoélectriques permettant de générer ou de détecter une onde acoustique. Un champ électrique appliqué à ces matériaux permet de leur imposer des déformations dont les modulations reproduisent celles du champ excitateur ; ces déformations génèrent une onde acoustique se propageant dans le milieu. L'effet inverse est exploité pour la réception.

L'**antenne** est généralement un groupement de transducteurs élémentaires dont les signaux individuels sont combinés mais peut aussi être constituée d'un seul transducteur directif (de dimension caractéristique grande devant la longueur d'onde du signal).

En dehors de la qualité de conversion électroacoustique, la caractéristique principale des antennes réside dans leurs directivités. En émission, la directivité permet d'augmenter la pression acoustique locale dans un secteur angulaire privilégié. En réception, la directivité permet l'augmentation du rapport signal sur bruit et sélectionne certaines directions privilégiées du signal (permettant notamment de s'affranchir des trajets multiples).

Dans le domaine des sonars, la conception des antennes est contrainte par l'obtention d'une directivité très large dans le plan transversal (de manière à insonifier le maximum de fond) et très fine dans le plan longitudinal (la résolution étant alors nettement améliorée).

Dans le cas d'antennes formées d'un ensemble de transducteurs élémentaires, il est possible de pointer le lobe principal de l'antenne dans une direction choisie sans mouvement mécanique. Ce processus, nommé **formations de voies**, permet de d'améliorer la directivité et ainsi de s'affranchir des bruits provenant de direction non choisie et est, en pratique, réalisé soit par sommation cohérente des *staves*, soit par transformée de Fourier ([Lur 02]).

Les systèmes varient selon le nombre d'antennes utilisées. De nombreuses configurations sont possibles (utilisation de la même antenne en émission et en réception, une antenne différente en émission et en réception ou une antenne en émission et plusieurs en réception pour une mesure bathymétrique par interférométrie).

Les caractéristiques importantes pour la formation de l'image et la correction des données sont :

- ★ l'efficacité à l'émission ( $SV$ ) et en réception ( $SH$ ) expriment la qualité de la conversion électroacoustique ;
- ★ les fonctions de directivités ( $FD$ ) exprimant la répartition spatiale de l'énergie émise ou reçue par l'antenne ;

### 2.1.4 Propagation dans la masse d'eau

À l'issue des phases de génération et d'émission, l'onde subit plusieurs phénomènes au cours de la propagation dans la masse d'eau (cf. chapitre 1, section 1.1.2). Leurs principes sont rappelés par la suite car ils prennent part au processus de correction des données.

Le premier phénomène auquel sont soumises les ondes acoustiques lors de leur propagation est une diminution d'intensité correspondant d'une part à un étalement géométrique (effet de divergence) et d'autre part à l'absorption par le milieu de propagation lui-même. Cette perte de propagation est un paramètre capital du fonctionnement d'un système acoustique, puisqu'elle va conditionner l'amplitude du signal reçu, donc les performances du traitement en réception qui dépendent directement du rapport signal à bruit. Enfin, du fait de l'hétérogénéité spatiale du milieu de propagation (milieu de couches de célérités différentes), la trajectoire des ondes sonores est modifiée.

#### 2.1.4.1 Pertes par divergence sphérique

La propagation d'une onde acoustique sphérique depuis une source sonore correspond à un étalement de l'énergie acoustique émise sur une surface de plus en plus importante, et donc à une diminution d'intensité proportionnellement à cette surface. Dans le cas des systèmes sonar, en supposant que la source est située à une distance suffisamment éloignée de l'observation (hypothèse de champ lointain), la perte de transmission ( $PT_{div}$ ) par *divergence sphérique* en dB est donnée par :

$$PT_{div} = 20. \log_{10}(R/R_1), \quad (2.5)$$

où  $R$  est la distance source/cible et  $R_1$  est la distance de référence de 1 mètre.

Dans le cas où l'hypothèse de champ lointain ne serait pas garantie, l'approximation (2.5) doit être remplacée par le calcul exact du champ de pression ([Med 98] et section (2.4.3.2.1).

#### 2.1.4.2 Pertes par amortissement

Le milieu de propagation (l'eau de mer) est dissipatif, et absorbe une partie de l'onde émise, qui est dissipée par frottement ou par réaction chimique. Cette seconde perte par transmission, traduite par un coefficient d'amortissement  $\alpha$  (exprimé en dB/km), est due ([Fra 82a]), dans l'eau de mer, à :

- ★ la viscosité de l'eau pure,
- ★ la relaxation des molécules des sulfate de magnésium  $MgSO_4$ , autour de 100 kHz,
- ★ la relaxation des molécules d'acide borique  $B(OH)_3$  autour de 1kHz.

Le coefficient d'amortissement est décrit par le modèle de Francois et Garrison comme la somme de trois contributions exprimant les trois phénomènes de relaxation et viscosité. Le calcul de  $\alpha$  est dépendant des données de température, profondeur et salinité de l'eau de mer.

L'atténuation des ondes sonores au cours de leur propagation dans l'eau augmente très vite avec la fréquence, diminuant d'autant la portée du sondeur. Une bonne connaissance de  $\alpha$  est nécessaire à une mesure absolue de manière à calculer les pertes par amortissement :

$$PT_{abs} = \alpha.R. \quad (2.6)$$

En pratique, pour le processus de correction des données, le coefficient  $\alpha$  est obtenu à partir des mesures de température en fonction de la profondeur grâce à une sonde bathythermique (un exemple est donné en section(2.4.3.3)).

Les pertes de transmission totales sont alors :

$$PT = PT_{div} + PT_{abs} = 20.\log_{10}(R/R_1) + \alpha.R. \quad (2.7)$$

### 2.1.4.3 Modification géométrique des ondes

Les ondes acoustiques au cours de leur propagation dans la mer sont sujettes à un phénomène de courbure de leur trajectoire du fait de la réfraction du son par des couches d'eau de célérité différente. La loi de Snell-descartes appliquée à deux milieux de célérité différente permet de corriger les angles d'incidence sur le fond (cf. section 1.3) et de calculer précisément la position des échantillons enregistrés.

### 2.1.5 Impact sur le fond

Le phénomène prépondérant dans cette étude est la diffusion des ondes par une surface rugueuse et en particulier, la composante diffusée dans la même direction que l'émission. Les modélisations physiques relatant ce phénomène de rétrodiffusion ont été présentées en section (1.3). Cependant, lorsque l'onde interagit avec le fond, deux phénomènes sont à prendre en compte pour extraire de l'information.

Premièrement, l'impact de l'onde sur le fond n'est pas ponctuel mais définit une aire, appelée **cellule de résolution**. Cette aire insonifiée  $A$  est approchée par un rectangle dont les deux dimensions sont nommées **résolution longitudinale** et **transversale** des systèmes acoustiques d'imagerie. Dans le plan longitudinal (dans le sens du déplacement du porteur), la résolution longitudinale  $\Delta_L$  est donnée par l'ouverture projetée du faisceau sur le fond tandis que dans l'autre plan, la projection de la longueur équivalente du signal utilisé fixe la résolution transversale  $\Delta_T$  :

$$\begin{cases} A = \Delta_L \cdot \Delta_T, \\ \Delta_L = \Psi.R, \\ \Delta_T = \frac{c_w \tau}{2.\sin(\theta)}. \end{cases} \quad (2.8)$$

où  $c_w$  est la vitesse du son dans l'eau,  $R$  la distance oblique sonar-fond et  $\theta$  l'angle d'incidence.  $\Psi$  est la longueur longitudinale du faisceau, résultat de la combinaison des directivités en émission et en réception.

Cette aire fixée par les paramètres seuls du système d'acquisition est d'un intérêt crucial pour les statistiques de rétrodiffusion. De façon à normaliser l'indice de rétrodiffusion à une surface de 1 m<sup>2</sup>, le processus de correction va prendre en compte ce terme (cf. section 2.2). Néanmoins, cette correction ne permet pas de s'affranchir totalement des caractéristiques

d'acquisition. Le chapitre 4 montrera l'impact du nombre de diffuseurs présent dans la cellule de résolution sur les distributions statistiques.

Deuxièmement, la base de l'information dérivée des images sonars sera l'indice de rétrodiffusion angulaire pour lequel il est essentiel d'obtenir une estimation correcte de l'angle d'incidence. Les angles d'émission doivent être corrigés du relief local. Pour cela, un **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** permet de déduire les pentes locales et d'estimer les angles d'incidence (Fig. 2.5) par :

$$\theta_{inc} = \arccos\left(\frac{\vec{V} \cdot \vec{n}}{\|\vec{V}\| \cdot \|\vec{n}\|}\right), \quad (2.9)$$

où  $\vec{n}$  est le vecteur normal localement à la surface et  $\vec{V}$  est le vecteur décrivant l'arrivée de l'onde sur le fond.

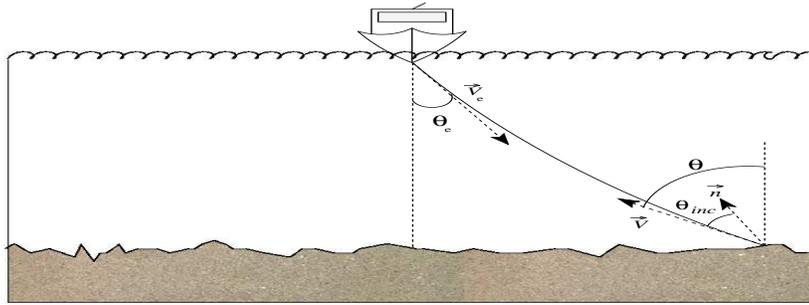


FIG. 2.5 – Géométrie pour la correction des angles d'émission.

### 2.1.6 Traitements en réception

Conjointement aux traitements exposés auparavant (compression d'impulsion, formations de voies), l'électronique de réception réalise une préamplification du signal électrique capté par les antennes, des filtrages, une réduction de la dynamique des signaux (TVG) et la numérisation des signaux. Les notions de filtrages et de numérisation sont issus des techniques classiques de traitements des signaux et ne présentent aucun intérêt pour la phase de correction des données. La loi de TVG est plus intéressante et doit être introduite.

#### 2.1.6.1 Gain variable en temps - Loi de TVG

L'amplitude d'un écho de cible dépend de la distance entre la cible et le système sonar. En sortie de traitement, on observera donc des échos dont l'amplitude sera fonction de la distance sonar-cible plutôt que de l'indice de la cible considérée. La solution généralement utilisée pour combattre cet effet est d'appliquer un gain variable en temps (TVG, Time Varying Gain) aux données acquises après amplification. Les lois implémentées dans les systèmes diffèrent selon les constructeurs mais, en général, reproduisent la décroissance due à la structure des ondes et aux propriétés du milieu de propagation (par exemple une loi en  $30 \log_{10}(R) + 2\alpha R$ ). La loi de TVG est appliquée à l'entrée de la chaîne de traitement, avant conversion du signal analogique en données numériques ; en effet ce traitement de TVG, réduisant la dynamique du signal physique, permet d'éviter de dépasser la capacité du convertisseur Analogique/Digital. Une fois les données acquises, le retour au signal physique passe donc par une inversion de la loi.

La caractérisation des fonds marins par méthodes acoustiques est basée sur l'analyse des signaux issus des systèmes sonars d'imagerie. L'exploitation quantitative des images acoustiques nécessite la connaissance détaillée du système intervenant dans la formation de l'image pour :

- ★ s'affranchir autant que possible des caractéristiques géométriques des systèmes,
- ★ pousser l'analyse des signaux rétrodiffusés.

Dans la suite, le principe de la correction des données sonar est exposé. Puis les deux systèmes d'imagerie haute fréquence (autour de 100 kHz) étudiés dans le cadre de cette thèse, sont présentés suivant leurs caractéristiques et leurs processus de correction.

## 2.2 Correction des données

Le processus de correction d'un système acoustique d'imagerie est basé sur l'équation du sonar :

$$\boxed{ER = NE - 2PT + BS + AI + SH + GT + FD}, \quad (2.10)$$

où

- ★  $ER$  : Énergie du signal en fin de chaîne d'acquisition.
- ★  $NE$  : Niveau émis par le système dans la colonne d'eau.
- ★  $PT$  : Pertes par propagation (absorption + divergence sphérique).
- ★  $BS$  : Indice de rétrodiffusion du fond.
- ★  $AI$  : Aire insonifiée ( $= 10 \log(A/1m)$ ).
- ★  $SH$  : Sensibilité des antennes en réception.
- ★  $GT$  : Gain de traitement (amplification du signal à la réception avant numérisation et loi de TVG).
- ★  $FD$  : Fonction de directivité des antennes.

L'analyse de cette équation fait apparaître les différentes étapes de la formation de l'image acoustique développées dans la partie précédente; tous les paramètres précédemment introduits sont intégrés à l'équation. En résumé, l'équation révèle trois types d'informations :

- ★ les paramètres inhérents aux systèmes d'acquisitions :  $NE$ ,  $A$ ,  $SH$ ,  $GT$ ,  $FD$ .
- ★ le paramètre  $PT$  est dû à la propagation acoustique et dépend uniquement des caractéristiques du milieu de propagation.
- ★  $BS$  est l'information caractéristique des fonds marins.

La phase de correction et d'extraction des informations est séparée en deux points :

- ★ La correction des données permet d'aboutir à une mesure précise de l'indice de rétrodiffusion si toutes les caractéristiques du système d'acquisition et du milieu de propagation sont parfaitement connues.
- ★ La détermination des angles d'incidence locaux dépend de la précision bathymétrique du MNT (cf. section 2.1.5) et (encore une fois) des caractéristiques de l'eau de mer.

Deux systèmes acoustiques ont été utilisés au cours de cette thèse. Leurs caractéristiques respectives vont être présentées par la suite puis une analyse du processus de correction adapté à chacun sera réalisée.

### 2.3 Le sondeur multifaisceau Simrad EM1000

Historiquement, la première fonction d'un sondeur multifaisceau (SMF) est de déterminer la bathymétrie d'une zone d'étude. Il se place dans l'évolution des sondeurs monofaisceaux ; au lieu d'émettre et recevoir un seul faisceau vertical, il travaille sur un éventail de faisceaux de faible ouverture angulaire individuelle disposés transversalement à la route du navire. L'intérêt est de multiplier le nombre de sondes. Mais, par ailleurs, cette configuration permet d'obtenir des échos à des incidences variées sur le fond et donc de pouvoir constituer des images de l'indice de rétrodiffusion sur de larges zones.

Le principe de fonctionnement du système, formant des voies uniquement en réception est le suivant (Fig. 2.6) :

- \* En émission, à l'image du sonar latéral, une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'antenne étroit dans le plan transversal et large dans le plan longitudinal.
- \* Le principe de réception résout le problème de filtrage spatial du sonar latéral (par un processus de formation de voies) ; le sondeur, privilégiant une direction d'écoute, rejette ainsi des échos (de surface) indésirables et effectue une première localisation des cibles dont les échos sont reçus au cours du temps.

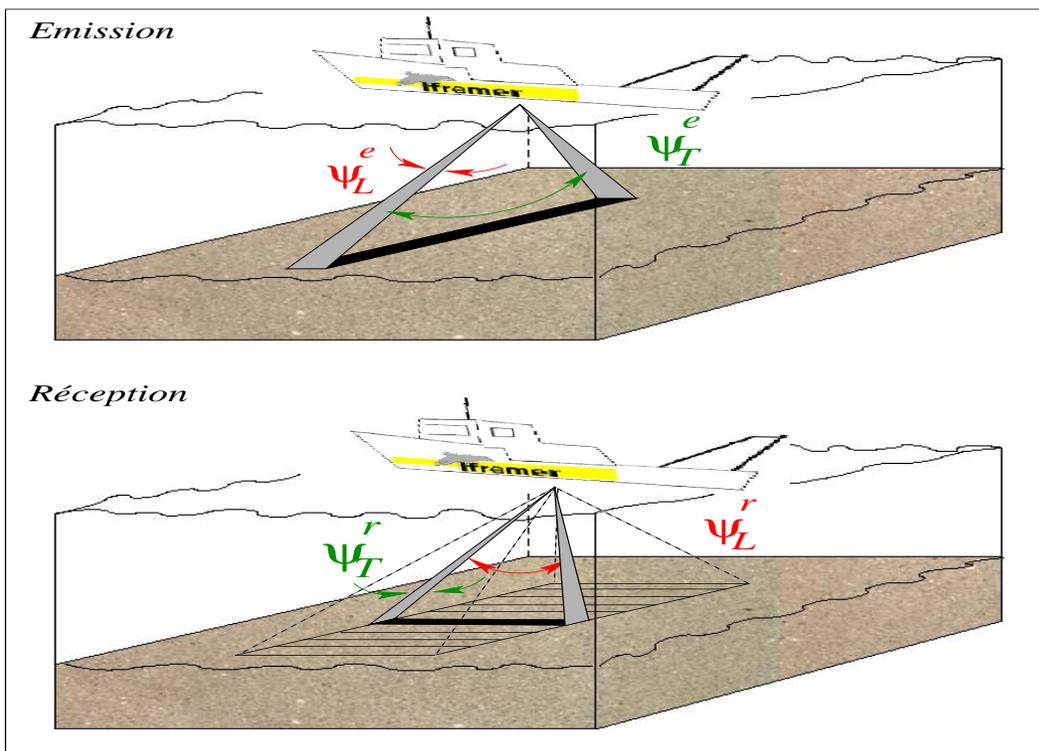


FIG. 2.6 – (*Haut*) Configuration pour l'émission d'un sondeur multifaisceau, (*bas*) pour la réception.

L'intérêt principal de ce système est donc l'obtention simultanée de la topographie détaillée et d'une imagerie acoustique de la zone d'étude. Les performances d'imagerie du SMF sont

moins bonnes que pour le sonar latéral du fait des mouvements du porteur (généralement le bateau) et de l'incidence insuffisamment rasante des signaux.

### 2.3.1 Chaîne d'acquisition et caractéristiques ([Hel 98, Sim 92])

Le sondeur multifaisceau *Simrad EM1000* possède plusieurs modes de fonctionnement permettant d'adapter les caractéristiques d'émission en fonction de la profondeur sous le bateau. Seul le mode petit fond<sup>1</sup> ("Shallow Water") sera étudié.

Le dispositif d'émission (électronique et transducteur) permet de délivrer un niveau d'émission  $NE = 224$  dB (ref.  $1\mu\text{Pa}$  à 1 m.). Le signal synthétisé est une sinusoïde fenêtrée de fréquence centrale  $f_o = 95$  kHz et de durée  $\tau = 0.2$  ms.

L'antenne, utilisée en émission-réception, forme un segment de cylindre de  $160^\circ$  (de rayon 45 cm et de hauteur 47 cm) et est constituée de 128 barreaux (*staves*) de céramiques (piézoélectriques) espacés de  $1.25^\circ$ .

En émission, le secteur couvert est de  $\Psi_T^e = 150^\circ$  dans le plan transversal et de  $\Psi_L^e = 3.3^\circ$  dans le plan longitudinal. L'émission est contrôlée pour insonifier à la verticale du porteur (navire) et ainsi compenser les variations de roulis.

Le processus de réception est composé de plusieurs étapes décrites ici :

- ★ Le signal recueilli sur chaque stave ( $SH = -190$  dB (ref.  $1\text{V}/\mu\text{Pa}$ )) est d'abord amplifié d'un facteur  $GT = 55$  dB.
- ★ Une réduction de la dynamique du signal est réalisée par la loi de *TVG* (Fig. 2.7) :

$$\begin{cases} TVG(t) = -\Lambda(t) - 20 \log_{10}[\cos(\theta(t))], \\ \Lambda(t) = -\frac{\Delta BS}{25}\theta(t) + 25, \end{cases} \quad \text{pour } |\theta(t)| \leq 25^\circ, \quad (2.11)$$

où  $\Delta BS$  est déterminé en temps réel durant l'acquisition en fonction des données des pings précédents<sup>2</sup> et  $\theta(t)$  est estimé, sous l'hypothèse d'un fond plat, par  $\cos(\theta) = 2H/Ct$ ,  $H$  étant la hauteur d'eau estimée sous le bateau.

- ★ Un processus de formation de voies (par sommation cohérente des signaux) sur les signaux élémentaires numérisés permet de diviser le plan transversal en 60 faisceaux (d'ouverture théorique  $\Psi_T^r = \Psi_L^r = 3.3^\circ$ ) pointant perpendiculairement à l'antenne vers des zones équi-espacées du fond. De plus, comme pour l'émission, une compensation du roulis du navire est réalisée.

<sup>1</sup>Les données étudiées au cours de cette thèse ont une profondeur ne dépassant pas 40 mètres (cf. annexe C).

<sup>2</sup>Cette valeur est enregistrée de manière à pouvoir déterminer la loi inverse pour la correction.

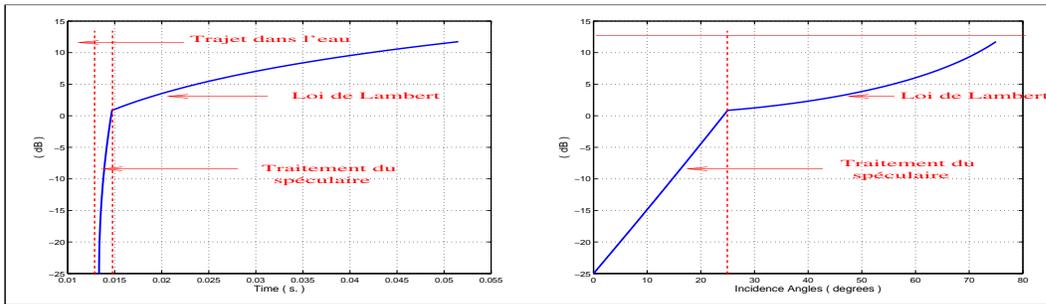


FIG. 2.7 – (*Gauche*) loi de TVG du sondeur multifaisceau EM1000. (*Droite*) loi équivalente en angle (hauteur d'eau 10 m).

Pour déterminer la bathymétrie, le sondeur se base sur deux méthodes ([Sim 92]) pour estimer le temps de parcours correspondant à l'angle visé par le faisceau. Un critère de variance permet de déterminer la meilleure estimation entre la méthode *IAM* (Instant d'Amplitude Maximale) et la méthode *IDN* (Instant de Déphasage Nul, calculée par formation de deux demi-faisceaux dans chaque faisceau). En résumé, pour les faisceaux proches du spéculaire ( $|\theta| \leq 25^\circ$ ), la précision de la méthode *IAM* est meilleure ([Lur 00]) alors que l'*IDN* est utilisé pour le reste du secteur angulaire.

Enfin, le stockage des données bathymétriques et acoustiques est réalisé ainsi que celui de toutes données complémentaires (attitude, position,...).

### 2.3.2 Correction

La méthode de correction utilisée ([Lur 97]) pour le sondeur est issue de l'inversion de l'équation du sonar (cf. annexe A). La méconnaissance des caractéristiques de directivités des faisceaux formés est éliminée par une méthode heuristique de correction des diagrammes d'émission, réception et gain de traitement. Après correction des paramètres *NE*, *SH*, *PT* et *AI*, les données représentant la réponse du fond restent modulées par les diagrammes d'émission et de réception.

L'algorithme de correction correspond alors les étapes suivantes :

- ★ ajustement des données correspondant aux centres des faisceaux, réalisé sur un modèle simple de rétrodiffusion ;
- ★ soustraction de l'ajustement à l'ensemble des données ;
- ★ modélisation de l'ensemble des faisceaux en un modèle d'antenne ;
- ★ correction de la totalité de l'image.

Une analyse complète de ce processus de correction des données est présentée en annexe (A). Les conclusions de cette étude montrent que la méthode présente d'excellentes garanties pour retrouver les niveaux absolues de rétrodiffusion hormis dans le secteur spéculaire (angles de faibles incidences). Néanmoins, ce secteur ne représente qu'une petite partie de l'image.

## 2.4 Le sonar latéral Edgetech DF1000

### 2.4.1 Principe

Un sonar latéral, généralement porté par un poisson tracté près du fond (Fig. 2.8), a pour fonction de constituer des images acoustiques détaillées des fonds marins. Un faisceau sonore étroit est émis avec une incidence rasante et intercepte le fond selon une fine bande s'évasant avec la distance. A l'intérieur de cette zone, le signal émis, très court, délimite une aire insonifiée de très faible dimension qui balaie progressivement toute la zone couverte. L'évolution temporelle de l'énergie reçue constitue une représentation de la réflectivité le long de la fauchée. L'empilement de ces signaux constitue une image acoustique.

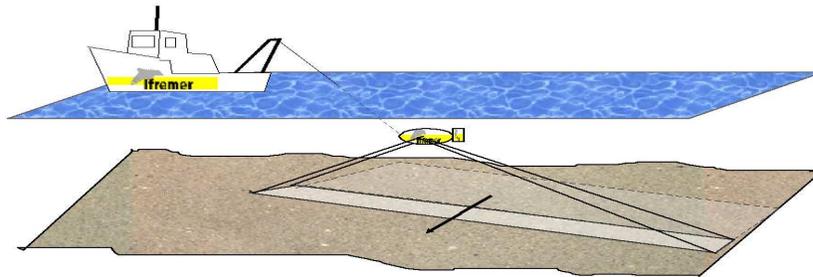


FIG. 2.8 – Configuration d'acquisition pour un sonar latéral.

La configuration d'acquisition des données du sonar latéral est plus basique que celle du sondeur multifaisceau ; en réception, le signal est simplement enregistré au cours du temps sans formation de voies. La géométrie est de ce fait plus délicate à déterminer puisqu'on ne dispose pas a priori des angles d'émission, ceux-ci étant estimés le plus souvent sous l'hypothèse d'un fond plat à partir des temps de propagation et de la hauteur estimée sous le porteur.

Cette différence de configuration explique aussi pourquoi la méthode de correction ([Lur 97]) est inapplicable telle quelle. Celle-ci suppose qu'une partie des données (les centres des faisceaux, cf. annexe A) est très peu modifiée par les diagrammes de directivité. Dans le cas du sonar latéral, la majeure partie des données est modifiée excluant un ajustement sur un modèle de rétrodiffusion.

Les principaux avantages d'un sonar latéral sont la simplicité de mise en œuvre et de traitement en réception liée à l'enregistrement temporel de chaque émission. Pourtant, contrairement aux sondeurs multifaisceau, le système est incapable de filtrer spatialement les échos (notamment ceux provenant de la surface) en dehors filtrage de directivité des antennes.

Le sonar latéral présenté ici est l'*Edgetech DF1000*. Il s'agit d'un sonar bi-fréquence (un mode "fréquence basse" autour de 100 kHz et "fréquence haute" autour de 400 kHz) destiné à fournir une imagerie haute résolution.

Cette partie décrit le sonar latéral Edgetech DF1000 utilisé en mode basse fréquence (autour de 100 kHz). Dans un premier temps, une analyse des performances du système est réalisée en s'appuyant sur les données fournies par le constructeur ainsi que sur des mesures expérimentales réalisées en bassin ([Leg 02]). Enfin, le processus de correction des données est entièrement décrit.

## 2.4.2 Caractéristiques et performances

Les différentes caractéristiques du sonar Edgetech DF1000 sont présentées par la suite de manière à déterminer tous les facteurs amenant à l'inversion de l'équation du sonar. La géométrie d'acquisition reprend les conventions exposées dans le chapitre 2.

### 2.4.2.1 Directivités et sensibilités des antennes

Dans le plan longitudinal (formé de la direction de progression du navire et de la profondeur), les ouvertures des diagrammes de directivités mesurées à -3 dB sont  $\Psi_L = 1.61^\circ$  pour la voie bâbord et  $\Psi_L = 1.57^\circ$  pour la voie tribord. Le sonar dispose de deux antennes rectangulaires basse fréquence. Le constructeur ne fournit pas la longueur  $L$  des antennes et aucune mesure de dimension n'a pu être réalisée car les transducteurs sont inaccessibles. Ainsi, il n'a pas été possible de comparer ces valeurs aux performances théoriques estimées par la formule  $\Psi_L = 51\lambda/L$ . Cependant, le constructeur annonce une ouverture dans ce plan de  $1.2^\circ$ , valeur bien inférieure aux mesures. Les mesures de directivités longitudinales des antennes basse fréquence sont représentées en figure (2.9), celle-ci révèle que les lobes secondaires sont rejetés à des valeurs comprises entre -12 dB et -14 dB.

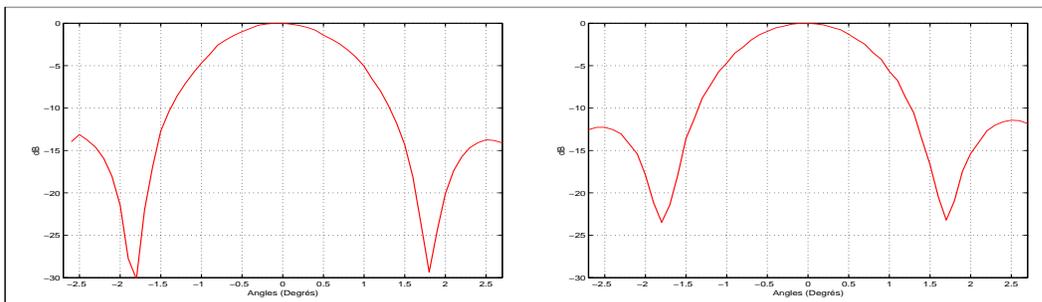


FIG. 2.9 – Directivité mesurée dans le plan longitudinal : (*Gauche*) antenne bâbord et (*Droite*) antenne tribord.

Dans le plan transversal (formé de la direction perpendiculaire au cap du navire et de la profondeur), l'ouverture est très large de manière à couvrir une bande de terrain la plus grande possible de part et d'autre du porteur. Les fonctions de directivités sont représentées en figure (2.10) en coordonnées cartésiennes et polaires. Il est à noter que l'axe de l'antenne installée sur le poisson pointe selon un angle qui peut être réglé à  $20^\circ$  sous l'horizontale ( $-70^\circ$  à bâbord,  $70^\circ$  à tribord par rapport à l'incidence verticale). L'ouverture à -3 dB résultante est à bâbord de  $\Psi_T = 58.8^\circ$  et à tribord de  $\Psi_T = 55.2^\circ$  en accord avec les spécifications constructeurs. Les niveaux des lobes secondaires sont repoussés à -35 dB.

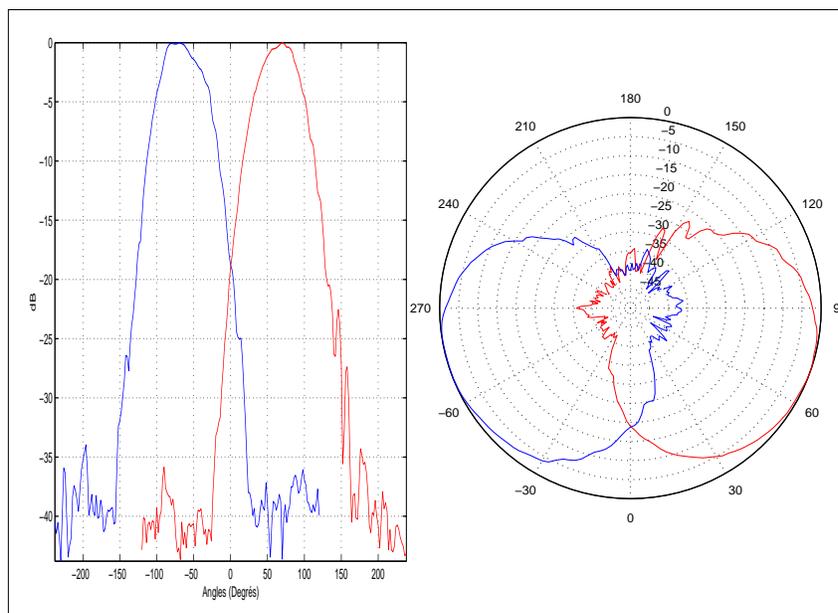


FIG. 2.10 – Directivité mesurée dans le plan transversal : (*gauche*) coordonnées cartésiennes (*droite*) polaires. Les courbes bleues représentent le diagramme bâbord et les rouges, la directivité tribord.

Des mesures de sensibilités ont été réalisées en émission comme en réception (Fig. 2.11).

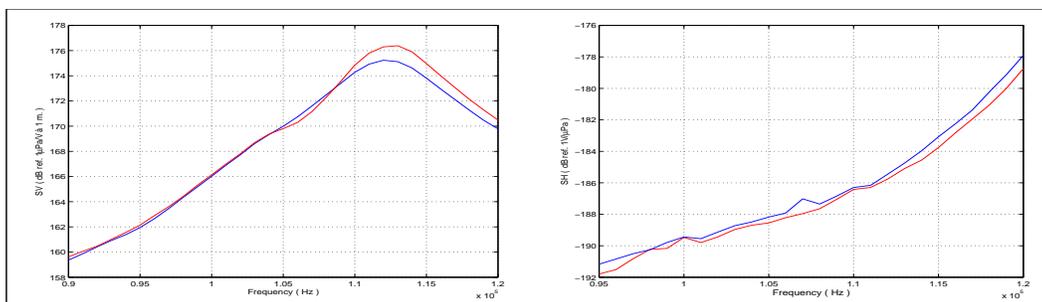


FIG. 2.11 – Sensibilité à l'émission (*SV* à gauche) et en réception (*SH* à droite) des antennes bâbord (bleu) et tribord (rouge).

La fréquence de résonance des antennes est obtenue au maximum de la courbe de *SV*. Le couple (fréquence de résonance, *SV*) vaut :

- ★ à bâbord, (112 kHz, 175.2 dB (ref.  $1\mu\text{Pa}/V$  à 1 m.))
- ★ à tribord, (113 kHz, 176.4 dB (ref.  $1\mu\text{Pa}/V$  à 1 m.))

Les sensibilités à la réception pour ces fréquences valent  $-185.8$  dB (ref.  $1V/\mu\text{Pa}$ ) à bâbord et  $-184.7$  dB (ref.  $1V/\mu\text{Pa}$ ) à tribord. La largeur de bande passante à  $-3$  dB est du côté bâbord  $9.1$  kHz et du côté tribord de  $7.7$  kHz.

### 2.4.2.2 Signal d'émission

L'électronique d'émission ne comporte pas de synthétiseur de signaux cohérents (de fréquences pures ou modulées). Une capacité fournit en se déchargeant une tension (Fig. 2.12) qui est envoyée sur les antennes qui transmettent le signal dans la masse d'eau. Le contenu spectral du signal de tension sonar présente un minimum autour de 115 kHz et deux maxima à 98 kHz et 130 kHz. La mesure des caractéristiques électroacoustiques a permis de déterminer la sensibilité des antennes à l'émission ( $SV$ ). Le niveau réel à l'émission est donné par la somme de la sensibilité d'émission  $SV$  et de l'énergie contenue dans le signal de tension. Le calcul réalisé amène à 223.4 dB (ref.  $1\mu\text{Pa}$  à 1 m.) à bâbord et 224.3 dB (ref.  $1\mu\text{Pa}$  à 1 m.) à tribord. Le constructeur fournit un niveau d'émission de  $NE = 228$  dB (ref.  $1\mu\text{Pa}$  à 1 m.) pour un signal de durée  $\tau = 0.1$  ms.

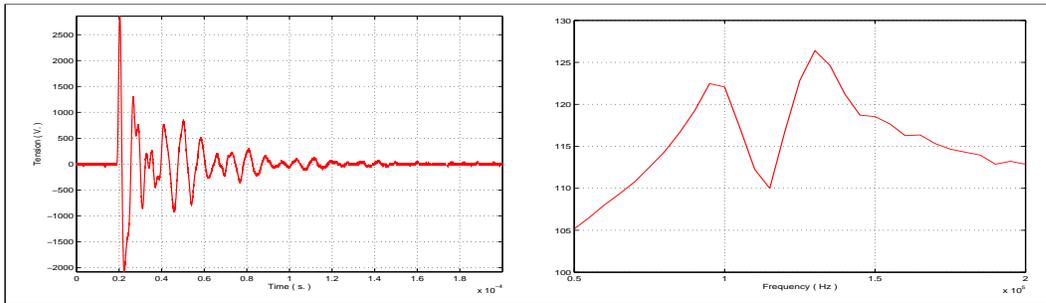


FIG. 2.12 – (*Gauche*) Tension (mesurée expérimentalement en bassin) et (*droite*) son spectre fréquentiel excitant les antennes du sonar latéral DF1000.

D'un point de vue acoustique, ce signal généré de façon non contrôlée, ne garantit pas une parfaite reproductibilité. Ce problème peut devenir extrêmement pénalisant pour la suite du processus de correction.

### 2.4.2.3 Performances et résolutions du système

Dans le plan longitudinal, la résolution du système est fixée d'une part par l'ouverture ( $\Psi_L$ ) à -3 dB de sa directivité et dépend d'autre part de la distance oblique ( $R$ ) porteur-cible :

$$\Delta_L(\theta) = \Psi_L \cdot R(\theta) = \Psi_L \cdot \frac{H}{\cos(\theta)}, \quad (2.12)$$

où  $\theta$  est l'angle d'émission et  $H$  la hauteur sous le porteur. Ainsi, la résolution sera minimale à l'aplomb du porteur et maximale dans les secteurs angulaires les plus rasants. La figure (2.13) représente l'évolution de  $\Delta_L(\theta)$  pour une hauteur de 30 m.

La résolution transversale représente la projection sur le fond de la longueur d'impulsion :

$$\Delta_T(\theta) = \frac{c_w \cdot \tau}{2 \cdot \sin \theta}, \quad (2.13)$$

où  $c_w$  est la vitesse du son dans l'eau. Au contraire de l'autre plan, la résolution sera minimale aux incidences rasantes alors qu'elle sera maximale près de la verticale du porteur. La valeur de  $\tau$  annoncée par le constructeur est 0.1 ms. Cependant, un déséquilibre entre bâbord et tribord sur les niveaux des courbes de réflectivité a amené à considérer une durée d'impulsion

$\tau$  par côté égale à l'inverse de la largeur de bande du signal (bâbord 9.1 kHz et tribord 7.7 kHz) amenant à 0.109 ms à bâbord et 0.129 ms à tribord.

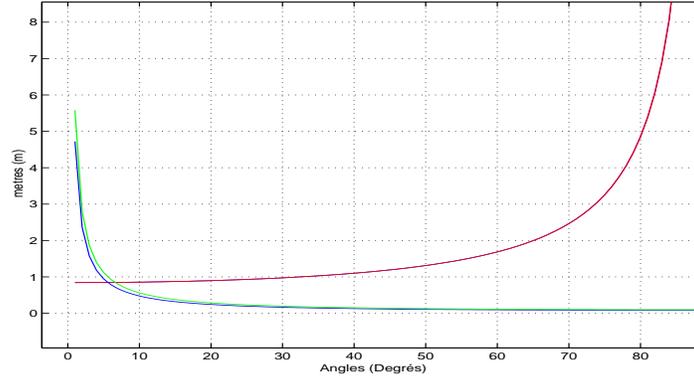


FIG. 2.13 – Résolution transversale (bleu : tribord et vert : bâbord) et longitudinale (rouge) du DF1000.

L'aire insonifiée locale, à un temps ou un angle donné, est exprimée par :

$$A(\theta(t)) \approx \Delta_T \cdot \Delta_L. \quad (2.14)$$

La sensibilité en réception  $SH$  est de  $-185.8$  dB (ref.  $1V/\mu\text{Pa}$ ) (bâbord) et  $-184.7$  dB (ref.  $1V/\mu\text{Pa}$ ) (tribord). Le signal enregistré sur les antennes est amplifié ( $GT = 45.5$  dB) puis la dynamique est réduite par une loi de TVG :  $40 \log(t) + K$  où  $K = 61.5$  dB (fourni par le constructeur) ; enfin, le signal résultant est numérisé sur 12 Bits à 24 kHz après démodulation puis stocké.

### 2.4.3 Corrections appliquées

#### 2.4.3.1 Principes et géométrie

Comme indiqué en section (2.2), le processus de correction pour un sonar latéral repose sur l'inversion de l'équation du sonar (Eq. 2.10), retranscrite ici par commodité :

$$BS(\theta) = ER - NE + 2PT(\theta) - 10 \log_{10}(AI(\theta)) - SH - GT - FD(\theta), \quad (2.15)$$

Les différents paramètres de l'équation étant connus, l'inversion menant à l'indice de rétrodiffusion angulaire  $BS(\theta)$  devient possible. Le problème de correction des données du sonar latéral réside dans l'estimation de la géométrie d'acquisition (hauteur sous le porteur, angles d'émission, angles d'incidence). La première étape du processus de correction des données sera de déterminer celle-ci sous l'hypothèse d'un fond plat.

La figure (2.14) représente un ping enregistré par le sonar.

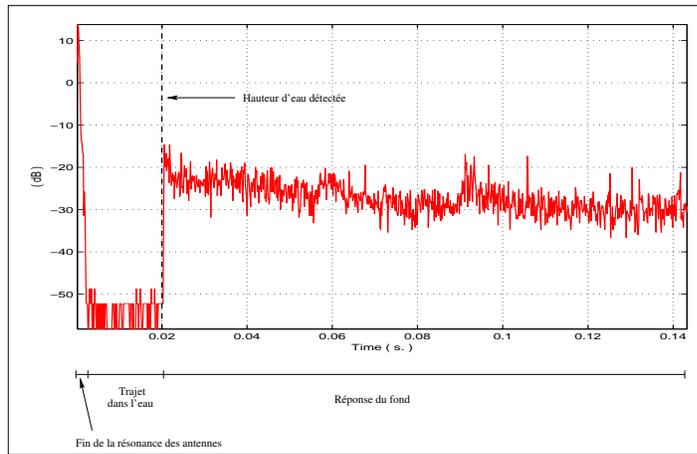


FIG. 2.14 – Signal de tension (en dB ref. 1V.) en fin de chaîne d’acquisition en fonction du temps et détection de hauteur.

Le signal de 143 ms présenté ici, peut être décomposé en trois parties. Le pic du début correspond à la fin du régime de résonance des transducteurs. Puis, le trajet dans la masse d’eau est enregistré jusqu’à ce que le fond soit atteint. L’enregistrement du trajet dans l’eau, est utilisé pour estimer le premier paramètre géométrique, la hauteur sous le porteur, grâce à un algorithme de détection de seuil (Fig. 2.14 en pointillé). Les angles d’émission sont alors calculés en tenant compte du roulis, du tangage et de la hauteur d’eau estimée. Enfin, disposant de la bathymétrie de la zone obtenue par le sondeur multifaisceau, la procédure décrite en section (2.1.5) est réalisée de manière à dériver les angles d’incidence. La géométrie est alors complètement déterminée.

La seconde étape du processus de correction est de corriger des différents traitements en réception (réduction de dynamique par *TVG*, préamplification). La loi de  $TVG(t) = 40 \log(t) + K$  où  $K = 61.5$  dB est représentée en figure (2.15). Le signal est corrigé des paramètres  $GT = 45.5$  dB,  $NE = 228$  dB (ref.  $1\mu\text{Pa}$  à 1 m.) et  $SH = -184$  dB (ref.  $1V/\mu\text{Pa}$ ). A ce stade, le niveau du signal (Fig. 2.16) représente le pouvoir rétrodiffusant du sol, modulé par les diagrammes d’antennes et sans correction de propagation.

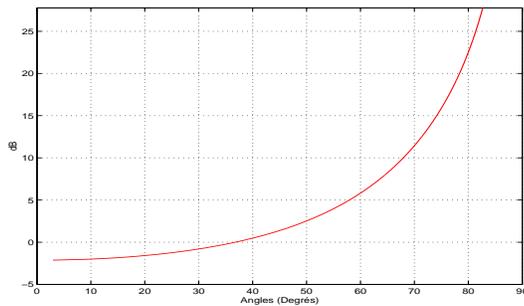


FIG. 2.15 – Loi de Gain Variable en Temps (*TVG*),  $40 \log(t) + K$ , traduite en dépendance angle .

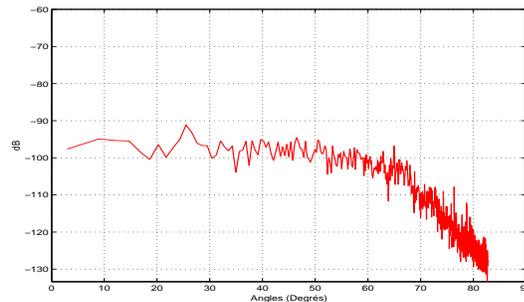


FIG. 2.16 – Signal de tension corrigé de la *TVG* et des termes *NE*, *SH* et *GT*.

La détermination des dernières variables de correction n’est pas immédiate. En particulier,

le calcul des pertes de propagation et d'aire insonifiée nécessite quelques précisions. En outre, l'exploitation des données a révélé des particularités expérimentales qui seront détaillées dans la suite.

### 2.4.3.2 Divergence sphérique et aire insonifiée

Le sonar latéral est tracté près du fond. De ce fait, il est parfois amené à travailler en champ proche. La correction des données sonar, issue de l'équation du sonar (2.15) suppose implicitement que la cible est localisée en champ lointain. Deux composantes de l'équation diffèrent lorsque les hypothèses du champ lointain ne sont plus garanties :

- ★ l'évolution de la pression en fonction de la distance  $R$  (source-cible) subit des phénomènes d'interférence et donc elle ne présente pas une décroissance exacte en  $1/R$ . La correction des pertes de propagation (divergence sphérique) est erronée.
- ★ la fonction de directivité du transducteur passe par une phase transitoire pendant laquelle le lobe principal de directivité n'est pas bien établi. L'aire insonifiée de la cible en champ proche est ainsi modifiée.

**2.4.3.2.1 Champ proche /champ lointain** La terminologie **champ proche** et **champ lointain** est utilisée pour décomposer en deux régions la manière selon laquelle un transducteur émet de l'énergie. Cette décomposition en deux régions dépend de la distance entre le point d'observation et le transducteur.

Le champ proche est la région où les contributions des différents éléments du transducteur sont déphasées les unes par rapport aux autres, provoquant un champ acoustique oscillant. Le champ lointain est la zone où la distance transducteur/point d'observation est plus grande (voire beaucoup plus grande) que la distance critique où des interférences destructives perturbent le champ acoustique.

De façon à déterminer cette distance critique minimale, appelée **distance de Fresnel**, une antenne linéaire (cas du sonar latéral Edgetech), de longueur  $L$ , transverse à la direction de propagation, est considérée et sa géométrie est représentée en figure (2.17).

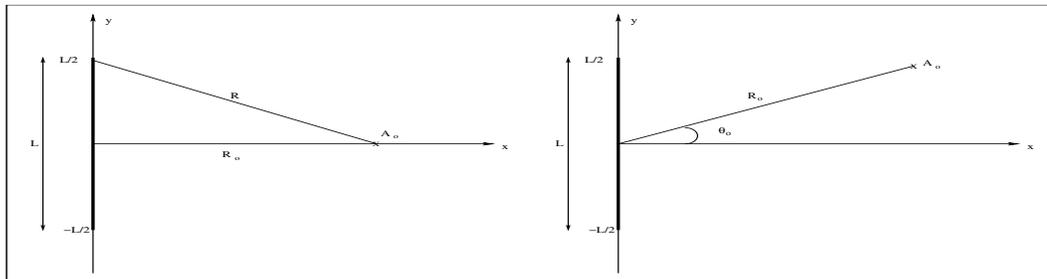


FIG. 2.17 – Configuration géométrique de l'antenne linéaire (*gauche*) pour la détermination de la distance de Fresnel (*droite*) pour la détermination du champ de pression.

La distance de Fresnel  $R_{Fresnel}$  est la distance à laquelle aucune interférence destructive n'est plus possible entre les signaux parcourant le plus long chemin (i.e issus de l'élément  $x = 0, y = \pm L/2$ ) et ceux parcourant le plus court (i.e issus de l'élément  $x = 0, y = 0$ ). En d'autres termes, le champ de pression ne peut présenter de minimum si la différence de ces deux distances est inférieure à  $\lambda/2$ .

La distance des éléments les plus éloignés jusqu'au point d'observation est alors, en utilisant une approximation au premier ordre :

$$R = \sqrt{R_o^2 + (L/2)^2} \approx R_o \left(1 + \frac{L^2}{8R_o^2}\right). \quad (2.16)$$

La condition dans ce cas est alors :

$$\Delta R = R - R_o \approx \frac{L^2}{8R_o} \leq \frac{\lambda}{2}. \quad (2.17)$$

La distance de Fresnel est alors définie par :

$$R_{Fresnel} = \frac{L^2}{4\lambda}. \quad (2.18)$$

En pratique ([Med 98]), une distance de quatre fois la distance de Fresnel est préconisée pour définir aussi sûrement que possible le champ lointain. Au-delà de cette valeur, les approximations pour le calcul des pertes par divergence sphérique (Eq. 2.5) et d'aire insonifiée (2.8) sont utilisées dans le processus de correction. Comme le sonar latéral est tracté près du fond, il rentre parfois dans le secteur du champ proche ; une expression plus précise des pertes par divergence sphérique et de l'aire insonifiée est alors nécessaire.

Dans la géométrie décrite par la figure (2.17 *droite*), la pression acoustique  $p_o$  reçue au point  $A_o$  est la somme des contributions (décrites par la solution de l'équation de propagation en onde sphérique) issues des différents éléments de l'antenne.

$$p_o = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\exp(-jkR(y))}{R(y)} dy, \quad (2.19)$$

où  $k$  est le nombre d'onde et  $R(y)$  est la distance oblique du point d'intégration  $y$  au point  $A_o$  :

$$R(y) = \sqrt{x_o^2 + (y_o - y)^2}. \quad (2.20)$$

**2.4.3.2.2 Simulation numérique** Le protocole de simulation consiste à calculer le champ de pression issu de l'antenne du sonar latéral et va servir à quantifier l'erreur de correction réalisée par les approximations classiques de champ lointain lorsque cette hypothèse est mise en défaut. Le sonar émettant des signaux bande étroite (environ 9 kHz), le calcul est tout d'abord réalisé dans une gamme de fréquence égale à la largeur de bande de l'antenne (i.e [107 – 117] kHz).

La configuration géométrique est celle de la figure (2.17 *droite*). La figure (2.18) décrit le champ de pression dans l'espace ( $0 \leq x_o \leq 20$  m et  $0 \leq y_o \leq 2$  m) à la fréquence de résonance de l'antenne (112 kHz).

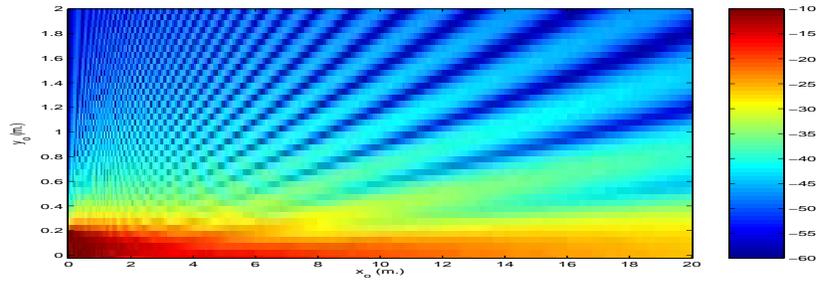


FIG. 2.18 – Champ de pression en dB ref. 1 Pa.

Du champ de pression est tirée l'évolution de la pression en fonction de la distance, celle-ci est représentée pour la gamme de fréquence [107 – 117] kHz sur la figure (2.19). La simulation effectuée représente une solution exacte du champ de pression lors de la propagation acoustique d'une onde sphérique. La comparaison de cette simulation avec l'approximation champ lointain (Fig. 2.19) révèle que :

- ★ L'approximation du champ lointain n'est valable qu'à environ quatre fois la distance de Fresnel ; au-delà, les deux solutions sont équivalentes.
- ★ Une erreur importante est réalisée quand la distance source/cible est réduite (jusqu'à 10 dB à 2 mètres).
- ★ La dépendance fréquentielle est minimale dans cette gamme de fréquence.

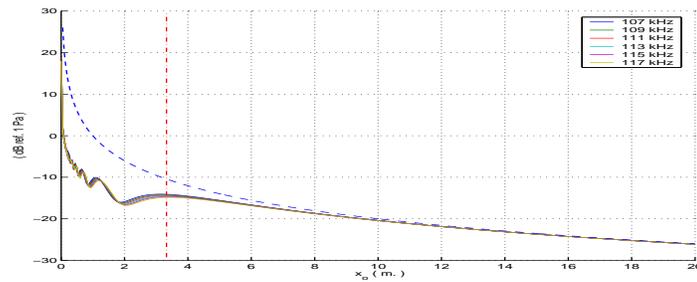


FIG. 2.19 – Évolution de la pression en fonction de la distance et de la fréquence. L'approximation champ lointain est représentée en pointillés bleus. La distance de Fresnel est représentée en rouge.

La fonction de directivité  $FD$  est déterminée par coupe du champ de pression à  $x$  fixé et l'ouverture équivalente  $\Psi$  du faisceau est estimée par la formule :

$$\Psi = \int_{-\pi}^{\pi} FD(\theta) d\theta. \quad (2.21)$$

L'évolution de l'aire insonifiée en fonction de la distance pour la gamme fréquentielle [107 – 117] kHz, est représentée sur la figure (2.20).

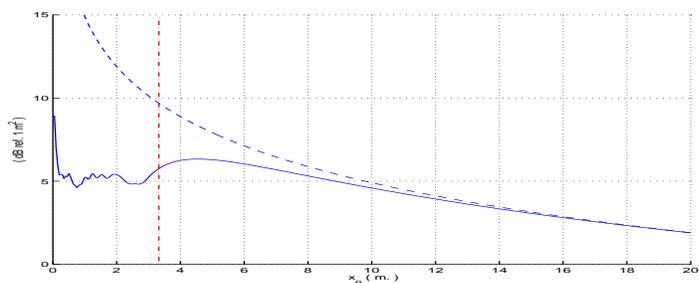


FIG. 2.20 – Évolution de l’aire insonifiée en fonction de la distance et de la fréquence. L’aire insonifiée théorique (calculée avec  $\Psi = 1.6^\circ$ ) est représentée en pointillés bleus. La distance de Fresnel est représentée en rouge.

La dépendance fréquentielle est encore une fois négligeable et la différence entre la simulation et l’approximation champ lointain est valable pour quatre fois la distance de Fresnel.

De manière à quantifier l’erreur faite pour la conjugaison des deux phénomènes, une courbe moyenne de fréquence est calculée pour chacune des contributions. Les deux termes correspondants dans l’équation du sonar ( $PT$  et  $AI$ ) de l’équation (2.15) sont opposés. L’erreur totale effectuée sur des données localisées en champ proche est le rapport (en valeur naturelle) des deux, qui est représentée en figure (2.21 gauche) en fonction de la distance. Dans le cas des sonars, il est plus pratique de montrer la dépendance angulaire de cette correction pour la comparer à l’indice de rétrodiffusion. Ceci a été réalisé pour plusieurs hauteurs du sonar ; la figure (2.21 droite) montre le résultat et représente la correction de l’indice  $BS$  de rétrodiffusion due à l’approximation du champ lointain. Le résultat montre que pour une l’altitude de fonctionnement du sonar (environ 10 mètres), une correction de 1 dB est à effectuer. Cette correction a néanmoins été implémentée dans le processus de Correction pour le calcul des pertes de propagation.

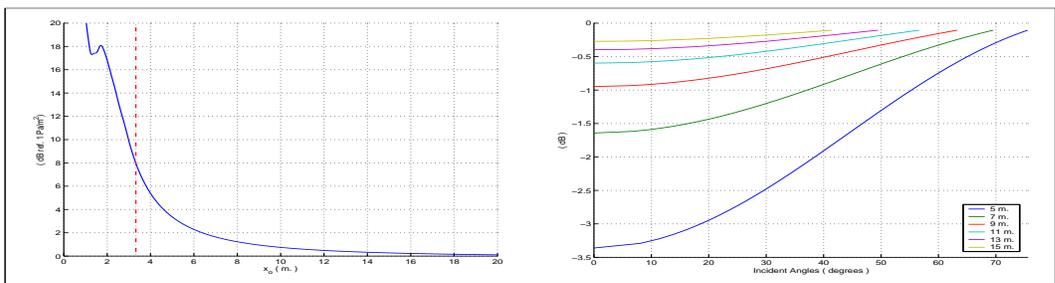


FIG. 2.21 – (Gauche) Évolution de l’erreur de correction en fonction de la distance source/cible. (Droite) Évolution de l’erreur de correction en fonction de l’angle d’émission pour plusieurs hauteurs sonar/fond.

### 2.4.3.3 Absorption

Comme indiqué dans la section (2.1.4), le coefficient d’absorption dans la masse d’eau est estimé grâce à des mesures bathythermiques *in situ*. La figure (2.22) montre d’une part les mesures de température réalisées par ce type de sonde et d’autre part les profils de célérité et d’absorption calculés à partir de ces mesures. Étant donné qu’aucune mesure de salinité

n'a été réalisée, celle-ci est supposée indépendante de la profondeur et a été fixée à 35 p.s.u. pour les calculs. La célérité a été calculée par le modèle de Chen et Millero ([Che 77a]) et l'absorption par le modèle de François et Garrison ([Fra 82a]).

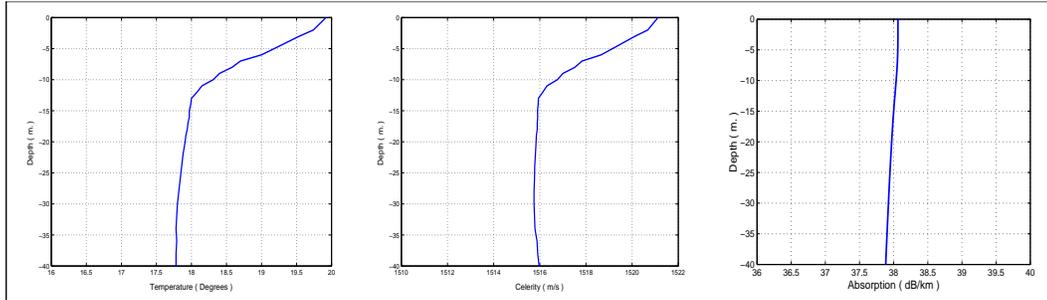


FIG. 2.22 – (*Gauche*) Exemple de mesures *in-situ* de température en fonction de la profondeur. (*Milieu*) Profils de célérité et (*droite*) d'atténuation dérivées des mesures de température (salinité = 35 p.s.u.).

#### 2.4.3.4 Changement des statistiques dû aux particularités d'acquisition

Lors de l'analyse du système d'acquisition du sonar latéral, une particularité d'acquisition s'est montrée très préjudiciable à l'exploitation quantitative. Après réception sur les antennes du sonar, les données sont numérisées à une fréquence d'échantillonnage de 24 kHz par côté (bâbord/tribord). Elles sont ensuite remontées à la surface par le câble électroporteur puis stockées par un logiciel d'acquisition sonar (Isis de Triton Elics International). Celui-ci réalise un sous-échantillonnage des données de manière à réaliser une image bien calibrée en nombre de pixels ; chaque ping sera affecté d'une valeur de pixels  $N$  par côté. Le principe est le suivant pour un ping :

- ★ Le nombre total d'échantillons numérisés est divisé par le nombre  $N$  de pixels voulu dans l'image finale. Le résultat de cette division donne un nombre  $n$  représentant le nombre d'échantillons à affecter à chaque  $N$  "bins".
- ★ Le logiciel propose deux algorithmes pour réaliser le sous-échantillonnage, c'est à dire la manière d'obtenir une seule valeur à l'intérieur d'un bin. Ces deux options sont, soit un calcul de moyenne soit la valeur maximale des échantillons. Malheureusement pour nous, durant la campagne, l'option "maximale" était sélectionnée, nettement plus préjudiciable que la moyenne pour une exploitation statistique.

Dans cette partie, une modélisation statistique de la loi du maximum des échantillons va être réalisée de manière à estimer non seulement la moyenne de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  mais aussi l'ensemble des moments statistiques (qui nous serviront plus tard).

Soient  $X_1 \dots X_n$ ,  $n$  variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées de densité de probabilité  $f_X$  et de fonction de répartition  $F_X$ . Soit  $Y = \max_{1 \leq i \leq n} (X_i)$ , la variable aléatoire de densité probabilité  $f_Y$  et de fonction de répartition  $F_Y$  que l'on désire déterminer.

Le problème est le suivant, on cherche  $F_Y(y) = \mathbb{P}[\max_{1 \leq i \leq n} (X_i) < y], \forall y \in \mathbb{R}$ . La probabilité que le maximum soit inférieur à chaque  $y$  donné n'est pas un événement indépendant des autres observations. En fait,  $Y$  sera inférieur à chaque  $y$  donné si et seulement si toutes les autres observations sont également inférieures à cette valeur  $y$ . En d'autres termes, cet argument permet de passer de l'équation (2.23) à l'équation (2.24). Enfin, l'indépendance des

variables aléatoires permet de passer de (2.24) à (2.25).

$$\forall y \in \mathbb{R}, F_Y(y) = \mathbb{P}[Y < y], \quad (2.22)$$

$$= \mathbb{P}[\max_{1 \leq i \leq n} (X_i) < y], \quad (2.23)$$

$$= \mathbb{P}[X_1 < y \cap \dots \cap X_n < y], \quad (2.24)$$

$$= \prod_{i=1}^n \mathbb{P}[X_i < y], \quad (2.25)$$

$$= \prod_{i=1}^n F_{X_i}(y). \quad (2.26)$$

Enfin,

$$\boxed{\forall y \in \mathbb{R}, F_Y(y) = [F_X(y)]^n}. \quad (2.27)$$

Nous avons établi une relation entre les fonctions de répartition; il reste désormais à établir la relation entre les densités de probabilité. Une simple dérivation le réalise :

$$f_Y(y) = F'_Y(y) = n \cdot F_X^{n-1}(y) \cdot F'_X(y) = n \cdot F_X^{n-1}(y) \cdot f_X(y). \quad (2.28)$$

Finalement, nous disposons d'une relation pour calculer la loi du maximum de  $n$  échantillons à partir de la fonction de répartition et de la densité de ces  $n$  échantillons. En pratique, ces deux données sont inconnues, il s'agit même d'un axe d'étude d'une partie de cette thèse! Les seules données disponibles sont les données du maximum. Une possibilité aurait été d'inverser l'équation (2.28) mais elle se révèle trop complexe.

Une procédure a donc été implémentée pour estimer les moments statistiques des données avant le sous-échantillonnage directement à partir des moments de la variable  $Y = \max_{1 \leq i \leq n} (X_i)$  (i.e les données disponibles).

Cette procédure s'appuie sur l'argument que la fonction de répartition transforme une variable aléatoire en loi uniforme sur  $[0,1]$ . Si  $X$  est une v.a,  $F_X(X) = U$  où  $U$  est uniformément répartie sur  $[0,1]$ .

De plus, si la fonction de répartition de  $Y$  est bijective, la relation (2.27) permet de déduire :

$$X = F_Y^{-1}(U^N). \quad (2.29)$$

où  $F_Y^{-1}$  est la fonction inverse de  $F_Y$ .

À partir de cette relation, le calcul des moments d'ordre  $k$  de la variable aléatoire  $X$  devient possible :

$$\forall k \in \mathbb{R}, \mathbb{E} [X^k] = \int_0^1 [F_Y^{-1}(u^N)]^k du, \quad (2.30)$$

$$\text{en posant } z = F_Y^{-1}(u^N) = \int_{\mathbb{R}} \frac{z^k}{n} [F_Y(z)]^{(\frac{1}{n}-1)} f_Y(z) dz, \quad (2.31)$$

$$= \frac{1}{n} \mathbb{E} [Y^k [F_Y(Y)]^{(\frac{1}{n}-1)}]. \quad (2.32)$$

En pratique, il suffit d'utiliser l'estimateur empirique de la fonction de répartition (Eq. 2.33) pour obtenir une estimation du  $k$ -ième moment de  $X$ ,  $m_X^k$  (Eq. 2.34) :

$$F_Y(y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbb{1}_{]-\infty, y]}(y_i). \quad (2.33)$$

où  $\mathbb{1}(\cdot)$  est la fonction indicatrice.

$$\hat{m}_X^k = \frac{1}{n.M} \sum_{i=1}^M \left[ y_i^k [F_Y(y_i)]^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \right]. \quad (2.34)$$

#### 2.4.3.5 Diagrammes de directivité

Les diagrammes de directivité présentés au début de ce chapitre sont des mesures réalisées en bassin ([Leg 02]). Lors de ces mesures, nous n'avions pas pris conscience que l'énergie envoyée par une antenne pouvait influencer l'autre ; c'est pourquoi les mesures ont été faites pour chaque antenne individuellement. Malheureusement, les premiers essais de correction nous ont fait envisager un problème dû à cette fonction de directivité. Pour le résoudre, deux scénarii ont été envisagés :

- ★ Une simulation numérique permet simplement de quantifier les effets de l'antenne bâbord (resp. tribord) vers la voie tribord (resp. bâbord). Le diagramme résultant sera appelé **diagramme mesuré**.
- ★ Au cours de la mission *Reflacou* (cf. annexe C), deux systèmes ont été déployés : le sonar latéral et le sondeur multifaisceau. Ce dernier a fait l'objet de nombreuses études par le passé et est désormais doté d'une procédure de correction satisfaisante dont une nouvelle vérification est donnée en annexe (A). Nous avons considéré les indices de rétrodiffusion provenant du sondeur comme la référence pour identifier le **diagramme empirique** de directivité du sonar latéral.

**2.4.3.5.1 Diagramme mesuré** Soient  $Ne_{bab}$ ,  $Sh_{bab}$  et  $Fd_{bab}(\theta)$  le niveau émis, la sensibilité en réception et la fonction de directivité angulaire de l'antenne bâbord en **amplitude** et soient  $Ne_{tri}$ ,  $Sh_{tri}$  et  $Fd_{tri}(\theta)$  les mêmes paramètres pour l'antenne tribord, l'expression de la fonction de directivité bâbord en émission/réception corrigé de l'influence de l'antenne tribord est :

$$Fd_{bab}^{cor} = \left[ Fd_{bab}(\theta).Ne_{bab} + Fd_{tri}(\theta).Ne_{tri} + Fd_{bab}(-\theta).Ne_{bab} + Fd_{tri}(-\theta).Ne_{tri} \right].Fd_{bab}(\theta).Sh_{bab}. \quad (2.35)$$

Cette expression est composée d'une somme de quatre termes d'émission multipliée par la modulation  $Fd_{bab}(\theta).Sh_{bab}$  de l'antenne bâbord en réception. Les quatre termes de la somme sont :

- ★  $Fd_{bab}(\theta).Ne_{bab}$  est la modulation classique associée à l'émission de l'antenne bâbord ;
- ★  $Fd_{tri}(\theta).Ne_{tri}$  est la modulation due à l'émission de l'antenne tribord (reçue du côté bâbord). D'une part, le signal est émis simultanément du côté bâbord et du côté tribord

et d'autre part comme la fonction de directivité de l'antenne tribord débord du côté bâbord, le signal émis à tribord contribue à l'énergie totale reçue par bâbord.

- \*  $Fd_{bab}(-\theta).Ne_{bab}$  est la modulation due à l'émission de l'antenne bâbord (émis du côté tribord, angle  $(-\theta)$ ),
- \*  $Fd_{tri}(-\theta).Ne_{tri}$  est la modulation due à l'émission de l'antenne tribord (émis du côté tribord, angle  $(-\theta)$ ).

Le sonar ne réalise pas de filtrage spatial. Le signal émis à l'angle  $-\theta$  sera reçu simultanément de l'angle  $\theta$  sans distinction.

Les paramètres  $Ne$ ,  $Sh$  et  $Fd$  (bâbord et tribord) sont déterminés à la fréquence de résonance de chaque antenne. Il résulte de cette influence d'une antenne par rapport à l'autre, une augmentation de l'énergie reçue et une modification du diagramme de directivité (Fig. 2.23 gauche). La figure (2.23 droite) montre la différence entre les deux anciens diagrammes bâbord/tribord et les nouveaux ; celle-ci est non négligeable au niveau du spéculaire puisqu'elle atteint presque 5 dB aux faibles angles d'incidence.

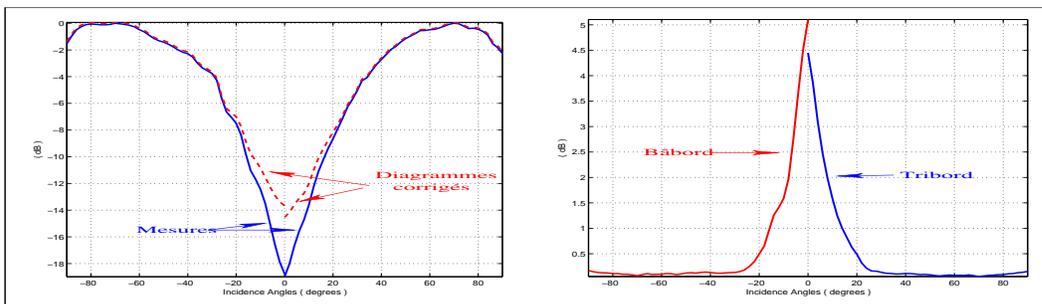


FIG. 2.23 – (Gauche) Diagrammes de directivité bâbord et tribord et diagrammes corrigés (pointillés). (Droite) Différence entre les diagrammes mesurés et corrigés ; bâbord (rouge) et tribord (bleu).

**2.4.3.5.2 Diagramme empirique** La procédure d'estimation nécessite plusieurs étapes. Il s'agit tout d'abord de choisir des zones homogènes de référence où les deux systèmes ont été mis en œuvre. Trois fonds (vase, sable fin, sable grossier) répondent aux conditions d'homogénéité (bathymétrie plate et sédiment homogène). Du côté du sondeur multifaisceau, un modèle empirique de rétrodiffusion (cf. section 1.3.2) est ajusté sur les données de rétrodiffusion enregistrées. Du côté du sonar latéral, toutes les corrections sont effectuées à part la correction de directivité  $FD$ . Les données résultantes représentent alors l'indice de rétrodiffusion du fond modulé par le diagramme de directivité (deux fois à cause de l'émission et de la réception) du sonar.

Le principe de la méthode est de soustraire la réponse du fond obtenue par l'EM1000 aux données modulées du sonar latéral de façon à obtenir un diagramme de directivité empirique. L'hypothèse est alors que l'indice de rétrodiffusion enregistré par le sonar est le même que pour le sondeur multifaisceau.

De nombreuses études ont fait état d'une dépendance fréquentielle de l'indice de rétrodiffusion. Le modèle de Jackson (cf. 1.3) est valide dans la gamme fréquentielle [10 – 100] kHz. La figure (2.24) montre les différences de l'indice de rétrodiffusion calculé à la fréquence du sondeur (95 kHz) et à celle du sonar (112 kHz) et pour différents types de fonds. Cette différence n'excède pas 1 dB, valeur tout à fait acceptable pour notre application.

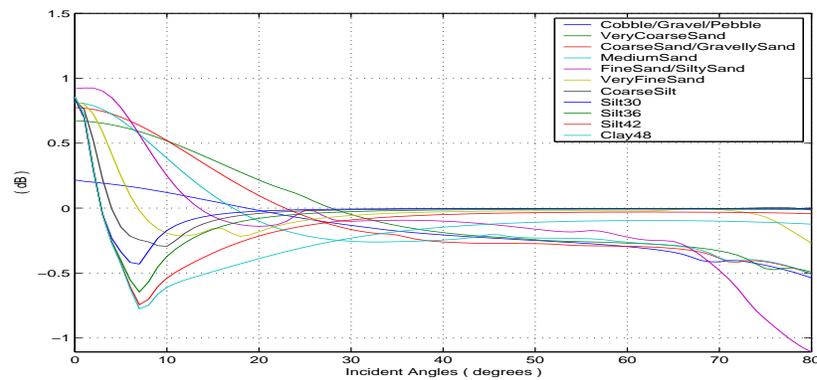


FIG. 2.24 – Différence entre l'indice de rétrodiffusion de Jackson calculé pour 95 kHz et 112 kHz, en fonction de l'angle d'incidence et pour différents types de fonds.

L'hypothèse est ainsi entièrement justifiée et les résultats pour les trois fonds sont représentés sur la figure (2.25) et comparés avec le diagramme mesuré.

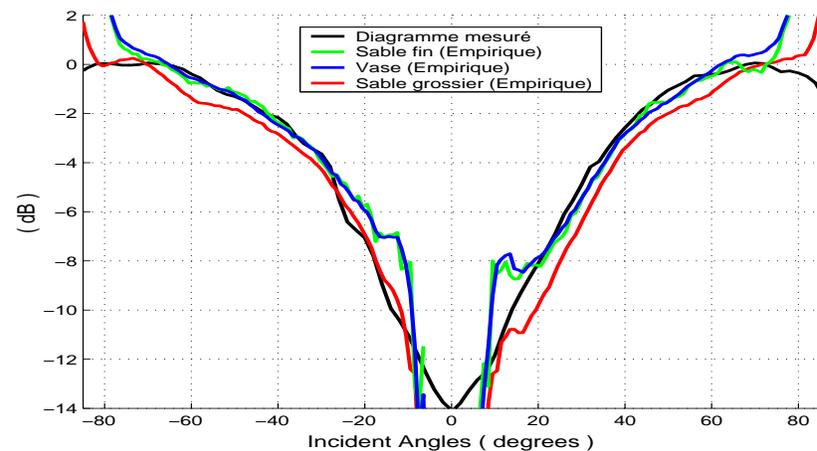


FIG. 2.25 – Diagramme de directivité mesuré et diagrammes empiriques sur trois fonds différents.

Les courbes des différents fonds sont très proches ; les fonds de sable fin et de vase ont des courbes superposées, alors que celle du sable grossier est décalée verticalement. Aux angles intermédiaires ( $\pm[20^\circ - 70^\circ]$ ), l'évolution angulaire des trois fonds est exactement la même. La courbe provenant du sable grossier est au maximum à 1 dB sous les deux autres courbes. Pour le secteur spéculaire et les incidences rasantes, les différences sont plus importantes et peuvent atteindre plus de 2 dB. Pour ces deux secteurs angulaires, l'ajustement sur l'indice de rétrodiffusion est de moins bonne qualité car pour le secteur spéculaire, les fluctuations du signal sont spécialement fortes et pour les incidences rasantes supérieures à  $75^\circ$ , les données issues du sondeur multifaisceau deviennent de plus en plus rares.

Les différences entre les fonctions de directivité empiriques et mesurées ne sont pas très importantes. On retrouve les mêmes problèmes pour les secteurs angulaires spéculaires et rasants alors que pour la gamme intermédiaire, les évolutions sont similaires.

A ce stade, aucun *a priori* ne permet de conclure sur la méthode à privilégier. La section

suiivante se charge de présenter les résultats des deux méthodes obtenus pour un ensemble de fonds différents. Le diagramme de directivité empirique choisi pour la correction est celui donné par les zones de sable fin et de vase.

#### 2.4.4 Résultats

La campagne *Reflacou* donne l'opportunité de comparer deux systèmes d'imagerie acoustique de fréquences d'utilisation voisines. En effet, l'acquisition des données du DF1000 a été associée à celle du sondeur multifaisceau EM1000. Quatre fonds différents ont été retenus pour la comparaison des résultats des deux sonars : trois fonds (vase, sable fin, sable grossier) parfaitement homogènes (relief et sédiment) et une zone dont la bathymétrie est incertaine où le fond est composé de vase colonisée par des crépidules. Les données enregistrées ont été corrigées selon les protocoles exposés auparavant et les résultats présentés sur la figure (2.26), montrent les indices de rétrodiffusion provenant d'une part du sondeur multifaisceau et d'autre part du sonar latéral selon les deux méthodes de diagramme de directivité (mesuré et empirique). Pour chaque fond, deux passages ont été choisis et représentés sur la figure (2.26). Le diagramme empirique utilisé est celui identifié sur les zones de sable fin et de vase.

Le comportement angulaire des courbes de rétrodiffusion du sonar latéral est globalement similaire (Fig. 2.26) à celui du multifaisceau (courbes vertes) que ce soit à l'aide du diagramme de directivité mesuré (bleues) ou empirique (rouges). Un comportement de type  $\beta$ -Lambert (cf. section 1.3) est reconnu, témoignant d'un comportement en adéquation avec le phénomène physique de la rétrodiffusion :

- ★ Aux angles intermédiaires, les paliers des fonds de vases et de sables grossiers sont parfaitement respectés. L'évolution angulaire dans ce secteur du fond de sable fin est parfaitement retranscrite.
- ★ Pour les incidences rasantes, la décroissance est bien respectée quelque soit le type de fond. En particulier, les angles critiques entre le palier des angles intermédiaires et la décroissance en rasant sont en parfaite correspondance.
- ★ Des écarts parfois importants sont observés pour le secteur spéculaire. La qualité des données du sondeur multifaisceau dans ce secteur ne permet pas de formuler des conclusions.

Enfin, même pour des fonds chahutés comme la zone de "Vase/crépidules", la cohérence des indices reste satisfaisante.

Malgré ce bon comportement général, la colonne de droite de la figure (2.26) montre des différences de niveaux entre les indices des deux systèmes sur un même type fond. Alors que les indices du sondeur multifaisceau sont parfaitement stables, les indices du sonar latéral présentent des écarts significatifs : 5 dB pour les zones de sable fin et de vase, de 1 à 2 dB pour la zone de sable grossier (Fig. 2.26). Les corrections réalisées selon les deux directivités (mesuré et empirique) donnent des niveaux équivalents. Après vérification des différents paramètres de corrections (géométriques et énergétiques), nous avons des soupçons sur le caractère reproductible du signal d'émission, malgré quelques mesures en laboratoire montrant une série de signaux identiques d'émission.

Les deux méthodes de correction de directivité donnent globalement les mêmes réponses. Les seules différences se situent dans les secteurs angulaires spéculaires et rasants, mais ne dépassent pas 1 dB. Il est donc évident que la méthode utilisant la directivité mesurée, sera utilisée de préférence, ayant été validée par la méthode empirique.

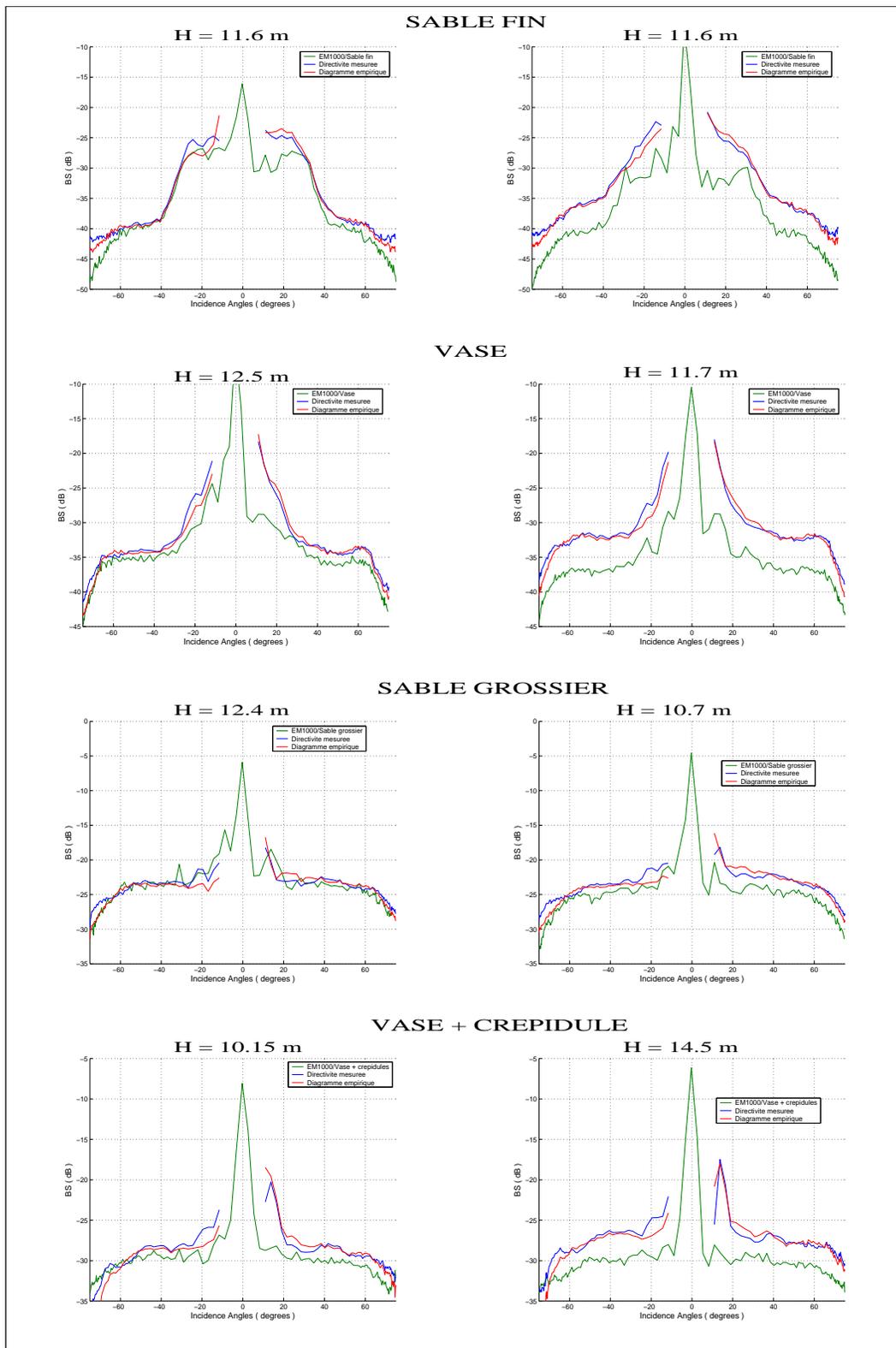


FIG. 2.26 – Comparaison entre les indices de rétrodiffusion du sondeur multifaisceau et du sonar latéral pour deux profils différents de quatre types de fonds.

En conclusion, le processus de correction de ces données a été long à aboutir. Les nombreuses particularités associées à ce sonar latéral (pas de synthèse de signaux, changement des statistiques, problème de positionnement du poisson) découvertes au fur et à mesure de l'étude, ne permettent pas d'aboutir pour ce système à une mesure absolue de l'indice de rétrodiffusion. Devant les performances de ce système, deux utilités ont été néanmoins trouvées pour continuer à exploiter ces données. D'une part, l'étude des statistiques de la rétrodiffusion mettra en évidence des comportements qui peuvent être confirmés par les données du sonar latéral (tout en gardant à l'esprit le manque de qualité). Enfin, le sonar latéral possède une résolution d'imagerie plus fine que celle du sondeur, qui lui permet en particulier de détecter plus précisément les textures. Le chapitre 5 présentera notamment un processus de segmentation qui fera intervenir les données du sonar latéral.

## 2.5 Conclusion

Après avoir décrit les différents processus physiques à la base de l'acoustique sous-marine dans le chapitre précédent, ce chapitre a été dédié à l'étude des systèmes d'imagerie acoustique utilisés dans le cadre de cette thèse. En particulier, le principe de formation de l'image a été exposé en mettant l'accent sur l'impact sur l'image, prouvant ainsi la nécessité d'un processus de correction de données de qualité.

L'étude des deux systèmes sonar a montré que même si le processus de correction de données part de la même base (i.e l'équation énergétique du sonar), les particularités d'acquisition des systèmes amènent à des moyens de corrections différents. Le processus de correction de données du sonar latéral (cf. 2.4.3) a mis en évidence des incertitudes sur la mesure de l'indice de rétrodiffusion provenant de ce système. Ainsi dans la suite, ces données serviront pour étayer les développements réalisés sur les données de l'EM1000 en gardant toujours à l'esprit que les données du sonar latéral ne sont pas strictement exactes.

L'exploitation va dans la suite, être réalisée sur les données de la campagne *Reflacou* (cf. annexe C) pendant laquelle le sonar latéral et le sondeur multifaisceau a été mis en œuvre. L'objectif fixé est de montrer comment, malgré une procédure adaptée de correction de données, les caractéristiques intrinsèques des systèmes acoustiques d'imagerie persistent à influencer les réponses des fonds marins ainsi que les résultats de segmentation des images acoustiques.

## Chapitre 3

# Exploitation de l'indice de rétrodiffusion

### 3.1 Introduction

A l'issue de l'étape de corrections des données sonar, les images acoustiques sont nettoyées des artefacts provoqués par le système d'acquisition. Les indices de rétrodiffusion angulaire deviennent disponibles et exploitables. Leur utilité comme descripteurs des fonds marins est associée à deux thèmes d'exploitation. Premièrement, ils autorisent une mesure indirecte des paramètres géoacoustiques (densité, rugosité, . . .) du fond insonifié, sous réserve d'un modèle réaliste de rétrodiffusion ([Apl 94]). Leur estimation est donc une étape importante de la caractérisation des fonds marins. Dans un second temps, la prise en compte de la dépendance angulaire des indices permet l'application des méthodes de segmentation (développées en radar notamment), aux images sonar. En particulier, un algorithme basé sur les champs de Markov a été adapté avec succès ([Dug 97]).

Dans ce chapitre, les indices de rétrodiffusion de différents types de fonds sont analysés. La première partie montre le caractère discriminant de ce descripteur. La seconde partie propose une étude azimutale de l'indice de rétrodiffusion. L'étude montre le caractère anisotrope de la rétrodiffusion dont l'origine est le microrelief sédimentaire des fonds marins. Des fluctuations de niveau des indices de rétrodiffusion sont révélées par simulation et confirmées par des données expérimentales.

### 3.2 Présentation des données acoustiques

L'annexe (C) détaille la campagne *Reflacou* au cours de laquelle les données acoustiques exploitées par la suite, ont été enregistrées. Les grandes lignes en sont reportées ci-dessous.

L'objectif de cette campagne d'acquisition était de réaliser une étude détaillée et aussi exhaustive que possible du comportement angulaire de l'indice moyen de rétrodiffusion du fond sur un nombre limité de configurations courantes. Quatre sites situés en Baie de Douarnenez ont été retenus pour leur homogénéité sédimentaire. Les informations de type géologique sont apportées grâce à des carottages réalisés sur zone et celles de type microrelief d'interface grâce à des séquences vidéo. Ces quatre sites sont les suivants :

- ★ Le **site 5** est repéré par le point central [ $N48^{\circ} 18'50 - W4^{\circ} 23'00$ ]. Composé de **sable fin**, ce fond est sédimentairement homogène et présente une bathymétrie en très légère

pente descendante du NNE au SSO (0.4 %). L'examen d'une séquence vidéo du fond fait apparaître un microrelief composé de rides de sable de longueur d'ondes centimétrique. Celles-ci ne semblent pas présenter a priori d'orientation particulière contrairement au relief du site 2. L'ordre de grandeur des variations horizontales et verticales est centimétrique.

- ★ Le point central du **site 2** se situe aux coordonnées  $[N48^{\circ}10.200, W4^{\circ}29.550]$ . Cette zone est constituée de **sable fin**. La bathymétrie montre une légère pente descendante d'environ 0.7% orientée du Nord-Ouest au Sud-Est. Ce fond est sédimentairement identique au site 5 et présente le même type de microrelief centimétrique. L'examen des images sonar révèle des structures orientées nord-nord-est vers sud-sud-ouest.
- ★ Le **site 4** est constitué de **sable grossier** et est situé à la position  $[N48^{\circ}08.350, W4^{\circ}25.900]$ . La particularité principale de ce fond est son relief présentant des rides de courant et piégeant un nombre important de débris coquillés. La longueur d'onde moyenne des rides a été estimée de 1 à 2 mètres et les lignes de crêtes possèdent une direction moyenne nord/sud.
- ★ Le **site 3** est constitué d'un **mélange compact de sable et de vase** et possède une bathymétrie parfaitement plate. Son point central est fixé à la position  $[N48^{\circ}08.622, W4^{\circ}20.859]$ . Le fond présente aussi de nombreuses hétérogénéités non-identifiées. Le comportement acoustique de celles-ci (annexe C) ainsi que leurs formes font penser à des débris végétaux calcaires (maërl). Enfin, des rides de sable de grandeur centimétrique ont été détectées sur les extraits vidéo.

Chaque site, repéré par son point central, a fait l'objet du même protocole d'acquisition, composé de 20 passes de longueurs 1000 mètres (Fig. C.2 de l'annexe C) :

- ★ 7 passes (de 1 à 7) d'ouest en est et 8 passes (de 8 à 15) d'est en ouest ; espacées d'une distance d'environ 15 mètres.
- ★ 5 passes (de 16 à 20) caractérisées par un angle d'azimut<sup>1</sup> et d'orientations diverses :
  - ★★ une passe de direction O.-S.-O.  $\mapsto$  E.-N.-E.,
  - ★★ une passe de direction N.-N.-E.  $\mapsto$  S.-S.-O.,
  - ★★ une passe de direction S.  $\mapsto$  N.,
  - ★★ une passe de direction N.-N.-O.  $\mapsto$  S.-S.-E.,
  - ★★ une passe de direction O.-N.-O.  $\mapsto$  E.-S.-E.

Ainsi, chaque zone d'étude dispose d'un jeu de données présentant une très forte redondance. En outre, deux systèmes sonar (un sondeur multifaisceau : Simrad EM1000 et un sonar latéral : Edgetech DF1000) ont été mis en œuvre durant la campagne.

Traditionnellement, l'indice de rétrodiffusion est représenté en fonction de sa dépendance angulaire. Dans ce chapitre, nous utiliserons parfois une représentation en fonction de la tangente de l'angle d'incidence, conjointement à la représentation standard. Deux raisons expliquent ce choix :

- ★ le calcul de l'indice moyen de rétrodiffusion ;
- ★ la visualisation du résultat.

Prendre la tangente de l'angle permet de réaliser une projection sur le fond indépendamment de la hauteur d'eau. Un découpage en secteurs tangentiels égaux permet de regrouper plus efficacement les échantillons en termes statistiques pour les angles rasants.

---

<sup>1</sup>Il s'agit de l'angle formé par la direction Ouest-Est et de la direction d'émission des ondes sonores.

Grâce à ce procédé, le nombre d'échantillons par secteur de découpage reste presque constant le long de la fauchée contrairement au mode isoangulaire où ce nombre augmente très rapidement lorsqu'on s'éloigne du secteur spéculaire. La décroissance de l'indice de rétrodiffusion est alors plus fidèlement retranscrite pour les angles rasants. A contrario, la décroissance du secteur spéculaire ne sera pas suivie aussi précisément mais ce compromis est justifié par le fait que ce secteur ne représente qu'une faible partie de l'image et possède un mauvais rapport signal à bruit. En outre, du fait de ce faible nombre de points, la représentation de l'indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle fausse le lien avec l'image acoustique ; le secteur spéculaire prend trop d'importance dans l'image.

L'étude de l'indice de rétrodiffusion est divisée en deux axes. En premier lieu, la dépendance angulaire de l'indice sera étudiée en fonction des différents types de fonds investigués. Le second point propose une approche de l'indice basée sur l'étude des variations de l'indice en fonction du sens de passage du navire et en conséquence de la polarisation du fond.

### 3.3 Dépendance angulaire de l'indice de rétrodiffusion

#### 3.3.1 Méthodologie

Le premier élément de cette étude de la rétrodiffusion réside dans l'exploitation du caractère redondant de l'acquisition sur les 15 passes parallèles. En effet, la configuration d'acquisition a permis d'insonifier le point central de chaque zone par l'ensemble de la gamme angulaire du sondeur et du sonar. Cette stratégie permet ainsi l'étude aussi locale que possible de l'indice de rétrodiffusion ; elle assure la validation de l'hypothèse d'homogénéité d'une zone, souvent non résolue lors d'études antérieures par manque de données. La figure (3.1 gauche) expose le principe d'exploitation. De chaque passe parallèle (de 1 à 15) sont extraites les données de rétrodiffusion et d'angles d'incidence correspondant à la zone d'étude (cadre rouge). En supposant que cette zone soit assez restreinte, la figure (3.1 droite) décrit la reconstruction attendue pour un fond parfaitement homogène reportée sur une courbe de  $BS$  calculée avec les données issues de l'intérieur de la zone bleue (Fig. 3.1 gauche). Ainsi, grâce à cette méthode, la zone d'étude, assurée d'être localement homogène, peut être élargie de façon à obtenir la quantité de données notamment nécessaire à l'étude de la dépendance azimutale réalisée par la suite (cf. section 3.4).

Le second point d'étude va donner une nouvelle confirmation du caractère discriminant (du type de fond) de l'indice de rétrodiffusion déjà mis en évidence par le passé ([Dug 97]). Les données récoltées permettent d'analyser le mécanisme physique de rétrodiffusion en fonction du type de fond. On complétera les données des quatre fonds présentées en introduction par un fond de roche et un fond situé en rade de Brest, composé de vase et colonisé par une population de crépidules (cf. annexe C) pour compléter la diversité des fonds.

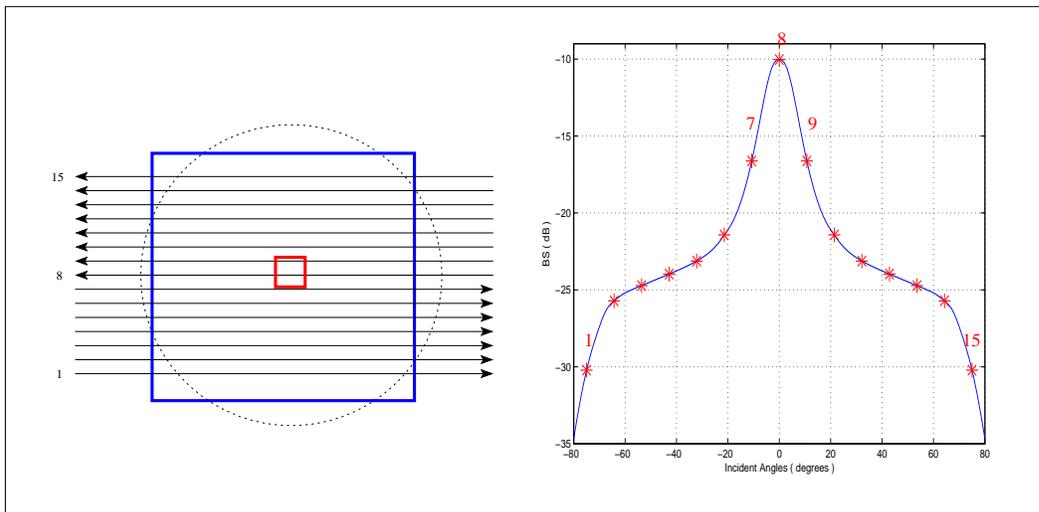


FIG. 3.1 – (*Gauche*) Configuration d'acquisition des passes parallèles et (*droite*) résultat de la reconstruction du *BS* local sur un *BS* global.

### 3.3.2 Analyse locale de l'indice

Il s'agit dans cette section de réaliser une étude très localisée de l'indice de rétrodiffusion. A partir de la moyenne calculée sur une surface représentant l'ensemble de la zone et pour l'ensemble des passes parallèles (de 1 à 15), le *BS* local de chaque passe parallèle est analysé pour estimer l'homogénéité de la zone. La figure (3.2 haut) présente un exemple de mosaïque acoustique (cf. chapitre 2) du site 5 sur laquelle on peut observer la surface de calcul global (cadre bleu) et la surface locale (cadre rouge).

Les résultats sont représentés sur la figure (3.2). Les indices de rétrodiffusion *BS* de chaque passe parallèle sont représentés en couleur et sont à comparer avec la moyenne globale en trait noir. Étudier très localement l'indice de rétrodiffusion signifie que pour une passe, on ne dispose pas de tous les angles d'incidences de la fauchée. L'objectif est donc d'effectuer (ou de tenter d'effectuer) une reconstruction de la courbe moyenne à partir d'une surface d'insonification très restreinte. Ainsi, dans le cas d'une reconstruction fructueuse, l'homogénéité de la zone sera prouvée (pour cette direction de passage). La surface d'étude pourra ainsi être augmentée sensiblement pour disposer d'une gamme angulaire complète, utile pour l'étude de la dépendance azimutale.

Les résultats pour les zones d'étude 2, 4 et 5, décrits par la figure (3.2) sont remarquables puisque les variations hormis le secteur spéculaire ( $\theta < \pm 15^\circ$ ) ne dépassent généralement pas un dB. Pour ces fonds, l'homogénéité globale de la zone est assurée.

L'analyse des indices du site 3 permet d'affirmer le caractère très nettement hétérogène du fond pour les passes parallèles. En effet, des écarts jusqu'à 5 dB sont observés. Cependant, ces écarts ne sont pas présents sur l'ensemble de la gamme angulaire : il semble donc que des événements locaux soient détectés. L'examen minutieux des images sonars de ce fond révèle des bandes de forts réflecteurs (cf. annexe C). Leur existence prouve l'hétérogénéité de la zone cependant leur localisation se fait très précisément sur une image sonar. On peut aisément dans le calcul des statistiques les éviter ; c'est pourquoi, ce type de fond sera conservé pour la suite des études.

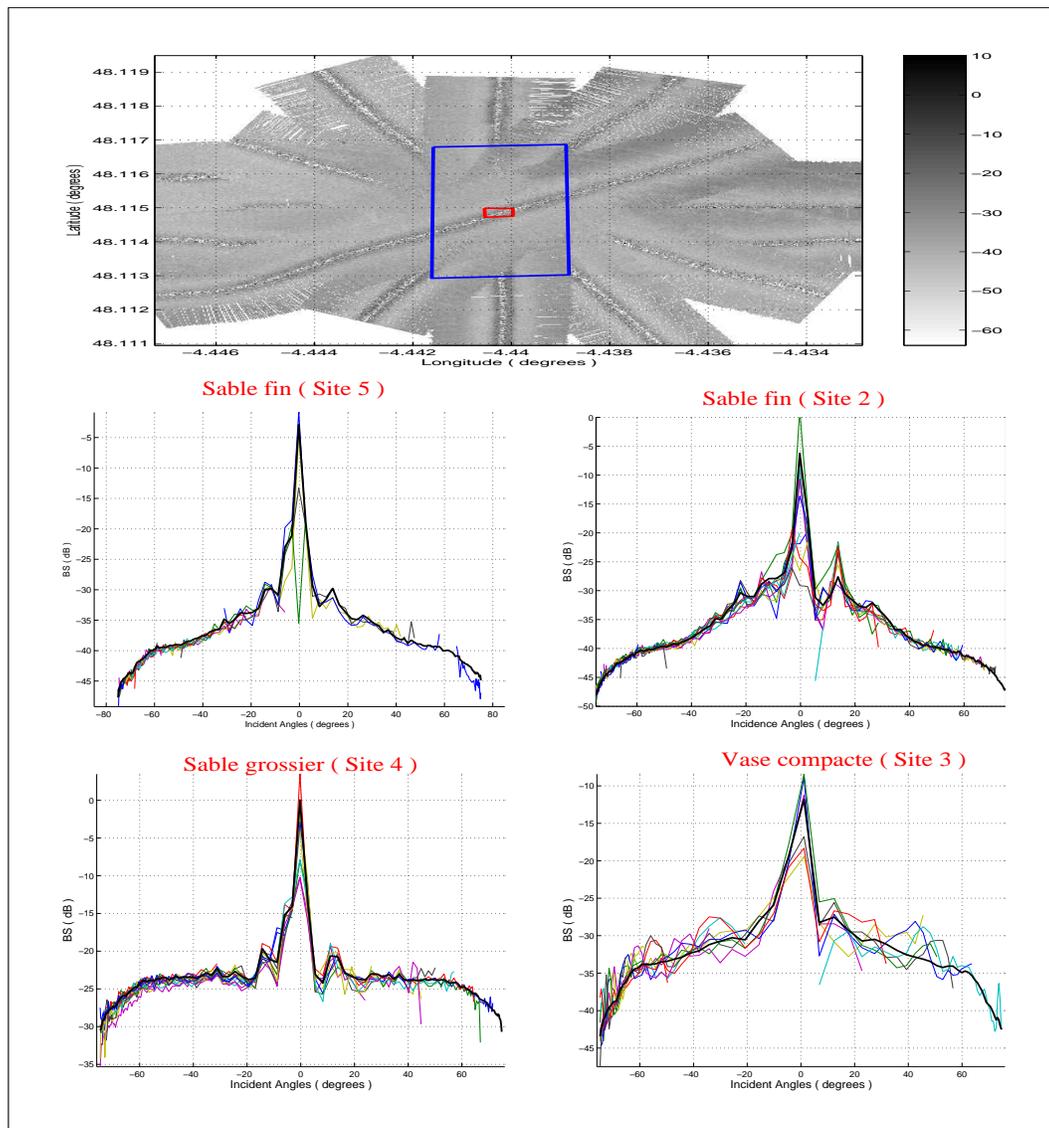


FIG. 3.2 – (*Haut*) Mosaïque du site 5 et surfaces d'études : globale (bleu) et locale (rouge). (*Milieu et bas*) Comparaison de l'indice de rétrodiffusion global par rapport aux indices de chaque passes parallèles (1 à 15) pour les quatre fonds.

### 3.3.3 Description de l'indice moyen en fonction du type de fond

La figure (3.3) représente les indices de rétrodiffusion  $BS$  en fonction de l'angle d'incidence (*gauche*) puis de la tangente de l'angle d'incidence (*droite*) pour six types de fonds (cf. 3.3.1).

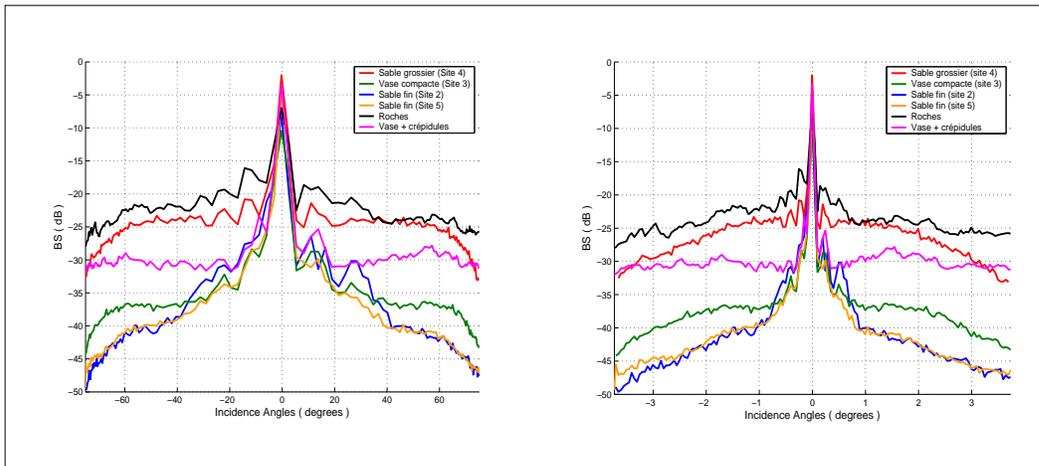


FIG. 3.3 – Indices de rétrodiffusion de six types de fonds en fonction de l'angle d'incidence (*gauche*) et de la tangente de l'angle d'incidence (*droite*).

Les commentaires suivants accompagnent cette figure :

- ★ Une dynamique globale supérieure à 15 dB a été trouvée aux angles intermédiaires, montrant clairement une variété intéressante de propriétés sédimentaires analysées.
- ★ L'ensemble des comportements angulaires des courbes est assez classique à première vue. Néanmoins,
  - ★★ Des résidus de modulation de diagramme de directivité sont observés dans le secteur spéculaire ( $[-20^\circ, 20^\circ]$ ), conformément aux conclusions de l'étude de correction de données (cf. annexe A).
  - ★★ Les courbes correspondant aux fonds de roches et de crépidules sont plus chahutées que les autres. Par définition, ces fonds sont de natures très hétérogènes ce qui provoque notamment une dissymétrie entre bâbord et tribord. Ces deux sites ont été rajoutés pour prendre en compte une plus grande diversité de types de fonds.
  - ★★ Les deux zones de sable fin (sites 2 et 5) présentent sans surprise des niveaux équivalents.
- ★ Comme évoquée dans la section (3.2), la représentation en tangente donne une idée de l'importance du secteur spéculaire dans l'image.

L'évolution de l'indice de rétrodiffusion est classiquement séparée en trois secteurs angulaires caractéristiques (cf. section 1.3) :

- ★ aux incidences verticales, la décroissance de l'indice est soumise à l'existence de facettes orientées (perpendiculairement à la direction d'émission de l'onde) sur le fond réfléchissant le signal ;
- ★ aux angles intermédiaires, un palier décrit l'indice, caractéristique du microrelief et de la rétrodiffusion volumique ;
- ★ aux incidences rasantes, l'indice s'effondre. La rétrodiffusion volumique est inexistante

et l'indice est dominé par les effets du microrelief. Le passage des angles intermédiaires aux incidences rasantes s'accompagne d'un changement de pente de l'indice pour un angle critique.

La comparaison des courbes de la figure (3.3 *gauche*) montre dans quelle mesure ce découpage en secteur angulaire permet une extraction d'information discriminante du type de fond. Cette figure montre aussi les limites de cette discrimination.

Le plus important élément d'information est le niveau moyen du palier des angles intermédiaires. Les niveaux des types de fonds respectent l'échelle de dureté/rugosité, mis à part le niveau de la vase compacte (site 3) par rapport à celui du sable fin. Les prélèvements réalisés sur site montrent une vase très compacte à l'origine de ce niveau de rétrodiffusion. Les fonds de sable grossier et de roches ont des niveaux intermédiaires similaires ce qui rend délicate la discrimination entre les deux fonds pourtant géologiquement et physiquement très différents.

A partir des angles intermédiaires jusqu'aux angles rasants, les courbes décrivent une classique décroissance. Deux propriétés définissent ce secteur angulaire :

- ★ l'existence d'un angle critique faisant la frontière entre les angles intermédiaires et les angles rasants ;
- ★ le niveau atteint par la courbe en fin de portée.

Des différences importantes entre deux familles de types de fonds sont constatées sur la figure (3.3). D'un côté, les fonds à très forte rugosité (roches et vase/crépidules) présentent une pente presque nulle de leur indice de rétrodiffusion sur le secteur ( $[20^\circ - 75^\circ]$ ) et sont dépourvus d'angle critique. De l'autre côté, les zones sédimentaires moins rugueuses (sable grossier, sable fin et vase) présentent des décroissances plus classiques et un angle critique bien marqué.

Alors que sur le secteur spéculaire et intermédiaire, les indices correspondant au fond de roches et de sable grossier ne sont pas discriminables, leur évolution sur les angles rasants permet de les séparer.

Un dernier élément caractéristique de l'indice est l'étendue du spéculaire. Dans ce secteur angulaire, l'indice de rétrodiffusion est révélateur de la rugosité du fond. L'existence d'un nombre important de facettes orientées (donc d'une rugosité importante) va étendre l'influence du spéculaire sur les angles intermédiaires. Sur la figure (3.3), on distingue trois types de comportements dans ce secteur angulaire :

- ★ les fonds de vase/crépidule et sable grossier ont un secteur spéculaire s'étendant jusqu'à  $20^\circ$  ;
- ★ le spéculaire de la vase s'étend jusqu'à  $30^\circ$  ;
- ★ les deux sites de sable fin possèdent un spéculaire influent jusqu'à  $40^\circ$ . Un écart de niveau est observé entre les deux zones suggérant une différence de rugosité ; ce point sera débattu par la suite.

Ainsi, cette analyse montre que l'indice de rétrodiffusion peut être considéré comme un paramètre discriminant du type de fonds marins. Pourtant, la figure (3.3) montre clairement les difficultés de discrimination fine auxquelles un processus de segmentation pourrait être confronté. Certains types de fonds présentent des indices de rétrodiffusion discriminants (site de roches et de sable grossier) uniquement dans le cas où tout le comportement angulaire de l'indice est disponible. Les systèmes d'acquisition utilisés dans cette thèse insonifient le

fond transversalement au cap du navire sur une distance importante<sup>2</sup>. Il est alors difficile de faire l'hypothèse que le fond est toujours homogène sur cette bande insonifiée. De plus, la variabilité de l'indice de rétrodiffusion due au bruit de speckle (cf. chapitre 4), ne peut permettre une discrimination efficace pour des comportements angulaires aussi proches les uns des autres.

## 3.4 Dépendance azimutale de l'indice de rétrodiffusion

### 3.4.1 Méthodologie

Les sédiments marins de petits fonds présentent rarement des caractéristiques isotropes en fonction de l'angle d'azimut. Les rides de sables de toutes dimensions dont la formation est due aux courants marins, sont les exemples les plus typiques de structuration des interfaces sédimentaires. Les modèles de rétrodiffusion utilisent généralement la théorie des petites perturbations (section 1.3) associée à une description de l'interface sédimentaire en spectre (de rugosité) isotrope en loi de puissance ([Jac 96]). Malheureusement, les deux hypothèses peuvent être mises en doute pour beaucoup de fonds sableux ([Pou 00, Ric 01]). Des indices mesurés ont présenté des écarts jusqu'à 15 dB en faisant varier la direction d'insonification ([Pou 98, Lyo 98]) ou les caractéristiques d'interface ([Ric 01]). L'intérêt de la prise en compte de la direction d'insonification et d'un spectre de rugosité anisotrope 2D a ainsi été clairement mis en évidence.

Le jeu de données obtenu lors de la campagne d'acquisition *Reflacou* offre l'opportunité d'étudier le comportement de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  en fonction de diverses orientations de passages (et ainsi de différentes directions d'insonification).

Pour mener à bien cette étude, il est nécessaire de prendre des précautions particulières quant au type de représentation choisie. Depuis le début de ce document, les indices de rétrodiffusion ont été représentés en fonction des angles d'émission, en faisant la distinction entre les angles insonifiant du côté bâbord et du côté tribord. Motivée par le processus de correction des données, cette démarche était indispensable de manière à identifier les problèmes d'artefacts (ceux de bâbord sont différents de ceux de tribord) dus à l'antenne du sondeur. Désormais, l'ajout d'une dépendance azimutale complique le mode de représentation en incorporant une autre dimension ; il devient nécessaire de replacer géographiquement les réponses angulaires.

L'exemple de profils de sens de passage opposés où le problème de représentation est simple, est résolu par une simple inversion de la courbe de  $BS$  (les angles bâbord d'un profil doivent être mis à la place des angles tribord et inversement). Ainsi, en considérant un fond composé de deux sédiments différents, la figure (3.4 droite) décrit le résultat obtenu en gardant la convention normale : angles bâbord négatifs et angles tribord positifs. Le résultat montre que si l'ancien mode de représentation est utilisé, les indices  $BS$  seront difficilement exploitables. Cependant, en inversant les courbes par la méthode indiquée, l'analyse redevient possible.

---

<sup>2</sup>Pour une altitude de 30 mètres, le sonar insonifie jusqu'à plus de 100 mètres de part et d'autre du navire.

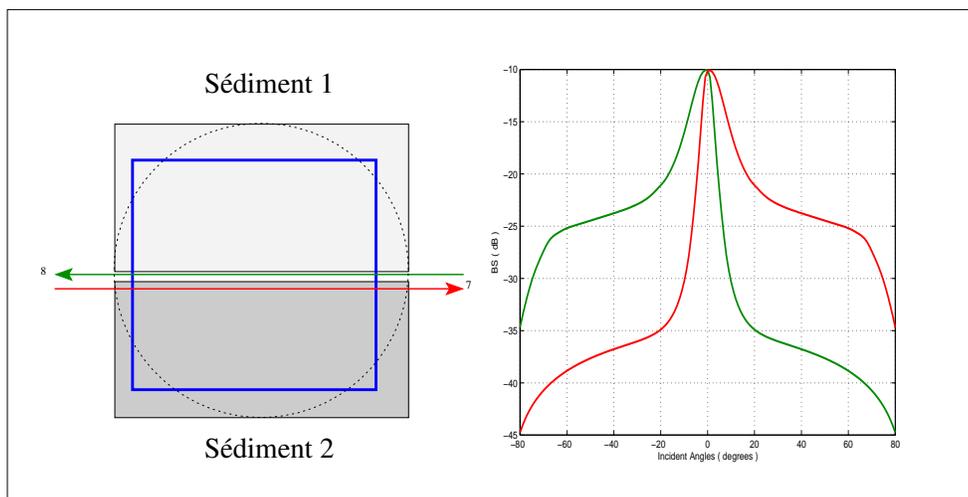


FIG. 3.4 – Configuration d'acquisition (*gauche*) et méthode de représentation des données (*droite*) de deux passes de sens opposé. La zone d'étude est supposée composée de deux fonds : le demi-plan supérieur est sédimentairement différent du demi-plan inférieur.

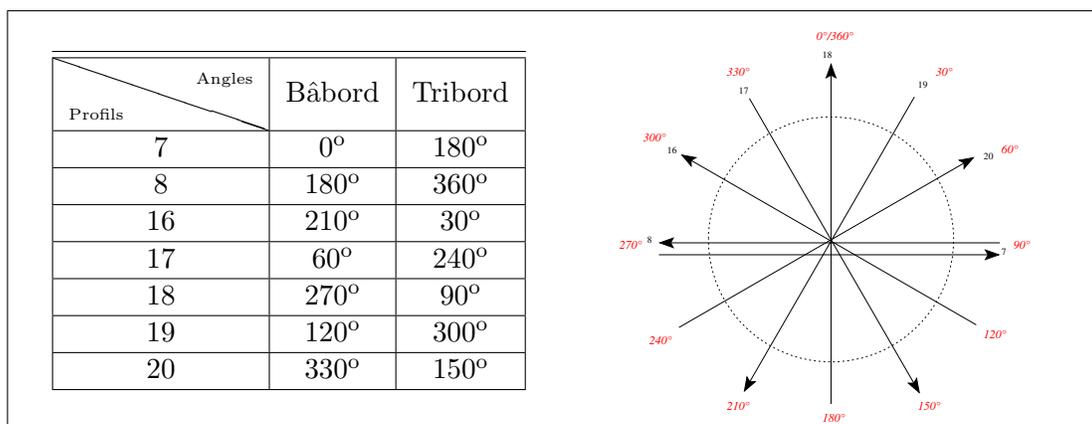


FIG. 3.5 – (*Gauche*) Associations des différents profils aux angles azimutaux. (*Droite*) Représentations polaires des angles d'azimut.

Le problème de la représentation se complique lorsque les passes de différents angles d'azimut doivent être comparées. En effet, on dispose pour cette étude de sept passes différentes sur un même fond et donc, sept évolutions angulaires de  $BS$ . Le principe de représentation retenu est le suivant ; le plan azimutal est découpé en 12 azimuts de 0° à 330° par pas de 30° (Fig. 3.5 (*droite*)). En conséquence, les indices de rétrodiffusion de chaque passe sont désormais représentés par trois dimensions qui sont : le niveau en dB, les angles d'incidences et l'angle azimutal. L'association entre les différents angles d'incidence des profils et leur angle azimutal est donnée dans le tableau de la figure (3.5).

La figure (3.6) donne un exemple synthétique d'exploitation d'une zone décrite par les réponses de différentes passes, représentées en figure (3.6 *haut droite*). Pour synthétiser les réponses, les hypothèses suivantes ont été utilisées :

- ★ Le  $BS$  est complètement symétrique ; les réponses provenant des couples de passes (7,8), (16,20), (17,19) sont identiques (donc confondues sur la figure).
- ★ Le fond possède une structure telle que la réponse de la passe 7 est minimale.
- ★ Les réponses des passes 16, 17 et 18 ont été obtenues en ajoutant une composante linéaire en dB (0 dB pour les angles rasants, augmentant linéairement en se rapprochant du secteur spéculaire et en s'achevant à 1 dB (passe 16), 2 dB (passe 17) et 3 dB (passe 18) pour l'angle  $0^\circ$ .

A partir de telles réponses, le protocole de représentation azimutale consiste à effectuer des coupes à angles d'incidence fixés (représentés en droites discontinues noires sur la figure (3.6 haut droite). La réponse pour un angle d'incidence donné est alors reportée en coordonnées cartésiennes sur la figure (3.6 bas gauche). Ce mode de représentation permet de détecter rapidement tout changement de comportement de la rétrodiffusion. En particulier, un fond isotrope sera caractérisé par un ensemble de droites horizontales dans ce mode de représentation. Pour notre exemple, la différence introduite entre les diverses réponses est nulle aux angles rasants et maximale pour les angles spéculaires. La représentation azimutale cartésienne rend compte de ce changement progressif par des gabarits de courbes très marqués pour les angles spéculaires et allant en s'atténuant pour les angles les plus rasants. La représentation polaire permet une visualisation aisée d'une direction de polarisation particulière. Dans ce mode de représentation, des cercles réguliers et concentriques traduisent le caractère isotrope. La figure (3.6 bas droit) décrit bien le phénomène pour l'exemple ; plus on se rapproche du centre, plus le fond devient isotrope et plus les ellipses se transforment en cercles.

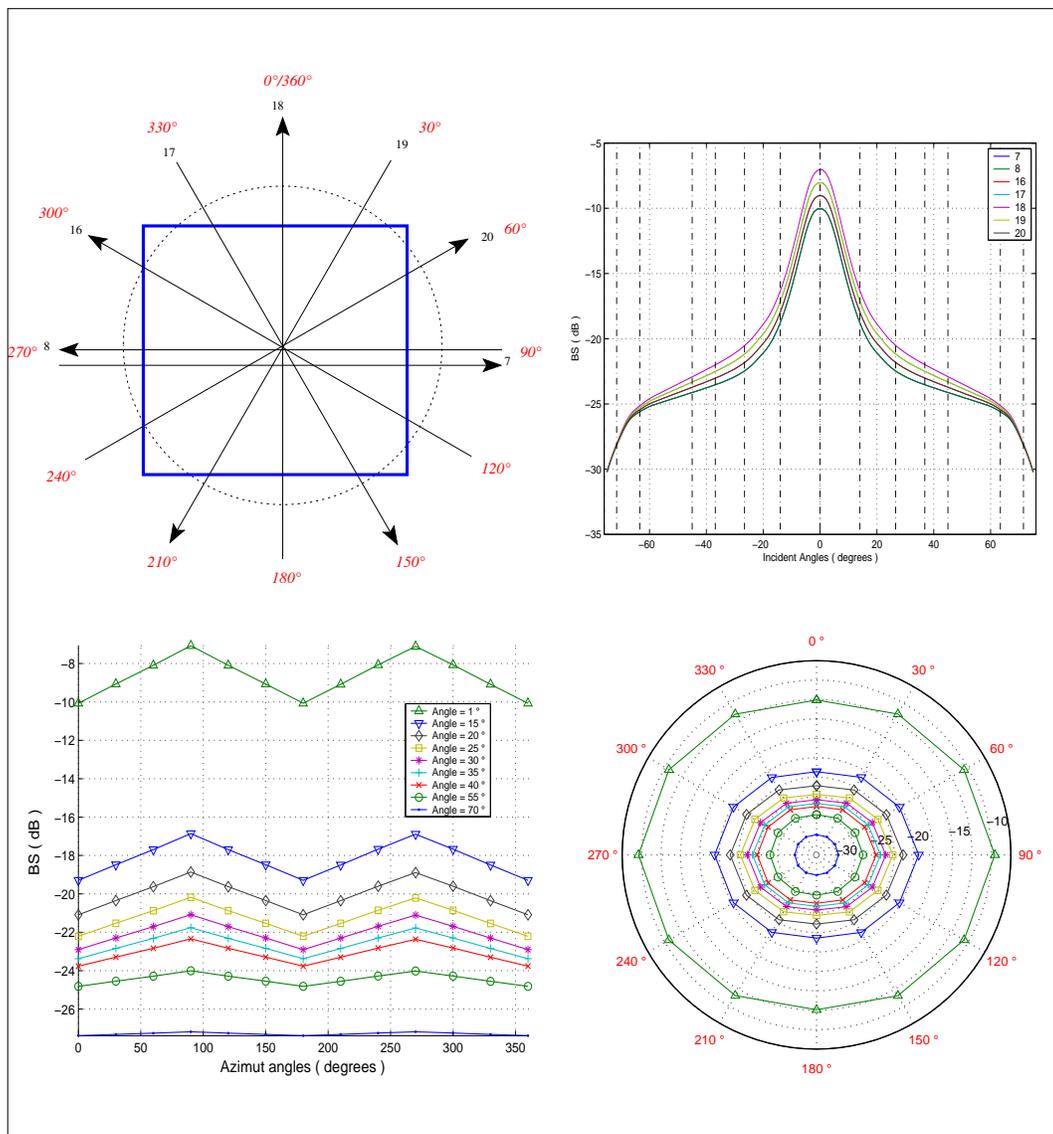


FIG. 3.6 – (*Haut gauche*) Définition des angles d'azimut, (*haut droit*) exemple de courbes de  $BS$  d'un fond simulant une dépendance azimutale et représentations du  $BS$  en fonction de l'angle d'azimut en coordonnées cartésiennes (*bas gauche*) et polaires (*bas droit*).

Avant l'analyse des résultats expérimentaux, une étape de simulation a été réalisée. L'objectif est d'établir des prédictions réalistes de l'évolution angulaire de l'indice de rétrodiffusion d'un fond sableux pour des caractéristiques d'interface et des directions d'insonification variables. Au regard de ces simulations, les données expérimentales de la campagne *Reflacou* seront analysées.

### 3.4.2 Simulations

Le logiciel *BORIS*<sup>3</sup> ([Bor 03]) réalisé par les scientifiques du NATO Undersea Research Center, permet de simuler dans le domaine temporel, la rétrodiffusion acoustique de différents fonds marins insonifiés par un système sonar. Le modèle utilisé combine les expressions analytiques de la réponse surfacique et volumique à une description stochastique du fond. L'expression du champ de pression rétrodiffusée par une surface élémentaire est basée au choix sur l'approximation de Kirchhoff ou l'approximation des faibles pentes (section 1.3). L'expression du champ de pression rétrodiffusée par un volume élémentaire est basée sur la théorie des petites perturbations. L'extension à des surfaces et des volumes plus importants est réalisée par sommation cohérente des réponses élémentaires sur une réalisation stochastique de la surface et/ou du volume, insonifiés par un système sonar.

Le logiciel inclut donc les caractéristiques de transmission et de réception de la source (signal d'excitation et faisceaux de directivité), le niveau d'émission et la géométrie de mesure (hauteur d'eau et position de la source relativement à la surface). Pour cette simulation, les caractéristiques de transmission et de réception de la source sont les suivantes :

- ★ Le signal émis est de type bande étroite de fréquence centrale 100 kHz pendant 0.1 ms.
- ★ L'antenne simulée sert en émission et en réception et a été dépointée sur un angle transversal de 36°.
- ★ La directivité spatiale du faisceau d'émission a été approchée par une forme carrée d'ouverture de 38° dans le plan transversal et par une gaussienne d'ouverture 0.5° dans le plan longitudinal.

Le logiciel simule la propagation dans l'eau, l'impact sur l'interface sédimentaire et la propagation dans le volume sédimentaire. Les caractéristiques acoustiques de l'eau de mer sont fixées à 1500 m/s pour la célérité et 1 pour la densité. Les caractéristiques sédimentaires ont été choisies pour simuler du sable fin ; les paramètres acoustiques sont 1650 m/s pour la célérité, 1.6 pour la densité et une absorption de 0.5 dB par longueur d'onde. La contribution surfacique de la rétrodiffusion a été calculée à partir de l'approximation des faibles pentes d'ordre 2. La contribution volumique n'a pas été traitée ; la pénétration de l'onde est supposée négligeable dans le sédiment pour cette fréquence.

L'objectif de ces simulations est l'étude des variations de l'indice de rétrodiffusion d'un sédiment marin présentant des caractéristiques d'interface anisotropes. Le protocole de simulation est basée sur les variations de ces caractéristiques ainsi que sur les variations de la direction d'insonification. L'interface sédimentaire est caractérisé par ses fluctuations de hauteur (référéncées par rapport à sa valeur moyenne) et par son spectre de rugosité (Chapitre 1).

Le logiciel *BORIS* permet de prendre en compte une grande diversité de description d'interface en considérant un spectre de rugosité comme une somme de deux composantes. La première, isotrope, est une loi de puissance modifiée :

$$W_s(K) = \eta.(K_s^2 + K^2)^{-\nu/2}. \quad (3.1)$$

où  $K$  est l'amplitude du vecteur d'onde spatiale (2D) et  $\eta$  est reliée à la dimension fractale de la surface.

Une seconde composante permet la prise en compte de fond sédimentaire anisotrope

---

<sup>3</sup>BOTTOM Response from Inhomogeneities and Surface.

comme les rides de sables :

$$W_r(K) = w. \exp \left( - \frac{\frac{2\rho(K_n - K_{n0})(K_e - K_{e0})}{K_{nl}K_{el}} - \frac{(K_n - K_{n0})^2}{K_{nl}^2} - \frac{(K_e - K_{e0})^2}{K_{el}^2}}{2(1 - \rho)} \right). \quad (3.2)$$

où  $w$  est une constante de normalisation,  $\rho$  est le coefficient de corrélation,  $K_{n0} = K_N \cos(\phi)$ ,  $K_{e0} = K_N \sin(\phi)$ ,  $K_N$  est le nombre d'onde des rides,  $\phi$  est la direction des rides,  $K_{nl} = K_l$ ,  $K_{el} = e/K_l$ ,  $e$  est l'excentricité et  $K_l$  l'inverse de la longueur de corrélation.

Le protocole de simulation s'appuie sur la modélisation d'un sable fin dont l'interface sédimentaire est représentée par une composante de microrelief isotrope dont les variations de hauteurs (creux/crêtes) ont un écart-type de 3 mm. La composante anisotrope permet de simuler un microrelief en forme de rides de sable, dont la hauteur creux/crêtes est fixée à 3 cm et la longueur d'onde est de 10 cm.

Les seuls paramètres variables de la simulation sont de caractéristiques différentes :

- ★ Le premier est d'ordre géométrique. La direction d'insonification est modifiée en changeant la position de la source relativement à la surface d'insonification. Ce paramètre est donc l'angle azimutal et prendra successivement les valeurs  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$  (par rapport au Nord et en tournant dans les sens des aiguilles d'une montre). La valeur  $0^\circ$  correspond à une direction d'insonification parallèle aux lignes de crêtes des rides.
- ★ Le second paramètre, l'écart-type du nombre d'onde des rides de sable ( $EQM_r$ ) fait varier l'organisation de l'interface. Ses différentes valeurs sont respectivement 5, 10, 20 et 30; une valeur de 5 correspond a une organisation presque parfaite des rides de sable de type "tôle ondulée". Plus la valeur augmente, plus l'interface est désorganisé. Les figures (3.7, 3.8, 3.9 et 3.10 *en haut à gauche*) montrent les variations de hauteur des fonds simulés.

A partir de cet ensemble de paramètre, le logiciel calcule dans le domaine temporel le champ de pression rétrodiffusée sur lequel nous avons effectuée une détection d'enveloppe et une quadrature. Finalement, une inversion de l'équation du sonar a été réalisée de manière à exploiter une réponse homogène à un indice de rétrodiffusion (i.e corrigée des pertes de transmissions, de directivités spatiales et normalisée à une surface référence de  $1 \text{ m}^2$ ). Les échantillons sont triés par secteur de  $1^\circ$  dans la gamme angulaire  $[14^\circ - 72^\circ]$  et moyennés (les angles sont calculés à partir des temps d'arrivée et de la hauteur d'eau fixée à 10 mètres). Les simulations ont été réalisées à partir d'une seule réalisation (d'un seul tir), la moyenne angulaire de l'indice est alors particulièrement bruitée. Pour réduire ce bruit, un filtrage passe-bas de type Savitzky-Golay ([Sav 64]) a été réalisé.

Les résultats sont représentés sur les figures (3.7, 3.8, 3.9 et 3.10). Chaque figure est constitué de quatre représentations :

- ★ les variations de hauteur du fond insonifié (*haut gauche*);
- ★ les indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence (*haut droit*) pour les douze azimuts de  $0^\circ$  à  $330^\circ$  par pas de  $30^\circ$  (voir tableau de la figure 3.5);
- ★ la représentation cartésienne des indices pour des angles d'incidence de  $14 \text{ deg}$  à  $72^\circ$  par pas de  $2^\circ$ ;
- ★ la représentation polaire de ces indices.

L'analyse va être menée en deux temps :

- ★ la première figure (cas du fond le plus désorganisé,  $EQM_r = 30$ ) va être discutée en détail pour montrer la dépendance azimutale de l'indice de rétrodiffusion ;
- ★ les figures restantes seront étudiées par rapport aux résultats obtenus dans le premier cas mais avec le même objectif de montrer les variations de l'indice en fonction de la direction azimutale.

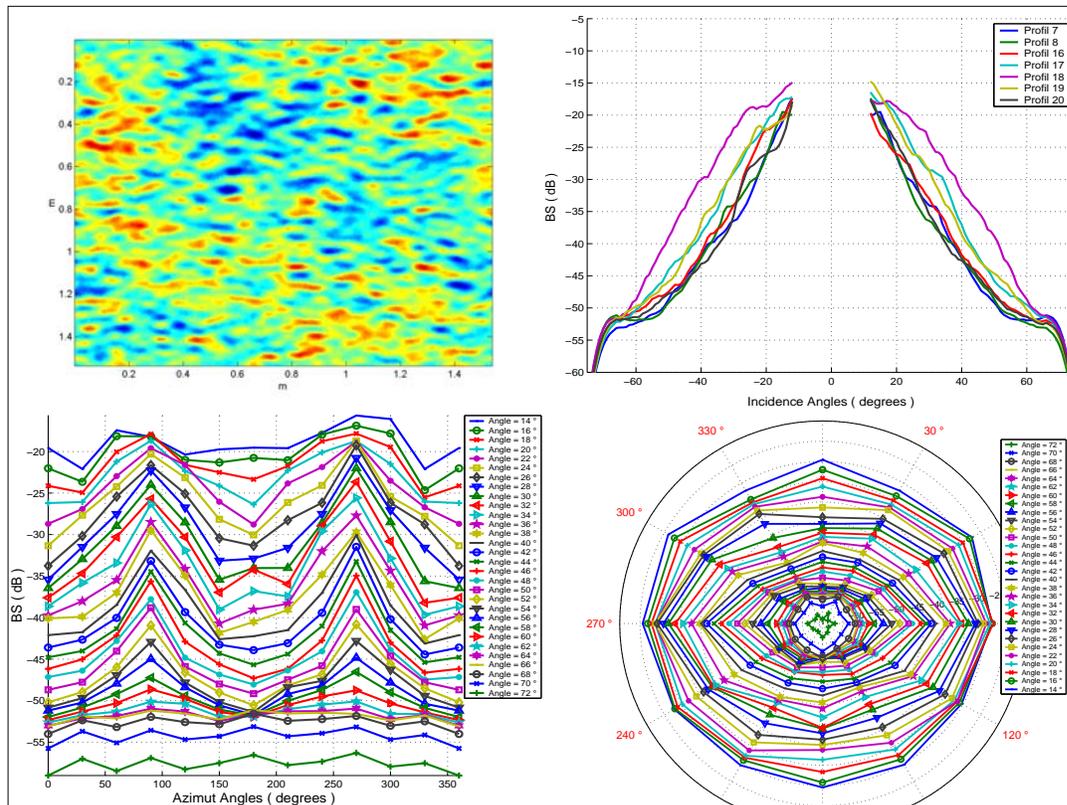


FIG. 3.7 – (*Haut gauche*) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 30$ ). (*Haut droit*) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. (*Bas gauche*) Représentation azimutale cartésienne et (*bas droit*) polaire.

La première simulation (Fig. 3.7) concerne le fond le plus désorganisé (i.e. la valeur de l'écart-type du nombre d'onde des rides est la plus haute). A partir des trois représentations de l'indice de rétrodiffusion, les résultats suivants peuvent être observés :

- ★ Pour les faibles angles d'incidences (autour de  $\pm 15^\circ$ ), les différents indices azimutaux présentent des niveaux sensiblement égaux sur la représentation en fonction de l'angle d'incidence. Les courbes correspondant aux angles d'incidence  $14^\circ$  et  $16^\circ$  montrent des modulations de très faibles amplitudes (2 à 3 dB) en représentation azimutale cartésienne et des formes de cercle sur la représentation polaire.
- ★ Lorsqu'on s'éloigne des faibles angles d'incidence, l'écart entre les niveaux des indices s'amplifie jusqu'à un angle d'incidence de environ  $30^\circ$ . La représentation en fonction des angles d'incidence montre ce phénomène. Sur la représentation cartésienne, les amplitudes de modulation s'accroissent pour atteindre environ 15 dB. La représentation polaire permet de voir un passage des formes de cercle à des formes elliptiques.

- ★ En se rapprochant de l'angle critique<sup>4</sup> du sédiment ( $65.4^\circ$ ), l'écart entre les niveaux des indices diminue progressivement. Sur la représentation cartésienne, les amplitudes de modulation s'atténuent. La représentation polaire montre un retour à des formes de cercle.
- ★ Après l'angle critique, les indices ne présentent plus de variations.

Pour ce fond, l'indice de rétrodiffusion présente clairement une dépendance en fonction de la direction azimutale d'insonification. Ces écarts de niveaux des indices représentent une excellente illustration de la dépendance de l'énergie rétrodiffusée à l'existence de facettes orientées perpendiculairement à la direction d'arrivée de l'onde. Pour la direction azimutale  $90^\circ$ , le fond est insonifié perpendiculairement à la direction principale des rides de sable. Le nombre de facettes qui rétrodiffuse spéculairement (avec le maximum d'énergie) l'onde, est alors maximal. Lorsque l'angle d'azimut diminue, le nombre de facettes diminue et le niveau de l'indice de rétrodiffusion baisse. Les écarts de niveaux entre les différents angles d'azimuts sont très importants et montrent d'ores et déjà les difficultés d'analyse des indices lorsque aucun a priori n'est disponible sur le fond insonifié.

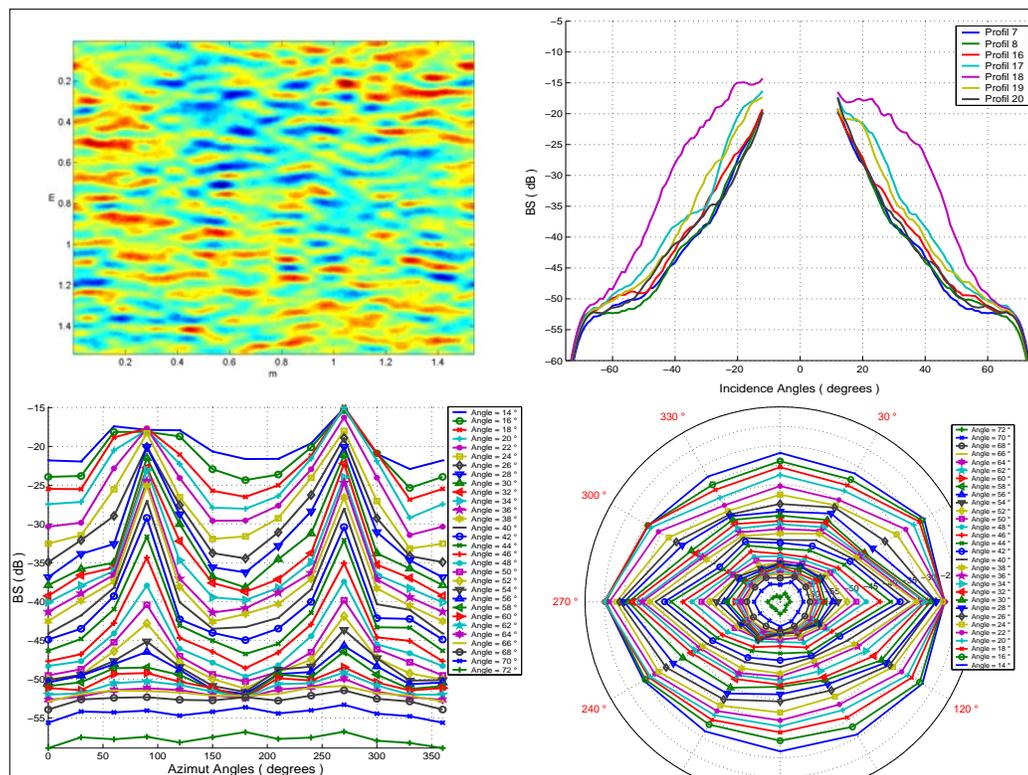


FIG. 3.8 – (*Haut gauche*) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 20$ ). (*Haut droit*) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. (*Bas gauche*) Représentation azimutale cartésienne et (*bas droit*) polaire.

<sup>4</sup> $\sin(\theta_c) = \text{célérité de l'eau de mer} / \text{célérité du sédiment}$ .

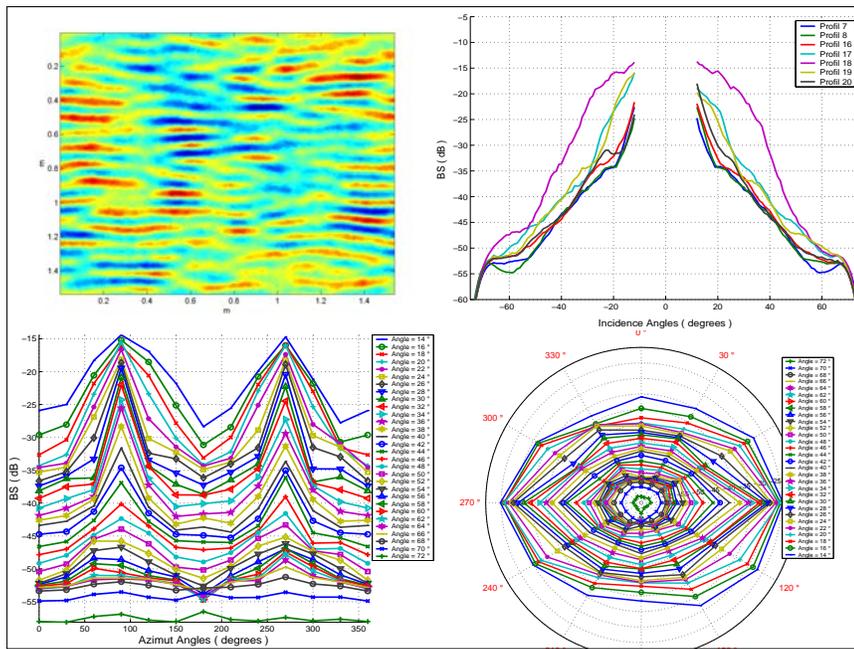


FIG. 3.9 – (*Haut gauche*) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 10$ ). (*Haut droit*) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. (*Bas gauche*) Représentation azimutale cartésienne et (*bas droit*) polaire.

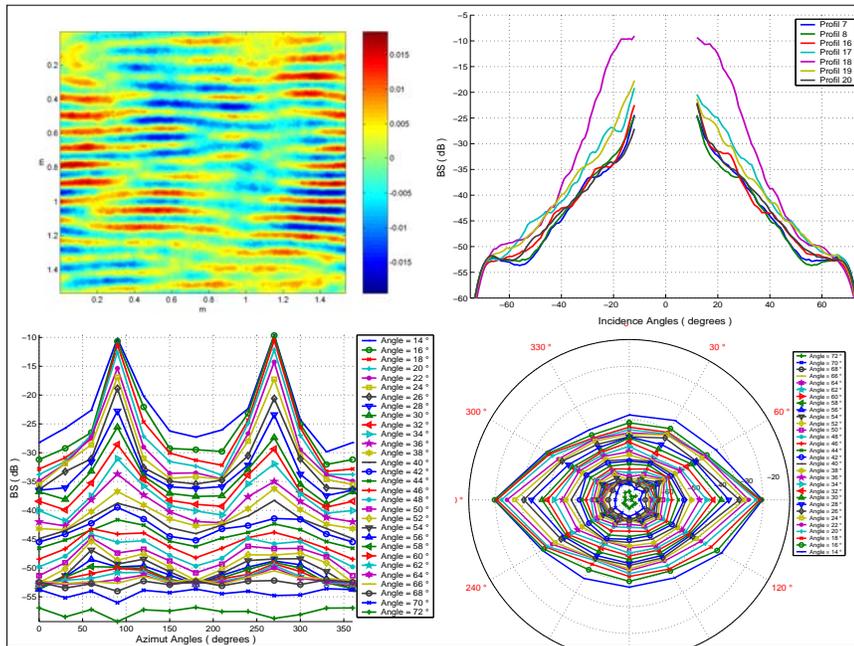


FIG. 3.10 – (*Haut gauche*) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 5$ ). (*Haut droit*) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. (*Bas gauche*) Représentation azimutale cartésienne et (*bas droit*) polaire.

L'étude des trois autres cas (Fig. 3.8, 3.9 et 3.10) permet de simuler un changement progressif des caractéristiques de l'interface; le fond est caractérisé par une structure de plus en plus régulière de type "tôle ondulée". Les résultats ressemblent aux précédents mais présentent également quelques particularités :

- ★ Pour les faibles angles d'incidence  $\pm[15^\circ - 20^\circ]$ , plus le fond est structuré, plus les niveaux de l'indice d'azimut  $90^\circ$  s'écartent des niveaux des indices. Les amplitudes de modulations sont de plus en plus importantes, elles atteignent leur maximum (18 dB) pour le fond le plus structuré. Les représentations azimutales montrent des courbes pour ces angles d'incidence en forme d'ellipse de plus en plus effilée.
- ★ Lorsque que l'angle d'incidence augmente, plus la structure de l'interface est organisée, plus le lobe spéculaire de l'indice pour l'azimut  $90^\circ$  est étroit (Fig. 3.11).
- ★ Enfin, plus le fond est structuré, plus le groupe des trois indices d'azimut  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  et  $60^\circ$  présente des indices similaires en fonction de l'angle d'incidence tout en s'écartant des niveaux de l'indice pour l'azimut  $90^\circ$ . Ce phénomène est illustré par des pics verticaux aux angles d'azimuts  $90^\circ$  et  $270^\circ$  sur la représentation cartésienne et est décrit par des formes rectangulaires sur la représentation azimutale polaire.

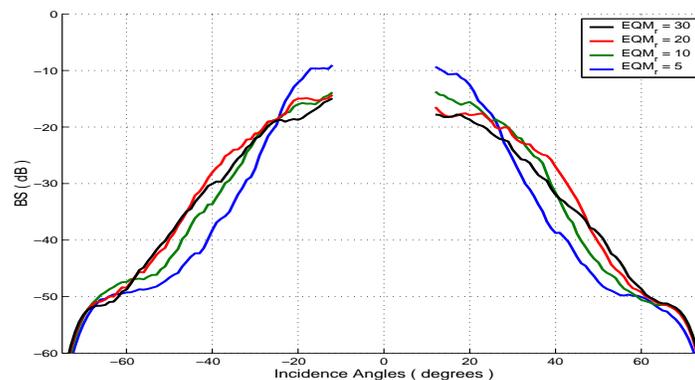


FIG. 3.11 – Représentation de l'indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour l'angle d'azimut  $90^\circ$  et pour les quatre fonds synthétiques.

La modélisation par facettes orientées est une nouvelle fois illustrée grâce à ces simulations. En fait, ces simulations montrent que l'existence de telles facettes pour l'onde dépend à la fois des caractéristiques de l'interface (dimension et structure) et de son orientation par rapport à la direction d'insonification. En effet, pour un fond parfaitement structuré, les facettes présentent toutes des orientations similaires. Dans ces conditions, seule la direction d'insonification perpendiculaire à cette orientation rétrodiffuse l'onde spéculairement (avec le maximum d'énergie). Dans le cas d'un fond déstructuré mais gardant malgré tout une orientation moyenne privilégiée, la probabilité que l'onde insonifie de telles facettes devient indépendante de la direction d'insonification. Quelle que soit la direction d'insonification, l'onde sera en interaction avec des facettes orientées perpendiculairement à sa direction d'émission.

### 3.4.3 Résultats expérimentaux

Ces résultats sont basés sur l'exploitation des données de quatre types de fonds (sable grossier, sables fins (site 2 et 5) et vase) enregistrées par le sondeur multifaisceau *EM1000*. Pour chaque site :

- ★ Les indices de rétrodiffusion de sept passes d'azimuts divers (passes n° 7, 8, 16, 17, 18, 19 et 20) ont été représentés en fonction de l'angle d'incidence. Cette représentation permet de détecter un changement de caractéristiques de la réponse du fond.
- ★ Une collection de coupes à angle fixé, est reportée selon le principe exposé dans la section précédente en coordonnées cartésiennes puis polaires. Dans le mode de représentation cartésienne, le caractère isotrope d'un fond sera représenté par des droites parallèles alors qu'en coordonnées polaires, un fond isotrope sera détecté grâce à des cercles concentriques.
- ★ Les indices de rétrodiffusion du sonar latéral complètent les données de l'EM1000 pour réaliser l'analyse. Cependant, conformément aux conclusions du chapitre (2), des écarts de niveaux en fonction du type de fonds ont été observés. Les fonds de sable grossier et de sable fin (site 5) présentent des niveaux de réponses identiques mais un décalage vertical est observé sur les indices des deux autres fonds (1 à 2 dB pour les zones de vase et de sable fin (site 2)).

Les figures (3.12), (3.13), (3.15) et (3.18) fournissent l'ensemble des résultats pour les quatre types de fonds et les deux systèmes sonars.

L'examen de ces figures permet de regrouper les deux sites de sable fin et de révéler trois types de comportement azimutal de l'indice de rétrodiffusion.

### 3.4.3.1 Sable fin (sites 2 et 5)

Dans le cas des deux fonds de sable fin (Fig. 3.12) et 3.13), les différents indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence ne présentent pas la même évolution angulaire.

Pour les angles plus proches de l'incidence verticale ( $[0^\circ - 15^\circ]$ ), l'évolution pour les deux fonds, présente une forme atypique (plateau voire augmentation de l'indice de l'angle d'incidence  $\pm 10^\circ$  jusqu'à l'angle  $\pm 15^\circ$ ). Cependant dans le cas de l'EM1000, la correction de directivité laisse encore voir des artefacts de modulations et dans celui du sonar latéral, on note une absence de données pour ce secteur angulaire. Il serait alors périlleux de conclure sur ce type de phénomène.

Dans les secteurs angulaires  $\pm[15^\circ, 40^\circ]$  pour le site 5 ( $\pm[20^\circ, 40^\circ]$  pour le site 2), les indices des sept profils montrent une dynamique de 8 dB pour les deux sites.

Pour le site 5, trois groupes de profils peuvent être regroupés :

- ★ un premier ensemble constitué des passes 7, 8 et 16, présente les niveaux les plus bas ;
- ★ un second constitué des profils 17 et 20, possède une augmentation significative (5 dB) des niveaux par rapport aux indices du premier groupe ;
- ★ pour le troisième ensemble constitué des profils 18 et 19, l'augmentation des niveaux de leur indice par rapport aux indices du premier groupe est de 7 à 8 dB.

Pour le site 2, les regroupements sont caractérisés de manière identique ; seuls les profils constituant les ensembles changent :

- ★ l'ensemble des indices minimaux est constitué des profils 19 et 20 ;
- ★ le second ensemble constitué des profils 7, 8 et 18, possède une augmentation significative (5 dB) de l'indice  $BS$  par rapport aux niveaux du premier ensemble ;
- ★ le troisième constitué des profils 16 et 17 présente une augmentation de l'indice de rétrodiffusion de 7 à 8 dB maximum par rapport aux indices du premier ensemble.

Le mode de représentation azimutal permet d'améliorer la visualisation de la dépendance à la direction d'insonification. En coordonnées cartésiennes pour le sondeur multifaisceau (Fig. 3.12 *milieu gauche*) et (Fig. 3.13 *milieu gauche*), les différences de niveau des indices sont nettement mises en évidence par des modulations sur les courbes les plus hautes. La représentation polaire des indices (Fig. 3.12 *bas gauche*) et (Fig. 3.13 *bas gauche*) met nettement en évidence le caractère anisotrope de l'indice de rétrodiffusion et permet de visualiser les directions de polarisation privilégiées. L'augmentation de l'indice de rétrodiffusion en fonction de l'azimut est caractérisée par la forme des ellipses extérieures. La direction de polarisation est clairement mise en évidence ; les plus hautes énergies sont situées sur les angles d'azimut  $90 - 120^\circ$  et  $270 - 300^\circ$  pour le site 5 et  $30 - 60^\circ$  et  $210 - 240^\circ$  pour la zone 2.

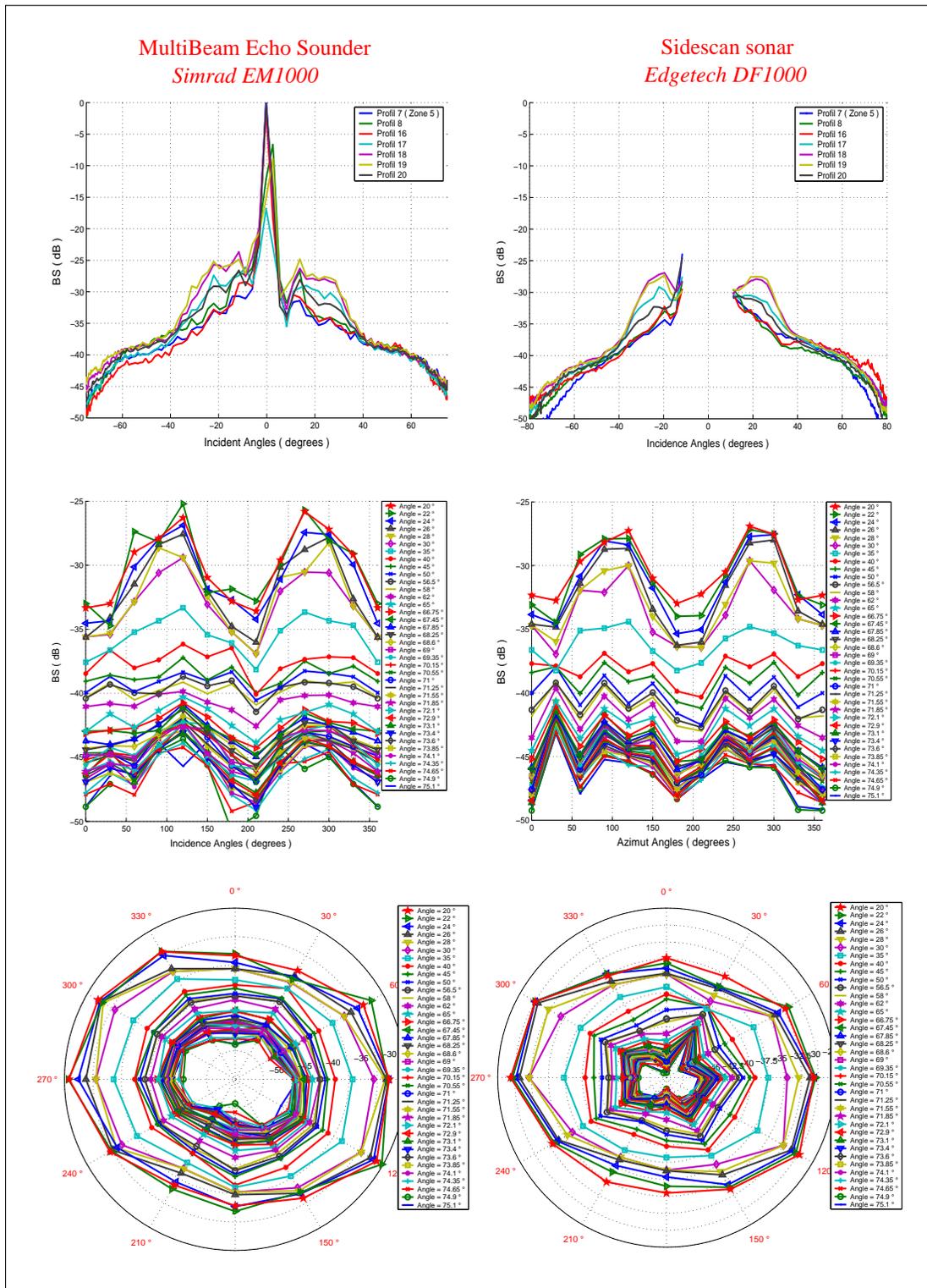


FIG. 3.12 – Fond de **sable fin (zone 5)** Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence (*haut*), de l'angle d'azimut en représentation cartésienne (*milieu*) et en représentation polaire (*bas*) pour le sondeur multifaisceau (*gauche*) et le sonar latéral (*droite*).

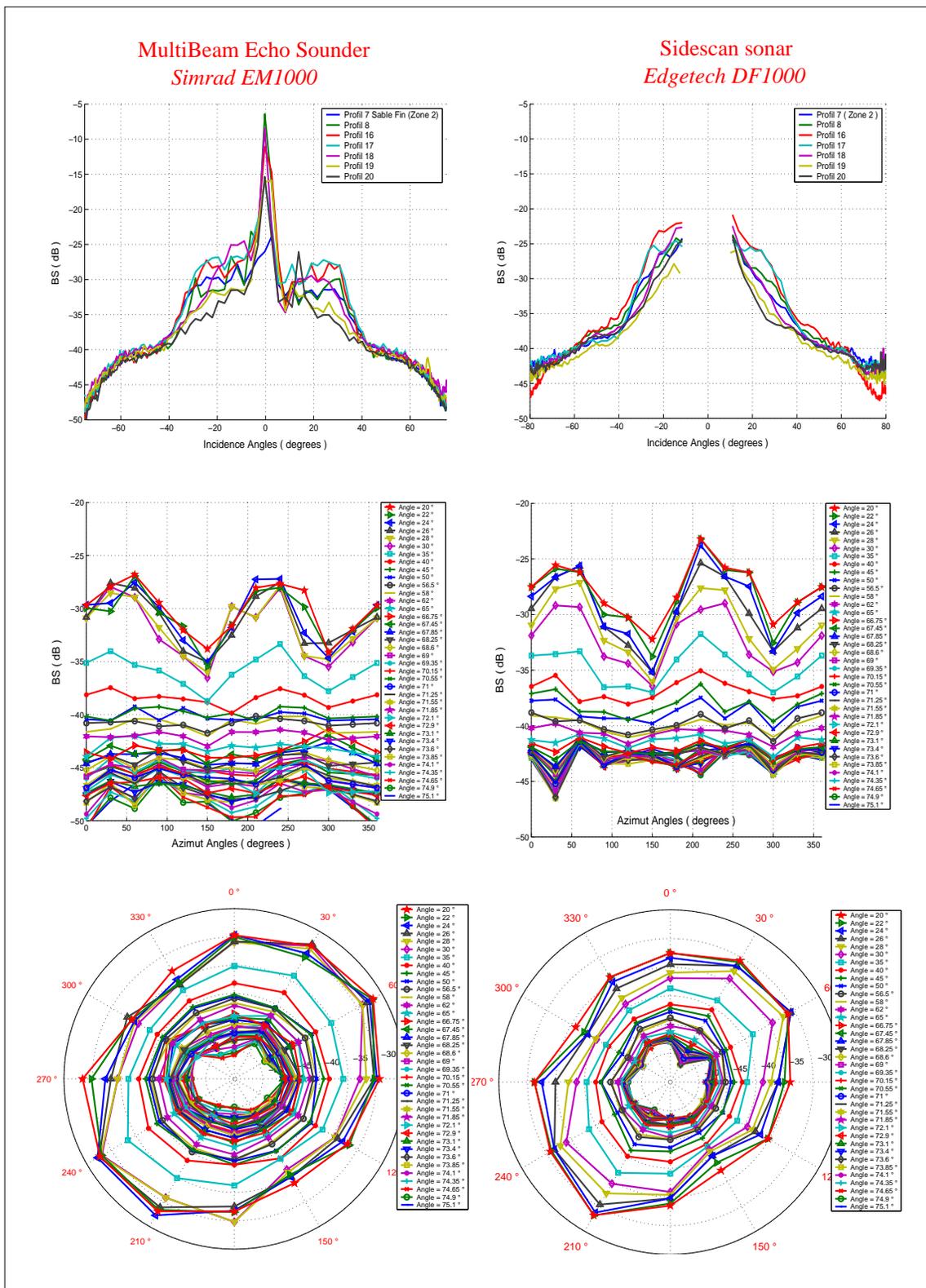


FIG. 3.13 – Fond de **sable fin (site 2)** Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence (*haut*), d'azimut en représentation cartésienne (*milieu*) et polaire (*bas*) pour le sondeur multifaisceau (*gauche*) et le sonar latéral (*droite*).

Pour les deux sites, les courbes des différents profils se rejoignent à un angle d'environ  $40^\circ$ . Pour ce type de fond, le palier des angles intermédiaires est très bref ( $\pm[40^\circ - 55^\circ]$ ). Pour le site 5, les modulations de la représentation azimutal cartésienne s'atténuent avec l'augmentation des angles d'incidence jusqu'à  $55^\circ$  où elles atteignent une amplitude de 1 à 2 dB. Sur la représentation polaire, lors du passage du secteur spéculaire aux angles intermédiaires, les ellipses se transforment peu à peu en cercles révélant le caractère isotrope des angles intermédiaires.

Les différentes évolutions en fonction de l'angle d'incidence pour les incidences rasantes tiennent dans une dynamique de 2 dB pour le site 2. Le site 5 présente un évolution asymétrique pour ces incidences. Si du côté tribord la dynamique des 7 profils est confinée dans 1 à 2 dB, un écart de l'ordre de 5 dB est observé à bâbord. Sur la représentation cartésienne, les modulations réapparaissent lorsqu'on atteint les angles d'incidence élevés, pour atteindre une amplitude de modulation de 5 dB. Pour le site 2, les modulations s'atténuent de la même manière mais ne réapparaissent pas dans ce secteur angulaire. Sur la représentation polaire, lors du passage aux incidences rasantes, les ellipses réapparaissent pour le site 5, au contraire du site 2.

Les indices de rétrodiffusion enregistrés par le sonar latéral (Fig. 3.12 *haut droite* et 3.13 *haut droite*) indiquent :

- ★ Globalement, les mêmes différences d'évolution angulaire sont observées sur les secteurs  $\pm[15^\circ, 40^\circ]$  pour le site 5 et  $\pm[20^\circ, 40^\circ]$  pour le site 2.
- ★ Les regroupements de profils effectués pour les données du sondeur EM1000 à partir de ce secteur angulaire, sont également valables pour ce système sonar.
- ★ Les différences d'évolution angulaire s'atténuent à l'angle d'incidence  $40^\circ$  pour les deux sites.
- ★ Le comportement de l'ensemble des profils est sensiblement différent pour les incidences rasantes du site 5 puisque à bâbord comme à tribord, une dynamique de cet ensemble vaut 5 dB. Pour le site 2, le comportement angulaire des incidences rasantes est le même que pour l'EM1000.

Concernant les représentations azimutales, les remarques précédentes sont également valables et les courbes décrivent ainsi les mêmes comportements.

Ces résultats justifient les remarques suivantes :

- ★ Les évènements détectés sur les indices de rétrodiffusion le sont pour les deux systèmes sonar. L'origine des variations est ainsi incontestablement due à la nature ou la configuration sédimentaire du fond marin.
- ★ Les regroupement de profils d'azimuts différents prouve que la dispersion observée sur l'ensemble des courbes de rétrodiffusion est due à la direction d'insonification. L'indice angulaire de la rétrodiffusion pour ce type de fond possède une deuxième dépendance angulaire ; elle est azimutale.
- ★ Les deux sites présentent des niveaux identiques de leurs indices. La dépendance azimutale présente le même type d'évènements (augmentation des niveaux pour des faibles angles d'incidence, réduction des différences à un angle d'incidence de  $40^\circ$ ) mais est légèrement différente pour les incidences rasantes. Les écarts de niveaux des indices sur le lobe spéculaire sont similaires aux simulations réalisées dans la section précédente.

Les ordres de grandeurs de ces écarts ne sont pourtant pas aussi élevés. L'atténuation de ces écarts s'achève à un angle d'environ  $40^\circ$ , qui n'est manifestement pas l'angle critique de ce sédiment. Une différence par rapport aux simulations est observée. Les incidences rasantes présentent des écarts qui ne correspondent pas aux simulations.

Finalement, la dispersion observée des indices sur les représentations en fonction de l'angle d'incidence pour les deux fonds, a été identifiée comme un effet dû au sens de passage du navire grâce aux représentations azimutales (cartésiennes ou polaires). Une polarisation particulière des indices de rétrodiffusion du fond insonifié a été trouvée grâce aux données issues de deux secteurs angulaires : les angles spéculaires et les incidences rasantes.

Les simulations réalisées dans la partie précédente sont globalement en bon accord avec les résultats expérimentaux exposés dans cette partie confirmant le caractère anisotrope du fond. Cependant, la dynamique de l'ensemble des indices de rétrodiffusion sur les angles d'incidence compris entre  $15^\circ$  et  $40^\circ$  est relativement faible par rapport aux simulations. Cette dynamique est sans aucun doute largement dépendante des dimensions du microrelief du fond. Une étude de la dépendance des niveaux de l'indice en fonction de la dimension du microrelief mérite d'être réalisée. Cependant, faute de temps, elle n'a pas pu être achevée dans ce mémoire.

Par ailleurs, l'examen des séquences vidéo des deux fonds de sable fin a révélé une structure particulière du relief (Fig. 3.14). Pour les deux sites, sur l'ensemble de la séquence vidéo, on trouve une alternance de microreliefs composés de rides de sable tantôt désorganisées (Fig. 3.14 *gauche*) et tantôt structurées (Fig. 3.14 *droite*). Cependant, sur l'ensemble des séquences, les deux sites sont plus généralement caractérisés par le microrelief désorganisé. La figure (Fig. 3.14 *gauche*) montre des lignes de crêtes serpenter (en noir au premier plan). Les hauteurs creux-crêtes ont été estimés à partir de ces extraits vidéo entre 2 à 3 centimètres. La figure (Fig. 3.14 *droite*) représente des rides de sable mieux organisées de longueur d'onde approximativement d'une dizaine de centimètres.

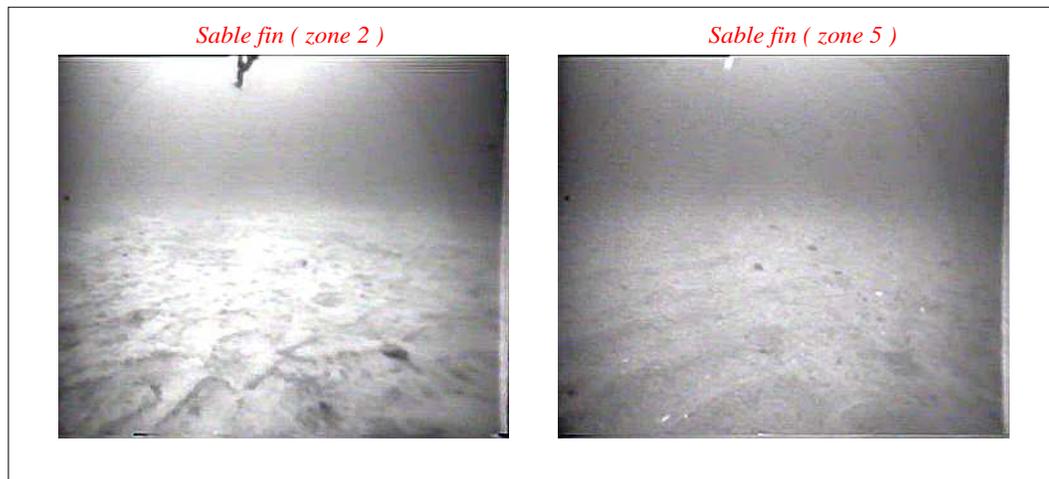


FIG. 3.14 – Extraits de la séquence vidéo enregistrée caractérisant les fonds de **sable fin** site 2 (*gauche*) et site 5 (*droite*).

### 3.4.3.2 Vase compacte (site 3)

L'ensemble des résultats pour cette zone est représenté en figure (3.15). La section (3.3.2) a mis en évidence la présence d'évènements locaux perturbateurs de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  pour les profils parallèles de ce fond. Dans cette partie, une attention particulière a été portée pour assurer l'hypothèse d'homogénéité sédimentaire dans le calcul des indices moyens de rétrodiffusion. Les indices angulaires de rétrodiffusion pour le sonar latéral présentent sur ce fond un décalage de l'ordre de 2 dB par rapport à ceux du sondeur multifaisceau.

Pour les deux systèmes sonar (Fig. 3.15 *haut gauche et droit*), la représentation en fonction de l'angle d'incidence révèle une dépendance azimutale. Aux faibles angles d'incidence, les niveaux des indices des différents profils sont sensiblement les mêmes. L'ensemble des courbes d'azimuts différents présente une dynamique de 4 dB sur le secteur allant des angles de faibles incidences  $10^\circ$  jusqu'à l'angle critique ( $65^\circ$  pour toutes les profils de cette zone et pour les deux systèmes). Aux incidences rasantes, les courbes se superposent et la dynamique de l'ensemble est de l'ordre de 1 dB. L'ensemble des indices se sépare en trois groupes de passes pour les deux systèmes sonar :

- \* le premier regroupant les passes 7, 8 et 20, représente les courbes présentant des indices angulaires minimaux sur toute la fauchée ;
- \* le second composé des profils 16 et 19 présente des indices dont le niveau est de 1 à 2 dB de plus par rapport au premier ensemble ;
- \* le dernier comprend les indices des profils 17 et 18 et présente un écart de 4-5 dB par rapport aux courbes minimales.

Les représentations cartésiennes (Fig. 3.15 *milieu gauche et droit*) montrent clairement des modulations de l'ordre de 4 à 5 dB pour les faibles angles d'incidence (courbes hautes des figures) s'atténuant en se dirigeant vers les incidences rasantes. Les diagrammes polaires exhibent des ellipses aux angles spéculaires dont la direction de plus haute énergie est orientée E.-O. En se rapprochant des incidences rasantes, les ellipses deviennent des cercles, révélateurs du caractère isotrope du fond.

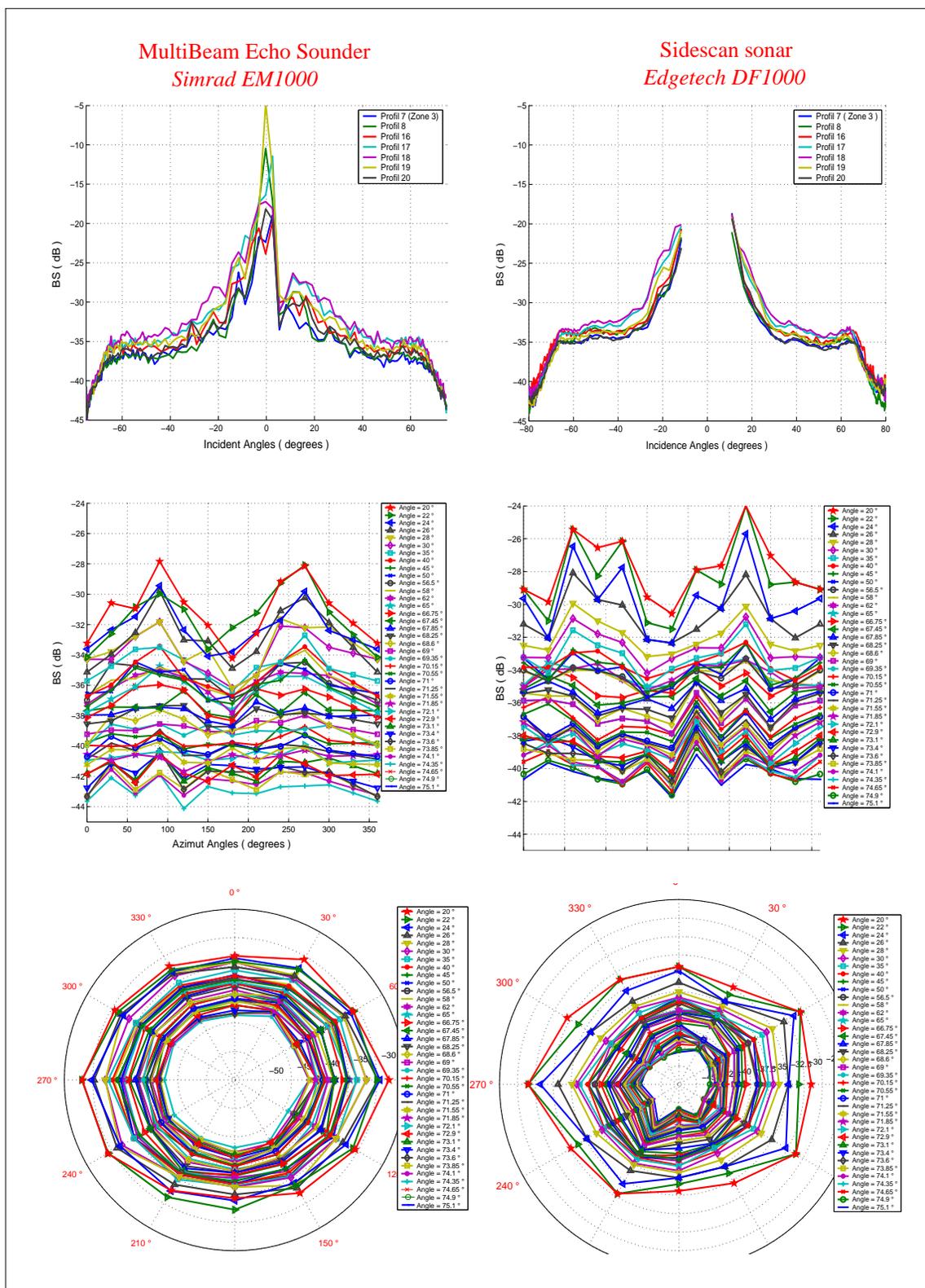


FIG. 3.15 – Fond de vase (site 3) Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence (*haut*), d'azimut en représentation cartésienne (*milieu*) et polaire (*bas*) pour le sondeur multifaisceau (*gauche*) et le sonar latéral (*droite*).

L'ensemble de ces résultats contribue à montrer que ce fond de vase compacte présente une dépendance azimutale de son indice de rétrodiffusion. Cette dépendance présente les mêmes caractéristiques que lors des simulations. Les indices sont aux mêmes niveaux pour les faibles angles d'incidence indépendamment de la direction d'insonification. La dépendance azimutale est observée sur l'ensemble des angles intermédiaires et autour de l'angle critique, les indices présentent à nouveau les mêmes niveaux. Comme pour les fonds de sable fin, la dynamique de l'ensemble des courbes est assez faible.

Cette vase rendue compacte par le mélange avec du sable fin autorise l'apparition d'un microrelief. Les séquences vidéo enregistrées in-situ révèlent un microrelief de type rides de courant (Fig. 3.16) légèrement déstructuré ; les lignes de crêtes visibles sur le bas des figures ne sont pas rectilignes. Les variations des hauteurs sont plus petites que pour le sable fin ; la hauteur creux-crêtes a été estimée sur les images vidéo à 1 centimètre.



FIG. 3.16 – Extraits de la séquence vidéo enregistrée sur le fond de **vase compacte** site 3 .

### 3.4.3.3 Sable grossier (site 4)

Ce type de fond (cf. annexe C) est composé de sable grossier présentant des rides (Fig. 3.17). Le sonar latéral détecte plus précisément que le sondeur multifaisceau, les rides de sable grâce à ses résolutions (transversale et longitudinale) plus fines et son insonification lui permettant une rasance plus marquée. Les images enregistrées par le sonar latéral sur ce site montrent nettement ces rides et plus particulièrement pour une route du navire du nord au sud (Annexe C). Ainsi, les longueurs d'onde ont pu être estimées à environ 1,20 mètres par une technique de corrélation et les lignes de crêtes sont approximativement orientées N.-S. Les angles d'incidence n'ont pu être corrigés de la pente des rides ; en effet, le modèle numérique de terrain qui a servi à la correction des angles sur le fond possède une résolution de 5 mètres qui n'est pas adaptée à l'échelle des rides.

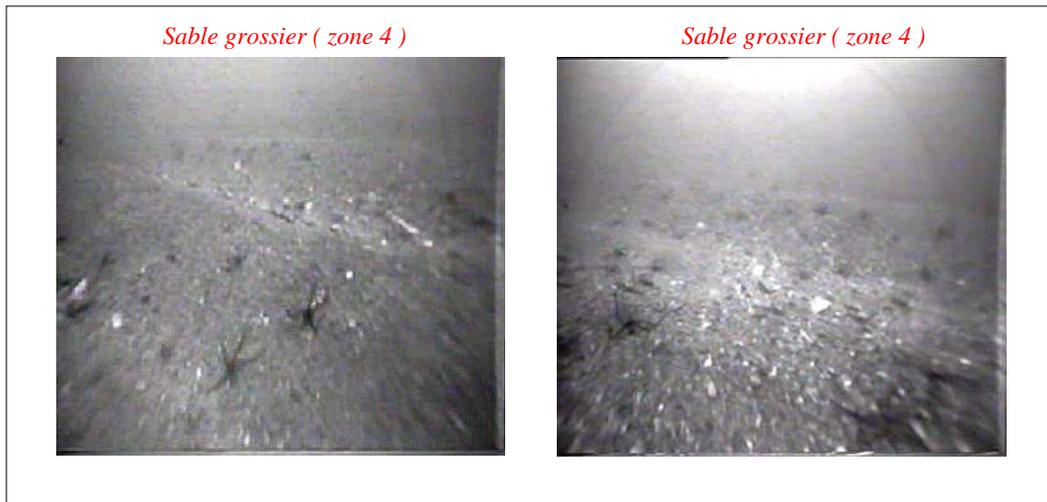


FIG. 3.17 – Extrait de la séquence vidéo enregistrée sur le fond de **sable grossier** (site 4).

Les indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence des sept profils de direction d'insonification différente sont représentés pour le sondeur multifaisceau en figure (3.18 *haut gauche*) et pour le sonar latéral en figure (3.18 *haut droit*). Le comportement de l'ensemble de ces indices pour les deux systèmes révèle une modification des indices en fonction de l'angle azimutal de passage. D'une manière générale, les indices présentent des variations rapides sur l'ensemble de la fauchée.

Pour le sonar latéral, le comportement des indices sur les incidences rasantes permet de regrouper les profils de la manière suivante :

- ★ Les profils 7, 8, 16 et 20 représentent les indices moyens où les niveaux pour les incidences rasantes sont les plus élevés et où les variations de niveaux sont très faibles.
- ★ Les passes 19 et 17 présentent des niveaux de leur indice qui décroît plus rapidement à partir de l'angle d'incidence  $55^\circ$  et qui montrent des variations rapides à partir de  $60^\circ$ . Les différences de niveaux des indices de cet ensemble atteignent 2 à 3 dB pour les incidences rasantes par rapport aux indices du premier ensemble.
- ★ Le profil 18 présente les mêmes caractéristiques que l'ensemble précédent mais décroît encore plus fortement à partir de  $55^\circ$  (jusqu'à 5 dB de différences de niveau par rapport aux indices du premier groupe) et montre de plus grandes amplitudes de variation à partir de  $60^\circ$ .

Concernant les données du sondeur multifaisceau, l'ensemble des indices présentent le même type de variations, le regroupement reste valable mais moins tranché. Le premier ensemble présente les mêmes caractéristiques pour les mêmes profils. La décroissance plus marquée des indices du second ensemble n'est observable que sur la partie tribord. Le profil 18 forme le dernier ensemble et montre les mêmes caractéristiques.

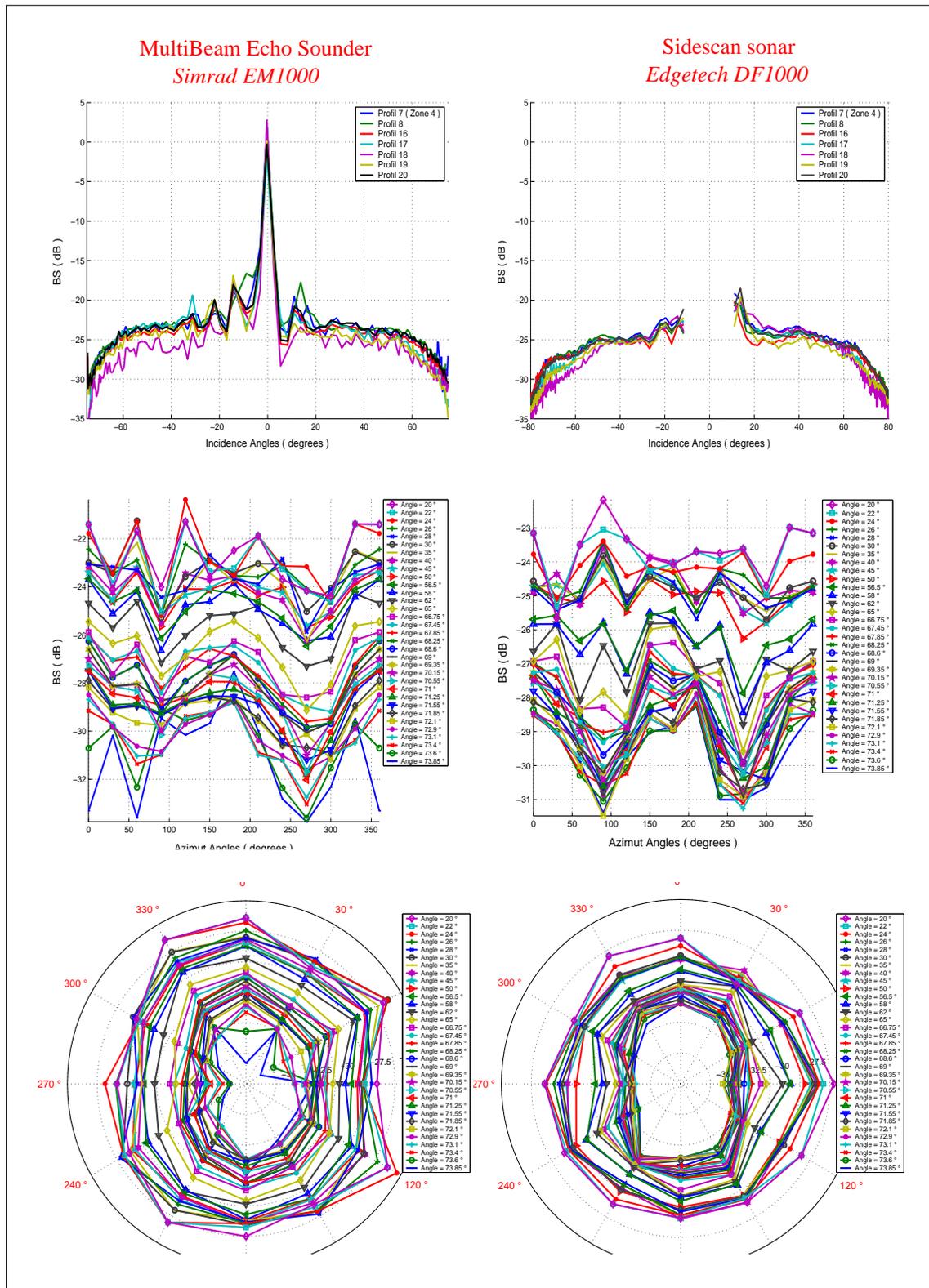


FIG. 3.18 – Fond de sable grossier (site 4) Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence (*haut*), d'azimut en représentation cartésienne (*milieu*) et polaire (*bas*) pour le sondeur multifaisceau (*gauche*) et le sonar latéral (*droite*).

Les données des deux systèmes en représentation azimutale cartésienne (Fig. 3.18 *milieu gauche et droite*) et polaire (Fig. 3.18 *bas gauche et droite*) montrent les événements suivants :

- ★ Aux faibles angles d'incidence, aucune dépendance azimutale n'est observée. Pour les angles d'incidence de  $20^\circ$  à  $50^\circ$ , les courbes de la représentation cartésienne montre peu d'amplitude (1 à 2 dB). Pour ces mêmes angles, des formes de cercles sont visibles sur la représentation polaire.
- ★ Plus les angles d'incidence augmentent, plus une structure en forme d'arche est observée pour la représentation cartésienne et plus la représentation polaire montre des formes caractéristiques d'un fond anisotrope. Les variations des courbes cartésiennes présentent des amplitudes maximales de 5dB. L'orientation des ellipses de la représentation polaire permet de déterminer les directions privilégiées du fond ; les angles d'azimut  $0^\circ$  et  $180^\circ$  sont les directions d'insonification où la plus haute énergie est observée et les angles  $90^\circ$  et  $270^\circ$  sont les directions d'énergie minimale.

Ce fond présente des comportements angulaires assez peu compréhensibles. Il présente notamment la particularité de posséder un microrelief très structuré. Les simulations ont montré que pour ce type de fond, la direction d'insonification perpendiculaire à l'orientation de ce microrelief fournit un indice de rétrodiffusion dont le lobe spéculaire est étroit mais très fort. Pour les autres directions azimutales, les indices sont globalement les mêmes et minimaux. Ces données expérimentales contredisent les simulations puisque l'indice de rétrodiffusion pour les faibles angles d'incidence est le même quelque soit l'angle d'azimut. En outre, lorsqu'on se rapproche de l'angle d'azimut  $90^\circ$ , les niveaux des indices chutent pour les incidences rasantes. Les dimensions du microrelief de ce fond ont été approximativement estimées sur les séquences vidéo pour les hauteur creux/crêtes à 10 cm et sur les images sonar pour la longueur d'onde à 1.20 mètres. Ces dimensions sont d'un ordre de grandeur différent des paramètres de simulations. De nouvelles simulations ont été réalisées avec ces nouveaux paramètres d'interface. L'impédance acoustique du sédiment constituant cet interface a aussi été modifiée pour être plus cohérente avec du sable grossier ; la célérité du sédiment est alors fixée à 1800 m/s et la densité à 2. Les autres paramètres correspondent à la description donnée dans la section précédente. La figure 3.19 montre la réalisation de ce fond pour un coefficient de structure ( $EQM_r = 20$ )

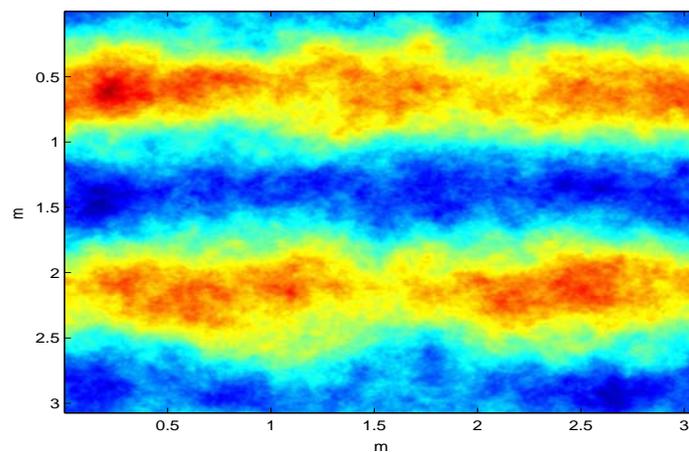


FIG. 3.19 – Fond simulé de **sable grossier** ( $EQM_r = 20$ ).

La figure 3.20 représente les résultats des indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre azimuts différents ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$ ) et pour quatre coefficient  $EQM_r$ .

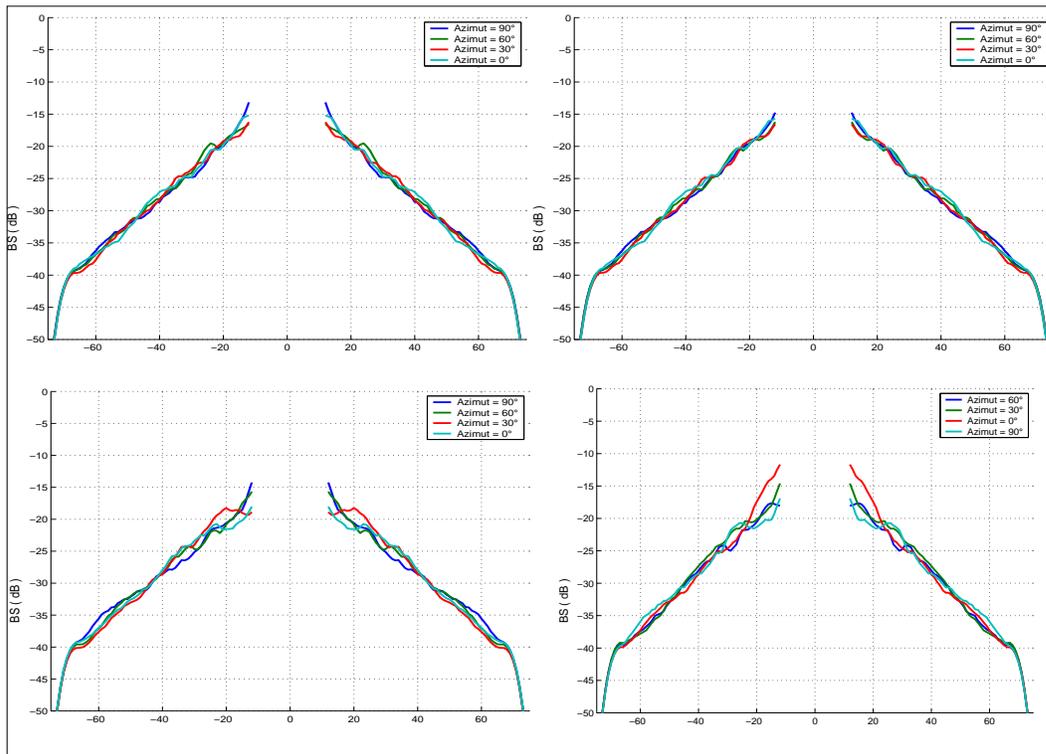


FIG. 3.20 – Indices de rétrodiffusion simulés du sable grossier pour quatre structure d'interface différente : (*haut gauche*)  $EQM_r = 5$ , (*haut droite*)  $EQM_r = 10$ , (*bas gauche*)  $EQM_r = 20$  et (*bas droite*)  $EQM_r = 30$ .

Les résultats de simulation ne montrent aucune dépendance azimutale pour ce fond. Les indices de rétrodiffusion simulés présentent des niveaux très stables sur toute la fauchée, quelle que soit la source de variations (structure de l'interface et/ou direction d'insonification). En particulier, aucune variations n'est observées pour les incidences rasantes.

Ces simulations confirment donc globalement les résultats expérimentaux. Pour ces dimensions de microrelief, la variation de la direction d'insonification n'entraîne pas un élargissement de l'influence spéculaire dû à l'existence de facettes orientées. Cependant, aucune explication n'a été trouvée concernant la baisse des niveaux observée sur certains indices expérimentaux.

La comparaison avec les résultats expérimentaux peut être mise en cause car les comportements angulaires obtenus par simulation présentent des différences d'évolution angulaire. Le niveau général est grossièrement le même (autour de  $-25$  dB) mais les données expérimentales possèdent une évolution angulaire très plate pour les angles intermédiaires alors que les données de simulation présentent une pente très marquée. L'extrait vidéo (Fig. 3.17) montre la difficulté de modéliser précisément ce type de fond. La présence de rides de courant de grande dimension (10 cm creux/crêtes) a permis l'accumulation de débris de toutes origines et en particulier de coquilles. Les simulations ne prétendent pas pouvoir recréer un tel environnement complexe. L'origine de la dépendance angulaire évoquée au paragraphe

précédent pourrait être due à la présence de tels débris coquillés. Insonifié pour les faibles incidences quelle que soit la direction d'insonification, ces éléments contribuent fortement à l'indice de rétrodiffusion. En incidences plus rasantes et pour une direction d'insonification perpendiculaire aux lignes de crêtes, les débris se trouvent alors dans l'ombre acoustique des rides et le niveau de l'indice est moins élevé.

### 3.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, l'exploitation des indices énergétiques moyens de rétrodiffusion corrigés des artefacts dus au milieu de propagation et aux caractéristiques du système d'acquisition a été entreprise.

La dépendance angulaire "classique" pour divers types de fonds a été étudiée. Cette étude a conforté une nouvelle fois ce descripteur comme fortement discriminant du type de fond. Les indices de rétrodiffusion de deux types de fonds dissemblables (roches et sable grossier) ont été trouvés très proches sur un secteur angulaire important montrant les limites de ce descripteur. Il permet néanmoins une extraction d'information essentiel pour le processus de caractérisation.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'analyse azimutale de l'indice de rétrodiffusion. Basée sur des simulations, cette analyse a révélé des variations importantes de niveaux pour des configurations d'interface eau/sédiment différentes. Les données expérimentales ont permis de valider les conclusions réalisées sur les simulations. Cette étude permet prendre conscience de l'importance de la structure de l'interface en prenant garde à son orientation par rapport à sa direction d'insonification, sur les indices enregistrées par un système sonar.

Dans un contexte de caractérisation des fonds marins, ces conclusions mettent en évidence les difficultés du problème inverse, l'unicité de la solution n'étant pas garantie. En particulier, ce chapitre a montré la nécessité de prendre en considération une description à deux dimensions des caractéristiques d'interface souvent négligées dans les modèles disponibles.

Pour le problème de la discrimination des fonds marins, l'utilisation de l'indice de rétrodiffusion angulaire est nécessaire dans un processus de segmentation mais non suffisant. Ce seul paramètre permet en général de séparer grossièrement les différentes classes de sédiments mais d'autres paramètres doivent affiner la classification.



# Chapitre 4

## Exploitation des statistiques de la rétrodiffusion

### 4.1 Introduction

Le chapitre précédent a montré l'intérêt de l'indice de rétrodiffusion angulaire dans la classification des fonds marins. La discrimination avec ce seul descripteur montre cependant des limites. D'une part, deux fonds différents peuvent présenter des indices de rétrodiffusion identiques et d'autre part, l'indice d'un seul fond montre des évolutions angulaires variables suivant la direction azimutale d'insonification. Ces deux caractéristiques engendrent des "fausses alarmes" dans les algorithmes de segmentation et des interprétations erronées des paramètres géoacoustiques inversés.

Après l'interprétation de la moyenne de l'indice de rétrodiffusion, l'extraction d'informations peut être envisagée sur l'ensemble des statistiques des intensités des signaux rétrodiffusés. Lorsqu'on s'intéresse aux moments d'ordre supérieur, les modélisations physiques ne sont plus adaptées à des développements analytiques trop complexes. La première partie de ce chapitre réalise une synthèse des différents modèles statistiques existants ; établissant les différentes variables porteuses d'informations pour la caractérisation des fonds marins. La seconde partie porte sur l'application de ces modèles aux signaux enregistrés par les systèmes sonars. Leurs caractéristiques particulières d'acquisition engendrent des changements des statistiques le long de la fauchée d'insonification. Enfin, dans une dernière partie, un nouveau modèle est proposé pour relier cette évolution aux paramètres géoacoustiques.

### 4.2 Modèles statistiques de la rétrodiffusion

#### 4.2.1 Modèle des points réverbérants - Lien entre modélisations physiques et statistiques

L'équation du sonar donne la valeur complexe mesurée  $\mathcal{Z}$  d'un pixel à la position  $\xi = (x, y)$  ; celle-ci peut-être vue comme la convolution du champ statistique complexe de rétrodiffusion  $\mathcal{BS}$  par la réponse impulsionnelle du capteur  $h$  ([Oli 98]) :

$$\mathcal{Z}(\xi) = C.\mathcal{BS}(\xi) * h(\xi). \quad (4.1)$$

où la constante  $C$  regroupe les corrections classiques de distance (dues à la divergence sphérique et à l'absorption), de diagramme d'antenne et d'aire insonifiée et  $*$  est l'opérateur de convolution.

Soient  $\mathcal{Z}_i$  et  $\mathcal{Z}_q$  les parties réelles et imaginaires de  $\mathcal{Z}$  définies par :

$$\begin{cases} \mathcal{Z}_i = \Re(\mathcal{Z}) &= A. \cos(\phi), \\ \mathcal{Z}_q = \Im(\mathcal{Z}) &= B. \sin(\phi). \end{cases} \quad (4.2)$$

L'**amplitude** et l'**intensité** mesurées sont dérivées de  $\mathcal{Z}$  par :

$$\begin{cases} A(\xi) = |\mathcal{Z}(\xi)| &= |C| \int_{\mathbb{R}} [\mathcal{BS}(\xi_1)h(\xi - \xi_1)] \partial\xi_1; \\ I(\xi) = |\mathcal{Z}(\xi)|^2 &= |C|^2 \int_{\mathbb{R}^2} [\mathcal{BS}(\xi_1)\mathcal{BS}^*(\xi_2)h(\xi - \xi_1)h^*(\xi - \xi_2)] \partial\xi_1 \partial\xi_2. \end{cases} \quad (4.3)$$

Alors que les modélisations physiques de la rétrodiffusion tentent de lier les paramètres acoustiques aux paramètres géologiques (chapitres 1 et 3), l'objectif des descriptions statistiques est plus pragmatique. Sans s'attacher à reproduire exactement la réalité (physique), ces modèles représentent une alternative pour l'interprétation de phénomènes pour lesquels une étude exhaustive de tous les facteurs est impossible, à cause de leur grand nombre ou de leur complexité. Ils se basent souvent sur des hypothèses plus simples décrivant les phénomènes rencontrés.

En particulier, les différentes modélisations statistiques de la rétrodiffusion font l'hypothèse que la surface<sup>1</sup> est constituée d'un ensemble de  $N_d$  diffuseurs élémentaires quasi-punctuels contribuant de manière individuelle à la réponse totale de  $\mathcal{Z}(\xi)$ . Ces diffuseurs sont généralement appelés **points brillants ou réverbérants**. Ainsi, la distribution statistique de rétrodiffusion  $\mathcal{BS}$  peut être exprimée par :

$$\mathcal{BS}(\xi) = \sum_{n=1}^{N_d} e_n(\xi_n)\delta(\xi - \xi_n); \quad (4.4)$$

où  $e_n$  et  $\xi_n$  sont définis par la contribution du point réverbérant  $n$  de coordonnées  $\xi_n = (x_n, y_n)$ .  $\delta$  est la fonction de Dirac.

L'équation (4.1) est alors discrétisée et la mesure complexe  $\mathcal{Z}$  devient :

$$\mathcal{Z}(\xi) = C \sum_{n=1}^{N_d} e_n(\xi_n)h(\xi - \xi_n). \quad (4.5)$$

En supposant que la contribution du diffuseur  $n$  est définie par une amplitude  $a_n$  et une phase  $\phi_n$ ,

$$\mathcal{Z}(\xi) = Ae^{j\phi} = \sum_{n=1}^{N_d} a_n e^{j\phi_n}. \quad (4.6)$$

A l'échelle d'un pixel, les propriétés physiques (amplitudes  $a_n$ ) et la répartition (phases  $\phi_n$ ) des diffuseurs élémentaires sont déterministes. Pourtant, à l'échelle de la surface, ces

<sup>1</sup>voire le volume lorsque l'onde pénètre dans le sol.

propriétés deviennent aléatoires ; la répartition spatiale des diffuseurs au sein de la cellule de résolution, ainsi que les variations de leurs caractéristiques physiques, font de  $a_n$  et  $\phi_n$  des variables aléatoires ainsi que toutes les variables dérivées. En particulier, la réponse complexe  $\mathcal{Z}$  décrite par (4.6) apparaît comme une marche aléatoire dans le plan complexe où chaque pas de longueur  $a_n$  possède une direction complètement aléatoire. Il en résulte de fortes variations de l'amplitude et de la phase du signal reçu, que l'on appelle **speckle**.

En pratique, les amplitudes et phases des contributions individuelles sont par définition inobservables ; leur taille est en effet généralement plus petite que la résolution du système d'imagerie et leur existence n'est traduite que par l'existence du speckle. La formulation (4.6) montre que le signal observé  $\mathcal{Z}$  sera affecté par des phénomènes d'interférences dus aux différences de phase entre diffuseurs.

Le **speckle** est essentiellement un phénomène d'interférences dont le caractère bruité provient de la distribution des phases  $\phi_n$  des diffuseurs élémentaires. Typiquement, la résolution des systèmes d'imagerie est largement supérieure à la longueur d'onde. Les diffuseurs à différents endroits de la cellule de résolution vont alors contribuer à la réponse totale avec des phases très différentes même si leurs propriétés de rétrodiffusion sont en moyenne identiques. C'est pourquoi, **la phase  $\phi_n$  sera supposée uniformément distribuée** sur  $[-\pi, \pi]$  et **indépendante de l'amplitude  $a_k$** .

L'analyse de ce modèle suggère que les réponses enregistrées par un système d'imagerie contiennent deux types d'informations :

- ★ L'existence d'un bruit de speckle témoigne de la présence, voire de l'organisation à l'intérieur de la cellule de résolution des diffuseurs élémentaires (par le biais de la distribution des phases). L'échelle de résolution de ces informations est inférieure à la résolution du système définissant des informations de microreliefs.
- ★ Les propriétés physiques des diffuseurs donnent des informations sur les caractéristiques du fond (amplitudes des diffuseurs élémentaires) à une échelle plus grande ; le macrorelief.

L'analogie de cette découpe avec les modélisations physiques de la rétrodiffusion (section 1.3) est nette. En particulier, les nouvelles approches basées sur les approximations des faibles pentes, incorporent précisément cette notion d'échelle et aboutissent à un modèle, produit de deux variables dont le premier terme est dû aux caractéristiques géoacoustiques et le second aux effets du microrelief ([Gra 01]).

La suite présente les différents modèles existants dans la littérature, dont les principales différences résident dans les hypothèses faites sur la surface au travers des variables aléatoires  $a_n$  et  $N_d$ . Il est alors intéressant de bien comprendre le lien entre ces variables et la surface. Ainsi, Maître ([Maî 01]) définit le concept de **surface homogène et hétérogène** vis à vis de la théorie des points réverbérants. Une surface sera considérée comme homogène si "les diffuseurs, tout en restant en nombre constant ( $N_d$  constant<sup>2</sup>) et en appartenant à la même population statistique ( $\mathbb{E}[a^2]$  est constant), changent d'un pixel à l'autre".

Les différents modèles sont divisés en deux familles : les modèles gaussiens et les modèles non-gaussiens.

<sup>2</sup>Certains auteurs ([Jak 78] et [Oli 98]) atteignent cette condition en supposant d'une part  $N_d$  comme v.a et d'autre part que  $\mathbb{E}[N_d^k] / \mathbb{E}[N_d]^k \xrightarrow{\mathbb{E}[N_d] \rightarrow \infty} 1$ .

## 4.2.2 Modèle gaussien du speckle totalement développé

### 4.2.2.1 Hypothèses

Le modèle gaussien du chatonnement pleinement développé résulte des hypothèses suivantes ([Goo 84]) :

- i - Le nombre  $N_d$  de diffuseurs par cellule de résolution est suffisamment important. La condition dépend évidemment du type de fond mais elle est généralement satisfaite si la résolution spatiale est largement supérieure à la longueur d'onde.
- ii - L'amplitude  $a_n$  et la phase  $\phi_n$  du diffuseur  $n$  sont indépendantes de celles des autres diffuseurs. Les interactions entre diffuseurs sont ainsi négligées.
- iii - Pour chaque diffuseur, l'amplitude et la phase sont indépendantes entre elles.
- iv - Les amplitudes  $a_n$  sont identiquement distribuées et leurs deux premiers moments sont  $\mathbb{E}[a]$  et  $\mathbb{E}[a^2]$ .
- v - Les phases  $\phi_n$  sont uniformément distribuées sur  $[-\pi, \pi]$  quand la surface est rugueuse à l'échelle de la longueur d'onde.

La surface est supposée homogène; les seuls sources de fluctuations proviennent de la disposition aléatoire des diffuseurs dans la cellule de résolution. Les modèles issus d'une hypothèse de surface non homogène ( $N_d$  et  $\mathbb{E}[a^2]$  varient) seront présentés en (4.2.3).

### 4.2.2.2 Distribution des variables dérivées

Comme  $N_d$  est supposé grand (condition i),  $\mathcal{Z}_i$  et  $\mathcal{Z}_q$ , sommes de  $N_d$  variables aléatoires identiquement distribuées et indépendantes, sont distribuées selon une loi gaussienne en vertu du théorème central limite. De plus, leur moyenne est nulle et leur variance  $R/2$  est déterminée par les amplitudes élémentaires  $\{a_n; n = 1, \dots, N_d\}$  ([Maî 01]) :

$$R = \sum_{n=1}^{N_d} |e_n(\xi_n)|^2 |h(\xi - \xi_n)|^2 = \sum_{n=1}^{N_d} |a_n|^2. \quad (4.7)$$

Nous pouvons ainsi définir la variable  $R$  comme la **réflectivité sous-jacente à la scène** représentant le pouvoir réflecteur de la cellule de résolution.

Enfin, la propriété  $\mathbb{E}[\mathcal{Z}_i \mathcal{Z}_q] = 0$  assure leur indépendance car elles sont gaussiennes. Leur densité de probabilité jointe est donnée par :

$$f_{(\mathcal{Z}_i, \mathcal{Z}_q)}(\mathcal{Z}_i, \mathcal{Z}_q) = \frac{1}{\pi R} e^{-\frac{\mathcal{Z}_i^2 + \mathcal{Z}_q^2}{R}}. \quad (4.8)$$

**Amplitude, phase et intensité** Le changement de variables

$$(\mathcal{Z}_i, \mathcal{Z}_q) \rightarrow \left( A = \sqrt{\mathcal{Z}_i^2 + \mathcal{Z}_q^2}, \phi = \arctan\left(\frac{\mathcal{Z}_q}{\mathcal{Z}_i}\right) \right), \quad (4.9)$$

permet d'obtenir la distribution conjointe de l'amplitude et de la phase totale :

$$f_{(A, \phi)|R} = f_{A|R} \cdot f_{\phi}. \quad (4.10)$$

La phase, l'amplitude et l'intensité possèdent les propriétés suivantes :

- ★ La **phase totale**, indépendante de l'amplitude et **uniformément distribuée** sur  $[-\pi, \pi]$ , ne semble porter aucune information. Cependant, elle joue un rôle dans la détermination de la réponse impulsionnelle du capteur importante pour l'étude des propriétés corrélatoires spatiales ([Oli 94]).
- ★ L'**amplitude**  $A = |\mathcal{Z}|$  est distribuée selon la **loi de Rayleigh** (une description de la loi est donnée en annexe B.1) :

$$f_A(A) = \frac{2A}{R} \cdot \exp\left(-\frac{A^2}{R}\right) \text{ avec } A \geq 0. \quad (4.11)$$

- ★ L'**intensité**  $I = A^2$  est distribuée selon une **loi exponentielle négative** (cf. B.3) :

$$f_{I|R} = \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{I}{R}\right). \quad (4.12)$$

Excepté la distribution de la phase, les autres variables sont caractérisées par un seul paramètre  $R$  portant toute l'information de la cible : l'intensité moyenne ([Maî 01]). Le chatoiement totalement développé est caractérisé, à l'échelle d'un pixel, par le seul paramètre  $R$ , autour duquel l'intensité rétrodiffusée fluctue fortement en raison de légers déplacements des diffuseurs. Le chatoiement est dit totalement développé car dans ces conditions la dispersion des données est maximale et donc la plus pénalisante ([Maî 01]).

#### 4.2.2.3 Modèle produit

Le modèle des points réverbérants implique donc que toute l'information est portée par la moyenne incohérente de l'intensité  $R$  pour une configuration spatiale des diffuseurs. En réalisant le changement de variables

$$I = R.S, \quad (4.13)$$

la densité de probabilité de  $S$  est obtenue à partir de (4.12) :

$$f_S(S) = e^{-S} \text{ avec } S \geq 0. \quad (4.14)$$

L'intensité rétrodiffusée observée en chaque pixel est définie par un terme de réflectivité sous-jacente modulé par le phénomène d'interférences (speckle exponentiellement distribué et de moyenne unitaire). Cette formulation a mené à une description du speckle en terme d'un bruit multiplicatif, même s'il s'agit d'un processus réitérable dû aux interférences. L'équation (4.13) définit alors le **modèle produit**.

Basé sur une hypothèse simple de surface (tous les diffuseurs sont identiques, seule leur disposition change), ce modèle ne reflète pas toujours la réalité géologique. En effet, outre la présence du speckle, le pixel est caractérisé par un seul paramètre  $R$  déterministe.

D'une part, les propriétés (nombre de diffuseurs, dispositions et caractéristiques énergétiques) de la surface peuvent fluctuer ; l'hypothèse d'un seul paramètre déterministe  $R$  est alors trop simpliste pour tenir compte de la complexité de la nature sédimentaire. D'autre part, pour caractériser une surface (de manière statistique), nous sommes obligés de considérer un ensemble de  $N$  pixels, mettant en cause l'hypothèse du seul paramètre  $R$ . Ainsi, de manière à modéliser ce type de surface, un ensemble de modèles statistiques ou de lois mathématiques ont été proposés. La partie suivante (4.2.3) propose une synthèse de cet ensemble.

### 4.2.3 Modèle de chatoiement non gaussien

#### 4.2.3.1 Introduction

Le modèle de chatoiement gaussien est parfois trop simpliste ; les causes d'apparition d'un chatoiement non gaussien sont résumées ci-après :

- ★ Lorsqu'un seul diffuseur dans la cellule de résolution domine le processus, les hypothèses du théorème central limite ne sont plus vérifiées. La distribution de l'intensité rétrodiffusée est alors une loi de Nagakami-Rice ([Goo 84]).
- ★ Dans (4.6), il se peut que le nombre de diffuseurs  $N_d$  soit une variable aléatoire. Alors l'intensité rétrodiffusée apparaît comme le produit d'une fluctuation de réflectivité sous-jacente par un terme de speckle. Il s'agit d'une généralisation du modèle produit introduit au paragraphe précédent.
- ★ Si la surface n'est plus stationnaire, elle est considérée comme hétérogène et peut être traitée comme un mélange de modèle gaussien ou comme un mélange des lois des variables dérivées de la variable complexe dans le cadre gaussien.

Dans les domaines d'imagerie (radar, sonar, médicale), les études portant sur les distributions statistiques de la rétrodiffusion sont divisées en deux types d'approches :

- ★ l'approche physique/statistique propose d'établir un lien avec les propriétés physiques de la cible ;
- ★ l'approche paramétrique tente d'ajuster précisément les données, pour l'utilisation d'un processus de classification/segmentation par exemple. Un ensemble de lois a été testé pour répondre à cet impératif.

**L'approche choisie dans cette étude est l'approche physique.** Son intérêt réside dans le développement d'un descripteur géoacoustique. Ainsi, les développements de ce type d'approche seront exposés tout au long de cette partie. Les lois utilisées pour ajuster les données seront énumérées en section (4.2.3.3).

#### 4.2.3.2 Approche physique du chatoiement non gaussien

Ce paragraphe s'appuie sur la modélisation du chatoiement issue des points réverbérants. Contrairement à la partie précédente, le nombre effectif de diffuseurs par cellule de résolution est supposé non constant d'une cellule à une autre. D'autre part, la surface sera supposée hétérogène (non-stationnaire et  $\mathbb{E}[a^2]$  aléatoire). Enfin, l'hypothèse d'une réverbération obtenue en présence d'un seul diffuseur dominant les autres (aboutissant à une loi de Nagakami-Rice pour l'intensité) ne sera pas étudiée.

**4.2.3.2.1 Modèle produit** Le modèle produit décrit par l'équation (4.13) est valable uniquement dans le cas où le nombre de diffuseurs  $N_d$  est non seulement grand mais constant. Lorsque ce nombre varie de manière organisée, de la texture apparaît ([Maî 01]). Dans le cas où le nombre moyen de diffuseurs  $\mathbb{E}[N_d]$  est élevé pour chaque cellule de résolution (quelle que soit la distribution de  $N_d$ ), Oliver ([Oli 98]) montre que le champ complexe de rétrodiffusion  $\mathcal{Z}$  peut alors être représenté par un produit de deux processus indépendants :

$$\mathcal{Z} = \mathcal{T} \cdot \mathcal{G}, \tag{4.15}$$

où  $\mathcal{T}$  est une variable aléatoire de texture et  $\mathcal{G}$  est un processus gaussien.

Les moments de  $\mathcal{T}^2$  sont reliés à ceux de  $N_d$  par la relation :

$$\mathbb{E} [\mathcal{T}^{2k}] = \frac{\mathbb{E} [N_d^k]}{\mathbb{E} [N_d]^k} \quad (4.16)$$

Deux propriétés se dégagent :

★  $\mathbb{E} [\mathcal{T}^2] = 1,$

★  $\mathcal{G}$  porte la structure de covariance de  $\mathcal{Z}$  :  $\mathbb{E} [\mathcal{Z}\mathcal{Z}^*] = \mathbb{E} [\mathcal{G}\mathcal{G}^*].$

En effectuant les changement de variables

$$(\mathcal{G}, \mathcal{T}) \rightarrow (R = |\mathcal{G}|^2, S = |\mathcal{T}|^2), \quad (4.17)$$

il vient

$$I = |\mathcal{Z}|^2 = R.S; \quad (4.18)$$

avec les propriétés  $\mathbb{E} [S] = 1$  et  $\mathbb{E} [I] = \mathbb{E} [R]$ . On retrouve alors les propriétés décrites au paragraphe précédent pour une réflectivité sous-jacente  $R$  devenue aléatoire.

Le modèle produit décrit ici, possède les mêmes propriétés que précédemment. En particulier, les fluctuations du speckle sont plus rapides que celles de la réflectivité, décrivant une découpe en deux échelles (cf. 4.2.2.3). Ainsi, le *speckle* est la conséquence de la distribution aléatoire de diffuseurs alors que la réflectivité  $R$  dépend des propriétés physiques de ceux-ci.

A ce stade, en gardant les propriétés statistiques du *speckle* (loi exponentielle de moyenne 1) et en vertu de l'indépendance des deux processus, la distribution de l'intensité rétrodiffusée est donnée par :

$$f_I(I) = \int_{\mathbb{R}^+} \left[ f_S\left(\frac{I}{R}\right) f_R(R) \right] dR. \quad (4.19)$$

$$= \int_0^{+\infty} \frac{e^{-\frac{I}{R}}}{R} f_R(R) dR. \quad (4.20)$$

Ainsi, la prochaine étape se basera sur la détermination de la distribution de la réflectivité sous-jacente.

**4.2.3.2.2 Distribution de R** Ayant défini la contribution du speckle au modèle produit, l'étape suivante consiste à envisager celle de la réflectivité sous-jacente  $R$ . De nombreuses recherches ont été effectuées quant à la loi de la réflectivité sous-jacente. La loi  $\Gamma$  (B.4) est la loi la plus utilisée pour décrire cette variable.

$$f_R(R) = \left( \frac{\nu}{\mathbb{E}[R]} \right)^\nu \frac{R^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} e^{-\frac{\nu R}{\mathbb{E}[R]}}. \quad (4.21)$$

Par exemple, Ward ([War 81]) a montré que l'écho reçu par un radar satellitaire provenant de la mer avait une composante (liée à la houle) distribuée selon une loi  $\Gamma$ . La loi  $\Gamma$  a été proposée pour décrire les statistiques des phénomènes hiérarchiques et fractaux, bien adaptés à modéliser les surfaces naturelles ([Jak 87]).

Si  $N_d$  est contrôlé par un processus de naissance, mort et migration (permettant de modéliser l'évolution d'une surface naturelle), les statistiques de la population correspondante

sont binomiales négatives. Or la loi  $\Gamma$  est considérée comme l'analogue de la loi (discrète) binomiale négative dans le domaine continu. La variable aléatoire continue  $R = |\mathcal{G}|^2$  est une distribution  $\Gamma$  de moyenne 1 et de paramètre d'ordre  $\nu$ .

La loi  $\Gamma$  n'est pas la seule loi utilisée pour caractériser la texture d'une image. Par exemple, la loi  $\beta$  et plus généralement toutes les lois issues du système de Pearson ont été proposées pour obtenir l'adéquation la plus juste aux données dans le cadre du modèle produit. Cependant, celles-ci ne bénéficient pas de l'interprétation physique de la loi  $\Gamma$ .

**4.2.3.2.3 Distributions de I et A** Sous les hypothèses précédentes (lois de  $R$  et  $S$ ), l'intensité et l'amplitude rétrodiffusées sont distribuées selon une loi  $\mathcal{K}$  de paramètre  $\mu$  et  $\nu$  ([Jak 78]) :

$$f_I(I) = \frac{2}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^{\frac{\nu+1}{2}} I^{\frac{\nu-1}{2}} K_{\nu-1} \left[ 2\sqrt{\frac{\nu I}{\mu}} \right]; \quad (4.22)$$

$$f_A(A) = \frac{4}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^{\frac{\nu+1}{2}} A^{\nu} K_{\nu-1} \left[ 2A\sqrt{\frac{\nu}{\mu}} \right], \quad (4.23)$$

où  $K_{\nu-1}$  est la fonction modifiée de Bessel de seconde espèce d'ordre  $\nu - 1$ .

Le lecteur trouvera en annexe (B.7) les différentes méthodes d'estimation des paramètres de la loi  $\mathcal{K}$ . La loi  $\mathcal{K}$  a été utilisée la première fois par Jakeman et Pusey ([Jak 76]) pour décrire les statistiques de la diffusion issue de la surface de la mer. Elle présente les caractéristiques suivantes :

- ★ La loi de Rayleigh est une forme limite de la loi  $\mathcal{K}$  lorsque  $\nu \rightarrow +\infty$ .
- ★ Le paramètre de forme  $\nu$  de la loi  $\mathcal{K}$  est égal au paramètre de forme de la loi  $\Gamma$  de la réflectivité sous-jacente.
- ★ Le paramètre  $\mu$  est un paramètre d'échelle dont l'estimateur est la moyenne.

### 4.2.3.3 Approche paramétrique du chatoiement non gaussien

A l'instar des modélisations physiques de l'indice de rétrodiffusion (cf. section 1.3.2), de nombreuses lois ont été proposées pour ajuster le plus exactement possible les distributions empiriques. C'est le principal avantage de ce type de loi qui ne possèdent aucun lien avec une description en terme géoacoustique du fond. Parmi celles ayant été appliquées avec succès, citons les lois du système de Pearson (autres que la loi  $\mathcal{K}$ ), les lois  $\Gamma$  généralisées, log-normale, de Weibull et les mélanges de lois de Rayleigh dont les expressions sont données en Annexe B.

## 4.3 Applications aux données des systèmes sonar

Les systèmes sonars ont été largement utilisés pour déterminer les distributions statistiques de la rétrodiffusion des fonds marins. L'intérêt pour la description et la modélisation des distributions s'est accru particulièrement depuis le développement de systèmes sonars haute-résolution. De tels systèmes ont été développés dans le but d'augmenter les performances de détection en abaissant les niveaux d'interférences à l'intérieur de chaque cellule de résolution. Malheureusement, les distributions sont alors caractérisées par une longue queue par rapport à la traditionnelle loi de Rayleigh/exponentielle dérivée du modèle gaussien.

La loi de Rayleigh est produite lorsque le nombre de diffuseurs dans la cellule de résolution est suffisamment important pour que le théorème central limite (**TCL**) soit vérifié. Les statistiques non-Rayleigh apparaissent lorsque les hypothèses du TCL ne sont pas vérifiées. L'origine peut être un petit nombre de diffuseurs dans la cellule de la résolution ou des diffuseurs caractérisés par des variables aléatoires non identiquement distribuées. Dans tous les cas, les différents modèles statistiques de la rétrodiffusion ont mis en évidence le rôle déterminant du nombre de diffuseurs dans la cellule de résolution. Ceci implique qu'une étude des statistiques de la rétrodiffusion doit tenir compte à la fois des caractéristiques des fonds marins insonifiés et de celles du système d'acquisition.

Le chapitre (1) a montré l'éventail des configurations possibles des fonds et la difficulté de leur description. La classification de Sleath (Tab. 1.1, [Sle 84]) fournit des natures de fonds en fonction d'une gamme étendue de taille de grains sédimentaires. Lors de l'insonification de tels fonds, la taille de grain joue donc un rôle déterminant dans le nombre de diffuseurs dans la cellule de résolution et ainsi la nature sédimentaire doit pouvoir être discriminée par les statistiques rétrodiffusées.

La taille de la cellule de résolution instantanée est uniquement liée aux caractéristiques du système et à la géométrie d'acquisition (section 2.1.5 du Chapitre 2) et peut être approximée par l'aire d'un rectangle (Eq. 2.8). Dans le plan transversal, la longueur d'insonification correspond à la longueur du signal projeté sur le fond ; dans le plan longitudinal, la longueur est fixée par l'ouverture du faisceau de directivité. Une des particularités des systèmes d'imagerie acoustique est de pouvoir cartographier une large zone transversalement au cap du navire. L'aire instantanée varie de façon conséquente tout au long de la fauchée et les statistiques sont modifiées. La mise en œuvre du processus de correction des données réalisée au Chapitre 2 avait pour but de déterminer les propriétés de la rétrodiffusion des sédiments indépendamment des caractéristiques du système d'acquisition. Cependant, la variation de l'aire insonifiée montre clairement que les statistiques de la rétrodiffusion ne seront jamais totalement découplées des caractéristiques du système, malgré la mise en place d'un processus de correction adapté.

L'analyse statistique de l'amplitude (ou de l'intensité) de la rétrodiffusion consiste typiquement à ajuster les mesures pour un ensemble de lois afin de déterminer celle qui fournit la meilleure représentation ([Gen 89, Sta 92, Ste 94, Lyo 99]). Il existe peu de modèles permettant de relier les densités empiriques à des paramètres géoacoustiques. Le modèle de Crowther ([Cro 80]) et celui de Middleton ([Mid 99]) font partie de ceux-là mais sont difficiles à mettre en œuvre. De même, Lyons et Abraham ([Lyo 99, Abr 02]) suggèrent de nouvelles interprétations physiques conduisant à une intensité rétrodiffusée distribuée selon une loi  $\mathcal{K}$ . Ils établissent un lien entre le nombre de points réverbérants dans la cellule de résolution et le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  impliquant les caractéristiques du système. Enfin, Oliver développe un modèle ([Oli 98]) incluant les caractéristiques du systèmes d'acquisition pour prédire les moments de l'intensité rétrodiffusée (en loi  $\mathcal{K}$ ) issue de données de radar satellitaire. Hellequin ([Hel 98]) reprend les travaux d'Oliver et incorpore des descripteurs bathymétriques. Il met en évidence un comportement angulaire particulier du paramètre de la loi  $\mathcal{K}$  sur des données du sondeur multifaisceau EM1000 pour certains types de fonds.

Ce chapitre propose de mettre clairement en évidence d'une part l'adéquation de la loi  $\mathcal{K}$  aux données enregistrées par des systèmes sonars haute fréquence et d'autre part la dépendance angulaire des statistiques de la rétrodiffusion. En outre, une étude en fonction du

type de fond insonifié puis en fonction de l'angle d'azimut est aussi proposée pour déterminer le caractère discriminant de cette évolution angulaire. Le développement d'une extension du modèle de Hellequin ainsi que son application à des données réelles, viendront clôturer ce chapitre.

### 4.3.1 Méthodologie et présentation des données

L'étude menée comporte deux objectifs. Le premier s'inscrit dans l'étude des statistiques de la rétrodiffusion des fonds marins mais aussi dans l'étude de l'impact des caractéristiques du système sonar sur les réponses enregistrées. Le second vise à déterminer un paramètre discriminant du type de fond en complément de l'indice de rétrodiffusion.

Conformément aux indices de rétrodiffusion acoustique (le moment d'ordre 1) montrant une décroissance énergétique en fonction de l'angle d'incidence, les distributions statistiques montrent une dépendance angulaire. L'étude propose dans un premier temps de déterminer la densité de probabilité correspondant le mieux aux données sur l'ensemble de la gamme d'angles d'incidence correspondant à la fauchée insonifiée. L'analyse identifiera la loi  $\mathcal{K}$  comme une des mieux adaptées et la plus pertinente grâce à son lien avec le phénomène physique. La dépendance angulaire sera alors plus précisément analysée grâce au paramètre de forme  $\nu_I$  de la loi  $\mathcal{K}$  qui sera proposé comme un paramètre discriminant du type de fond. Enfin, l'étude en fonction du type de fond ainsi que l'intercomparaison pour différents systèmes d'acquisition permettra une analyse plus étendue de son interprétation physique.

La campagne *Reflacou* (Annexe C) donne l'opportunité d'analyser et de comparer les réponses issues d'une part de fonds présentant une diversité intéressante et d'autre part enregistrées par deux systèmes sonars différents dont l'acquisition a été réalisée simultanément. Les 6 sites ont été présentés en section (3.2) et en Annexe C. Quatre d'entre eux correspondent à des fonds sédimentairement homogènes : deux fonds de sable fin caractérisés par un microrelief centimétrique, un fond de sable envasé compacte caractérisé également par un microrelief centimétrique et un fond de sable grossier avec rides de sable métriques. Les fonds des deux derniers sites sont plus hétérogènes ; il s'agit d'un fond de vase colonisée par des crépidules et un fond de roches.

Les méthodes de corrections ont été appliquées aux données des deux systèmes sonars selon les méthodes décrites dans le Chapitre 2. L'analyse statistique de la rétrodiffusion requiert des échantillons indépendants et identiquement distribués. Pour assurer l'indépendance, les éléments contenus dans un ping individuel doivent être décimés ([Abr 02]). Les données sont ainsi décorrélées et l'observation  $i+1$  ne dépend pas de l'observation  $i$ . Pour analyser le changement des distributions statistiques et non le changement dû à l'indice de rétrodiffusion angulaire, les données pour chaque angle d'incidence sont normalisées par l'indice de rétrodiffusion estimé ; seules les textures restent.

Pour s'assurer que les échantillons normalisées soient indépendants et identiquement distribués, les tests du coefficient de corrélation de Spearman et celui de Mann-Whitney (appelé aussi test de Wilcoxon, [Zar 87]) ont été appliqués. La plupart des données ont réussi les tests pour un niveau de confiance de 95% ; les données qui ont échouées, ont été exclues de l'analyse.

Idéalement, l'analyse statistique devrait être réalisée pour chaque angle d'incidence sur l'ensemble de la fauchée insonifiée par le sondeur. Ceci nécessiterait un nombre important de données pouvant mettre en cause la stationnarité. Les données ont donc été regroupées par secteur angulaire de la gamme ( $[-75^\circ; 75^\circ]$  pour le sondeur multifaisceau,  $[-85^\circ; 85^\circ]$  pour

le sonar latéral). La découpe de la gamme n'a pas été réalisée de manière isoangulaire mais selon 68 secteurs tangentiels constants (projection sur le fond de 0.1 fois la hauteur d'eau); les mesures sont par ce procédé regroupées plus localement.

Le premier objectif de cette étude est de trouver la loi fournissant la meilleure représentation des statistiques de la rétrodiffusion. La section précédente a fait une synthèse (non-exhaustive) des lois les plus fréquemment rencontrées pour la modélisation des données rétrodiffusées en amplitude ou en intensité. L'étude réalisée par la suite confrontera ainsi les lois issues des modèles gaussiens (Rayleigh/Exponentielle et mélanges de la loi de Rayleigh à 2 et 3 composantes) et non-gaussiens comprenant les lois basées sur des approches physiques ( $\mathcal{K}$ ) et purement mathématiques (lois de Weibull, lognormale). Toutes ces distributions sauf la loi lognormale ont la loi de Rayleigh comme forme particulière. Les paramètres de la loi lognormale et des mélanges de lois de Rayleigh ont été estimés sur les données en amplitude. Les estimations des paramètres des différentes distributions sont données en Annexe B; en particulier, le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  est estimé selon l'estimateur  $A$ .

Pour évaluer la capacité et la précision des modèles statistiques à représenter la rétrodiffusion de différents types de fonds, le test de Kolmogorov-Smirnov (**KS**) a été utilisé pour comparer les données empiriques aux distributions candidates. La statistique du test KS est une mesure non-paramétrique décrivant la qualité de l'ajustement de la fonction de répartition théorique sur la fonction de répartition empirique.

Soient  $F_n$  la fonction de répartition empirique calculée sur  $n$  échantillons et associée à la densité de probabilité  $f_n$  et  $F$  une fonction de répartition théorique candidate associée à la densité  $f$ . L'hypothèse nulle  $\mathcal{H}_o$  du test KS est :

$\mathcal{H}_o$  : la loi  $f_n$  a pour fonction de répartition  $F$ .

La statistique du test de Kolmogorov-Smirnov ([Fis 63]) est le maximum de différence absolue des deux fonctions de répartitions :

$$t_n = \sqrt{n} \max_{-\infty < x < \infty} |F(x|\theta) - F_n(x)|; \quad (4.24)$$

où  $\theta$  est le vecteur de paramètres décrivant la loi candidate.

Si l'hypothèse  $\mathcal{H}_o$  est correcte alors la fonction de répartition empirique doit être proche de  $F$  et  $t_n$  sera petit. D'après le théorème de Kolmogorov, sous l'hypothèse  $\mathcal{H}_o$  et lorsque  $n$  est grand,  $t_n$  devient indépendant de la distribution  $F(x)$ . Si  $t_n$  est l'observation d'une statistique de test et  $T_n$  la variable aléatoire formée par l'équation (4.24) en utilisant la variable aléatoire  $X$  projetée par  $F(x)$ , alors la fonction de répartition de  $T_n$  tend vers :

$$Q(h) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbb{P}[T_n < t_n]; \quad (4.25)$$

$$= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} (-1)^i e^{-2i^2 t_n^2}. \quad (4.26)$$

Pour comparer les résultats du test entre différentes lois candidates, la **p-valeur** de  $T_n$  peut être utilisée. La p-valeur (ou degré de signification) représente la probabilité de se tromper quand on rejette  $\mathcal{H}_o$ ; i.e  $p = \mathbb{P}[T_n \geq t_n] = 1 - Q(t_n)$ . Dans le cas où  $t_n$  est faible, l'ajustement

est suffisamment correct pour ne pas rejeter  $\mathcal{H}_o$ . L'événement  $T_n \geq t_n$  est donc proche de  $\mathbb{R}_+$  et donc  $p = \mathbb{P}[T_n \geq t_n]$  est proche de 1.

Dans le cas où  $t_n$  est élevée, l'ajustement est imprécis. L'événement  $\{T_n \geq t_n\}$  est alors moins probable et l'augmentation de  $t_n$  s'accompagne d'une augmentation pour la somme (4.26) et ainsi d'une diminution de la p-valeur.

Le théorème de Kolmogorov (intervenant dans le calcul de la fonction de répartition de  $T_n$ ) est mis en défaut lorsque les paramètres de fonction de répartition candidate sont estimés à partir des données. La p-valeur fournit une mesure de qualité de l'ajustement entre le modèle et les données ([Abr 97]) auquel il faut adjoindre la décision de ne pas rejeter l'hypothèse  $\mathcal{H}_o$ ; le seuil de non rejet est alors déduit pour un niveau de confiance  $\alpha$  ([Mil 51]).

### 4.3.2 Adéquation des distributions angulaires empiriques

Cette section propose de déterminer la loi la mieux adaptée aux données du sondeur multifaisceau EM1000 et à celles du sonar latéral Edgetech DF1000 parmi un ensemble de loi ayant montré des capacités à modéliser les statistiques de la rétrodiffusion. Hellequin ([Hel 03]) a démontré l'adéquation de la loi  $\mathcal{K}$  aux données haute résolution du sondeur multifaisceau EM1000. Les données du sonar latéral Edgetech DF1000 n'ont jamais été utilisées dans un cadre statistique.

Pour les deux systèmes, le test de Kolmogorov réalisé sur un grand nombre d'échantillons, permet d'extraire deux informations pour chaque loi candidate :

- ★ Sur chaque secteur angulaire, la décision d'acceptation ou de rejet de la loi est prise pour un niveau de confiance  $\alpha = 95\%$ . Le pourcentage de succès sur l'ensemble de la fauchée est alors défini.
- ★ La p-valeur est calculée sur chaque secteur angulaire de manière à comparer la qualité d'ajustement des différentes lois candidates.

#### 4.3.2.1 Sondeur multifaisceau EM1000

Les résultats d'ajustements sur les données du sondeur multifaisceau sont présentés en termes de pourcentage d'adéquation (selon la statistique de Kolmogorov) sur l'ensemble de la fauchée (La gamme  $[-75^\circ, 75^\circ]$  a été découpée en 68 secteurs angulaires) dans le tableau (4.3.2.1). La figure (4.1) représente les p-valeurs en fonction de l'angle d'incidence pour les 6 fonds marins.

Site	Rayleigh Exp.	Rayleigh 2-mixture	Rayleigh 3-mixture	$\mathcal{K}$	Weibull	Log- Normale
Roches	18.2	56.8	90.9	89.1	47.7	6.8
Vase + crépidules (1)	23.1	96.1	100	97.4	96.2	5.19
Sable fin (2)	3.9	62.3	100	72.6	32.9	2.63
Sable envasé (3)	82.7	97.3	100	94.7	93.3	5.3
Sable grossier (4)	27.5	98.6	100	92.8	73.4	7.6
Sable fin (5)	14.5	73.7	80.3	79.7	42.8	3.95

TAB. 4.1 – Pourcentage d'acceptation sur l'ensemble de la fauchée pour un ensemble de fonds insonifiés par le sondeur multifaisceau EM1000.

La loi de Rayleigh/Exponentielle ne décrit pas correctement les distributions empiriques du sondeur multifaisceau pour la majorité des fonds sédimentaires (Tab. 1.1). Excepté le fond de sable envasé, les pourcentages sont faibles. En particulier, les distributions provenant des angles spéculaires ne sont jamais correctement décrits par la distribution de Rayleigh (Fig 4.1). Dans cette gamme angulaire, les modélisations de l'indice de rétrodiffusion assurent que ce secteur angulaire est gouverné par l'existence de facettes orientées. Dans ces conditions, la signification statistique montre qu'il existe un petit nombre de diffuseurs dominant la réponse. Les hypothèses satisfaisant le TCL ne sont désormais plus valides et les statistiques s'éloignent du cas gaussien.

Pour les autres secteurs angulaires, la loi de Rayleigh a montré de bonnes capacités à modéliser les fonds homogènes ([Lyo 99]). Dans ce cas, l'aire insonifiée est suffisamment importante pour prendre en compte un nombre élevé de diffuseurs et ceux-ci présentent des caractéristiques identiques de manière à vérifier les hypothèses du chatoiement gaussien. Pour les fonds hétérogènes, la loi de Rayleigh ne s'ajuste pas bien aux distributions empiriques même en dehors du secteur spéculaire. Pour de tels fonds, les hypothèses du TCL ne sont pas respectées et par conséquent, les statistiques ne peuvent en aucun cas être gaussiennes. Des six sédiments, seul le fond de sable envasé présente des pourcentages d'ajustements importants et des p-valeurs élevées ; il peut être classé dans les sédiments parfaitement homogènes. Les autres fonds se révèlent caractérisés par une rugosité élevée (faisant ainsi baisser le nombre de diffuseurs dans la cellule de résolution) ou par des propriétés statistiques non-stationnaires (fond hétérogène). Ce caractère hétérogène s'applique justement au fond de roches et de vase+crépîdules par nature. Le caractère rugueux s'applique facilement au sable grossier à cause de la taille de grains des particules. Les deux fonds de sables fins se sont révélés dotés d'un microrelief centimétrique contribuant de manière importante aux indices de rétrodiffusion de la zone.

La loi Log-normale est particulièrement inadaptée à ces données. Elle a pourtant été utilisée pour des données en amplitudes représentant des fonds particulièrement hétérogènes avec de nombreux forts diffuseurs. Les pourcentages présentés dans le tableau montrent que même pour les fonds très hétérogènes et rugueux, la loi n'est pas adaptée. En conséquence, ses p-valeurs n'ont pas été représentées sur la figure (4.1).

Des quatre lois restantes, deux sont des distributions à deux paramètres (Weibull et  $\mathcal{K}$ ), un paramètre d'échelle et un paramètre de forme. Les deux dernières sont les mélanges de lois de Rayleigh à deux composantes (4 paramètres) et à 3 composantes (6 paramètres). Chaque loi du mélange présente un paramètre de proportion de mélange et un paramètre de puissance ; ces densités permettent de représenter des mélanges sédimentaires. Ces quatre distributions sont les plus citées et présentent les meilleures capacités d'ajustements ([Lyo 99, Hel 98, Sta 92]) de données sonar ou radar. Une nouvelle confirmation en est donnée : les pourcentages d'ajustements pour ces quatre lois sont les plus importants (Tab. 1.1) et les p-valeurs sont aussi les plus élevées. Le mélange de loi de Rayleigh à trois composantes fournit les meilleurs taux sur l'ensemble des fonds disponibles ; l'ajout d'une troisième loi de Rayleigh est entièrement justifié. La loi  $\mathcal{K}$  concurrence sérieusement cette dernière sans pour autant se mettre à son niveau, en particulier sur les fonds de sable fin. Enfin, la loi de Weibull présente des pourcentages d'ajustements et des p-valeurs toujours plus faibles.

Sur l'ensemble des fonds, les distributions Weibull et  $\mathcal{K}$ , ainsi que celles issues des mélanges de loi de Rayleigh ajustent les données mieux que la loi de Rayleigh (Tab. 4.1 et Fig. 4.1). Pour les incidences rasantes et des fonds homogènes, la loi de Rayleigh est généralement adaptée aux données mais les autres distributions (à l'exception la loi Lognormale) contiennent la loi

de Rayleigh comme sous-membre, elles ajustent donc aussi précisément les données de sable envasé. Pour les fonds hétérogènes, les quatre lois montrent une capacité élevée à modéliser les distributions empiriques. De même, pour les angles spéculaires, les distributions présentent encore de bons ajustements.

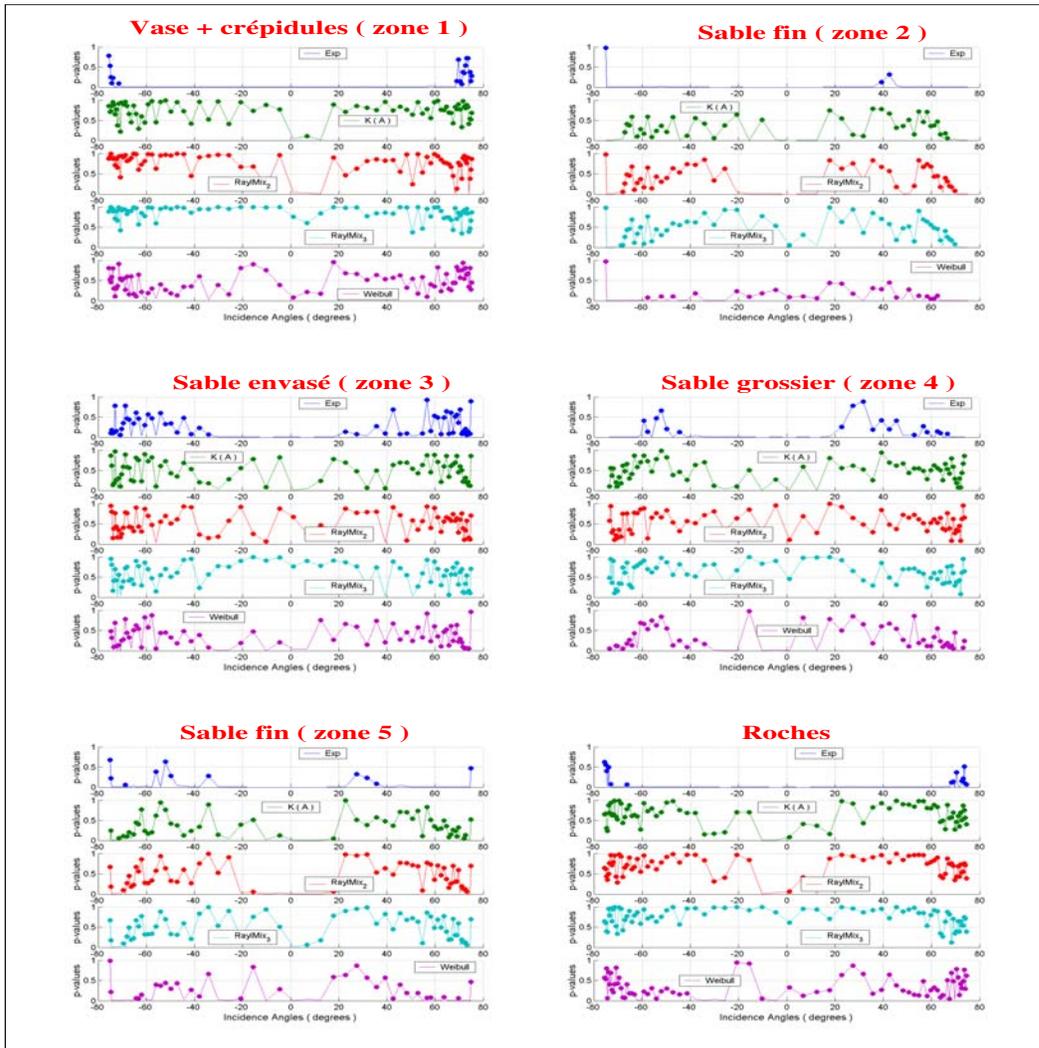


FIG. 4.1 – P-valeurs du test de Kolmogorov-Smirnov en fonction de l’angle d’incidence pour 6 fonds différents. Chaque point de couleur indique l’acceptation de la loi candidate à décrire la distribution empirique. Les cinq distributions candidates sont les lois : exponentielle (bleue),  $\mathcal{K}$  (verte), Rayleigh à deux composantes (rouge), Rayleigh à trois composantes (bleue claire) et Weibull (violet).

Les modèles de mélanges de loi de Rayleigh, de loi  $\mathcal{K}$  sont les plus robustes des modèles de distributions dans l’ajustement des données observées sur l’ensemble de la gamme angulaire disponible. Les distributions mélangeant des lois de Rayleigh montrent une robustesse indéniable à représenter les données et pourront être utilisées dans des applications de segmentation des images sonars basées sur un algorithme dont la décision est de type maximum de vraisemblance. Cependant, notre choix pour décrire les statistiques de la rétrodiffusion

porte sur la loi  $\mathcal{K}$  qui présente un bon compromis entre un nombre réduit de paramètres et le bénéfice de son interprétation physique.

#### 4.3.2.2 Sonar latéral DF1000

L'examen de la formation de l'image acoustique du sonar latéral a révélé une particularité expérimentale (chapitre 2). Les statistiques sont modifiées à cause d'un algorithme de stockage, décimant les données au profit du maximum parmi un ensemble de  $L_{max}$  données. L'estimation des paramètres de distributions empiriques de la rétrodiffusion passe donc par une inversion des moments enregistrés selon la procédure décrite en section (2.4.3.4).

Les résultats d'ajustements sont présentés en termes de pourcentage d'adéquation (selon la statistique de Kolmogorov) sur l'ensemble de la fauchée dans le tableau (4.3.2.2).

Site	Rayleigh Exp.	Rayleigh 2-mixture	Rayleigh 3-mixture	$\mathcal{K}$	Weibull	Log- Normale
Roches	28.5	92.1	100	72	45.4	5.2
Vase + crépidules (1)	30.3	88.6	100	89.5	35.09	6.8
Sable fin (2)	50.7	92.1	98.6	83.8	35.09	3.95
Sable envasé (3)	82.7	75.7	100	88.4	57.45	2.63
Sable grossier (4)	56.1	76.1	88.6	78.9	62.28	3.95
Sable fin (5)	64.6	90.4	94.7	96.1	8.7	6.8

TAB. 4.2 – Pourcentage d'acceptation sur l'ensemble de la fauchée pour un ensemble de fonds insonifiés par le sonar latéral DF1000.

Les résultats du tableau (4.3.2.2) confirment les conclusions du paragraphe précédent :

- ★ La loi de Rayleigh est inadaptée aux données de ce sonar haute résolution sauf pour le sable envasé.
- ★ De la même manière, la loi Lognormale ne correspond aucunement aux données.
- ★ La loi de Weibull obtient de meilleurs résultats mais reste nettement moins robuste que les mélanges de lois de Rayleigh et que la loi  $\mathcal{K}$ .

Ainsi, pour les mêmes raisons que pour la section précédente (bons ajustements et interprétation physique), la loi  $\mathcal{K}$  servira de modèle pour étudier la dépendance angulaire des statistiques de la rétrodiffusion enregistrées par deux systèmes sonars.

### 4.3.3 Evolution angulaire en fonction du type de fonds

#### 4.3.3.1 Introduction

La section précédente a mis en évidence que la loi  $\mathcal{K}$  représente la distribution la mieux adaptée et la plus cohérente dans l'interprétation et la modélisation des statistiques sur l'ensemble de la fauchée. La loi  $\mathcal{K}$  est une distribution à deux paramètres fournissant deux types d'informations sur les statistiques. Le premier, le paramètre d'échelle, estimé par la moyenne de l'intensité rétrodiffusée, est l'indice de rétrodiffusion dont l'étude a été réalisée au cours du Chapitre 3. Ce paramètre a montré un potentiel intéressant dans la classification des fonds marins. Ainsi tout processus de discrimination des fonds marins doit inclure l'indice de rétrodiffusion mais doit nécessairement être complété par d'autres descripteurs.

Le paramètre de forme  $\nu_I$  (le second paramètre de la loi  $\mathcal{K}$ ) permet une plus grande flexibilité dans la forme de la distribution que la classique distribution de Rayleigh disposant d'un seul paramètre d'échelle. Totalement indépendant de la moyenne, il porte donc une information de structure ; ce paramètre a été proposé comme mesure de rugosité ou de désordre ([Oli 98]). La loi  $\mathcal{K}$  devient une loi exponentielle (pour des données en intensité) lorsque son paramètre de forme  $\nu_I \rightarrow \infty$ . Sa première apparition est attribuée à Jakeman ([Jak 78]) et le nombre d'études sur la loi  $\mathcal{K}$  (par exemple [Hel 03, Oli 84, Lyo 99, Abr 02]) est particulièrement important, l'interprétation des valeurs de  $\nu_I$  en fonction du type de fond peut être synthétisée ainsi :

- ★ A de faibles valeurs de  $\nu_I$  correspond une notion d'hétérogénéité ou de rugosité de la surface. Cette notion peut être provoquée par plusieurs causes. Premièrement, un système d'imagerie de haute résolution présente une taille confinée de cellule de résolution et peut suivre finement les détails du relief ([Hel 03]). En termes statistiques, le nombre de diffuseurs à l'intérieur de la cellule est faible et les statistiques complexes ne sont plus gaussiennes (section 4.4.1.2.1). D'un autre côté, le fond peut être parfaitement homogène mais présenter une rugosité importante. Dans ce cas, quelle que soit la taille de la cellule de résolution, un petit nombre de diffuseurs renvoient un écho prépondérant par rapport au reste des diffuseurs. Alors, les statistiques seront de la même façon non-gaussiennes. Enfin, dans le cas d'un fond rugueux, le nombre de diffuseurs d'une cellule de résolution à une autre peut varier ; une variance élevée de ce nombre est associée à de faibles valeurs de  $\nu_I$ .
- ★ A de fortes valeurs de  $\nu_I$  correspond une notion d'homogénéité de la surface. La première possibilité suppose une taille importante de la cellule de résolution moyennant toutes les contributions des diffuseurs ; la seconde est liée à une faible rugosité de la surface.

Les dernières études tentent de lier  $\nu_I$  au nombre effectif de diffuseurs. Abraham et Lyons ([Abr 02]) établissent de nouvelles interprétations physiques (un lien direct entre le nombre de diffuseurs et le paramètre  $\nu_I$  basé sur un nombre déterministe de diffuseurs) et montrent par la même occasion la dépendance du paramètre aux caractéristiques du système d'acquisition en particulier à l'ouverture longitudinale du faisceau d'insonification.

Cette partie traite de l'évolution angulaire du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$ . L'objectif principal est de montrer que ce paramètre est un descripteur pouvant être utilisé dans un processus de discrimination des fonds marins. A ce titre, le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  doit non seulement être caractéristique du fond mais aussi identifiable indépendamment du système d'acquisition. Il sera donc estimé et comparé sur les mêmes fonds et à partir des données du sondeur multifaisceau et du sonar latéral.

La tendance actuelle des études sur le paramètre de forme suggère un lien direct avec le nombre moyen de diffuseurs à l'intérieur de la cellule de résolution. L'objectif fixé au départ était de déterminer l'impact des caractéristiques du système d'acquisition sur les statistiques rétrodiffusées. L'intercomparaison de ce descripteur entre les deux systèmes devait permettre de statuer sur la possibilité d'un accès au nombre de diffuseurs. Cet objectif a été revu à la baisse à cause des découvertes réalisées au cours de l'examen en profondeur du sonar latéral. Il est rapidement devenu impensable de pouvoir interpréter quantitativement les données. En particulier, les valeurs des paramètres de formes provenant des statistiques des données du sonar latéral ne seront pas exploitées ; seule la forme de la dépendance angulaire sera source de comparaison et de validation des données du sondeur multifaisceau.

La section suivante présente cette dépendance pour différents types de fonds de manière à démontrer le caractère discriminant de ce paramètre. Ayant identifié les comportements types d'évolution angulaire, la section (4.4) présentera deux modèles permettant une interprétation de ces comportements. Nous proposons une amélioration d'un de ces modèles pour tenir compte de la grande diversité des fonds.

#### 4.3.3.2 Présentation de la dépendance angulaire

La dépendance est illustrée tout d'abord sur les données du sondeur multifaisceau. La comparaison des données des deux systèmes sera réalisée dans un second temps.

Les deux paramètres de la loi (la moyenne exprimée en dB et le paramètre de forme  $\nu_I$ ) pour 6 sites sédimentaires (sables fin (2 et 5), vase compacte, sable grossier, vase+crépîdules et roches) ont été représentés en figure (4.2) pour le sondeur multifaisceau. Conformément à la méthodologie précédemment décrite, les données sur lesquelles les paramètres de forme ont été estimés, présentent une intensité moyenne identiquement nulle sur toute la gamme angulaire. Les indices moyens de rétrodiffusion présentés sur la figure (4.2) ont été estimés avant normalisation et sont montrés à titre d'information.

L'indice de rétrodiffusion a été étudié dans le chapitre (3), l'analyse portera exclusivement sur le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$ .

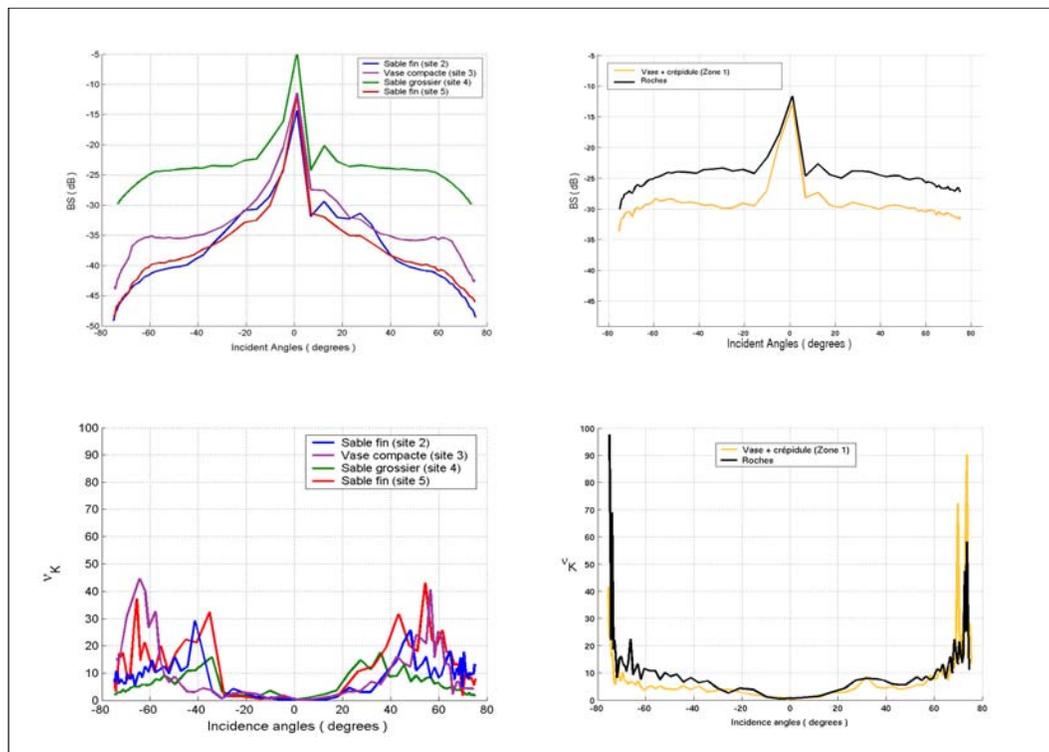


FIG. 4.2 – Évolution angulaire des deux paramètres de la loi  $\mathcal{K}$  pour l'EM1000. Le premier paramètre est l'indice moyen de rétrodiffusion représenté en dB (*haut gauche*) pour des sédiments peu rugueux (*haut droit*) pour des fonds très rugueux. Le paramètre de forme est représenté *en bas à gauche* et *en bas à droite* pour les mêmes sédiments.

L'évolution angulaire du paramètre de forme est découpée en trois régimes (Fig. 4.2 *bas*) :

★ Pour les angles proches de la verticale (typiquement  $|\theta| < 20^\circ$ ) :

Le paramètre de forme, possédant des valeurs très faibles, n'est pas discriminant du type de fond. Ses faibles valeurs indiquent une forte hétérogénéité. Ce type d'hétérogénéité est essentiellement lié à la réponse acoustique du système pour ce secteur angulaire. En effet, dans cette zone, les fluctuations du signal sont particulièrement fortes, dues à l'étendue de l'aire insonifiée, et aux fortes variations angulaires de l'indice de rétrodiffusion.

★ Pour les angles intermédiaires entre spéculaires et rasants :

Les courbes des zones très rugueuses (Fig. 4.2 *bas droit*) possèdent une pente plus douce que les zones plus lisses (Fig. 4.2 *bas gauche*).

★ Pour les angles rasants :

Une inversion caractéristique de pente est observable sur la figure (4.2 *bas gauche*) au contraire des courbes de la figure (4.2 *bas droit*) qui gardent leurs caractères de pentes monotones.

L'augmentation globale du paramètre de forme  $\nu_I$  en s'éloignant de la zone spéculaire peut être expliquée par l'évolution angulaire de l'aire insonifiée. Lorsque l'on s'éloigne de la zone spéculaire pour aller jusqu'aux angles rasants, l'aire insonifiée<sup>3</sup> augmente. La cellule de résolution englobe ainsi un plus grand nombre effectif  $N_d$  de diffuseurs ; en d'autres termes, le théorème central limite s'applique et la loi  $\mathcal{K}$  se mue en loi Exponentielle négative (les statistiques suivent le modèle gaussien complexe ou le modèle de Rayleigh en amplitude). Le modèle d'Oliver (section 4.4.1) incorpore cette notion de taille de la cellule de résolution montrant ainsi son intérêt.

Pour le second régime, la pente du paramètre de forme est plus douce pour les fonds rugueux. En effet, la rugosité quantifie au sein de la cellule de résolution soit la quantité de diffuseurs contribuant individuellement à la réponse totale, soit une variation importante de ce nombre de diffuseurs d'une cellule de résolution à une autre. Plus un fond est rugueux, plus le nombre de diffuseurs dominant la réponse est faible ou plus la variance de  $N_d$  est forte. Le paramètre de forme présente des valeurs plus faibles ; le sol est considéré hétérogène au sens de la rugosité. Un angle de coupure séparant les deux derniers régimes est nettement visible sur la figure (4.2 *bas gauche*) ; il semble caractéristique du type de fond. Les fonds rugueux ne semblent pas posséder un tel angle de coupure.

D'un autre côté, les différences d'évolution en fonction du type de fond pour les angles plus rasants sont intrigantes. En effet, les types de fonds présentant cette caractéristique sont, peu rugueux et sédimentairement homogènes. La réponse est fournie à la fois par l'analyse des courbes de l'indice moyen de rétrodiffusion  $BS(\theta)$  (figure 4.2 *haut gauche et droit*) et par le processus d'extraction des informations. En effet, la raison principale est le manque de précision bathymétrique ([Hel 03]) et donc l'incertitude sur les angles d'incidence de l'intensité rétrodiffusée. En conséquence, la pente de l'indice moyen de rétrodiffusion  $BS(\theta)$  prend une importance considérable dans l'estimation des moments (et donc dans celle du paramètre de forme). Les deux zones de sable fin et celles de sable grossier possèdent un indice  $BS$  ayant une pente importante pour les angles rasants au contraire des zones de roches et de vase + crépidules possédant un indice  $BS$  quasiment plat, caractéristique des fonds très rugueux.

Les courbes représentant les paramètres de forme de la loi  $\mathcal{K}$  pour les sédiments insonifiés par le sonar latéral, sont reportées sur la figure (4.3).

<sup>3</sup>ou la taille de la cellule de la résolution.

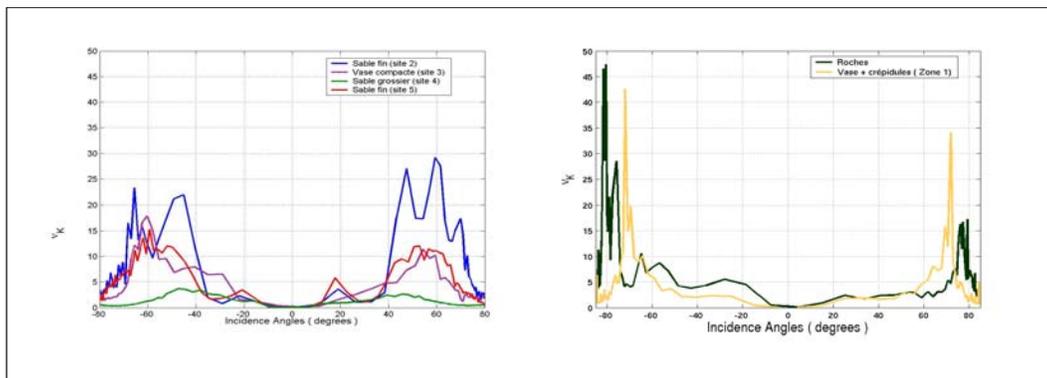


FIG. 4.3 – Évolution angulaire du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  pour le DF1000 et pour des sédiments peu rugueux (*gauche*) et pour des fonds très rugueux (*droite*).

Premièrement, l'évolution angulaire du paramètre est confirmée par les données du sonar latéral :

- ★ La découpe en fonction des secteurs angulaires (spéculaire/intermédiaire/rasant) est conservée.
- ★ La séparation selon la rugosité du fond est nettement vérifiée en comparant les deux séries de courbes.

En outre, concernant les fonds rugueux (Fig. 4.3 *droite*), on voit apparaître l'angle de coupure au-delà de  $\pm 75^\circ$ . Tous les fonds présentent un comportement angulaire doté d'un angle de coupure. Les incidences plus rasantes du sonar latéral ont permis de le vérifier.

Enfin, cette découpe montre clairement que le paramètre de forme est discriminant du type de fond. Deux systèmes dotés de caractéristiques différentes permettent d'obtenir des gabarits de courbes identiques des fonds marins. Son utilisation dans un processus de segmentation/classification des fonds marins sera analysée dans le chapitre (5). En outre, l'analyse physique des valeurs des paramètres est à approfondir. Un modèle a été mis en place permettant de simuler ce paramètre de forme en tenant compte des caractéristiques d'acquisition. La prochaine étape vise ainsi à comparer les paramètres d'entrée du modèle obtenus par inversion de l'évolution angulaire du paramètre de forme pour les deux systèmes sonars. L'objectif est d'obtenir un ou plusieurs paramètres décrivant la rugosité du fond indépendamment du système d'acquisition. Cette analyse qui fait l'objet de la section (4.4), a été réalisée uniquement sur les données du sondeur multifaisceau. Les particularités d'acquisition du sonar latéral provoquent trop d'incertitudes.

## 4.4 Dépendance angulaire du paramètre de forme

### 4.4.1 Modélisations

#### 4.4.1.1 Introduction

Dans les domaines d'imagerie haute résolution (optique, radar, acoustique), la loi  $\mathcal{K}$  a montré des propriétés intéressantes pour décrire les statistiques de l'intensité rétrodiffusée. Outre le fait que sa distribution de probabilité s'adapte bien aux distributions empiriques, elle bénéficie d'une interprétation physique du phénomène de rétrodiffusion ([Jak 88]).

Dans le cas du sondeur multifaisceau EM1000 et du sonar latéral, la loi  $\mathcal{K}$  s'adapte encore une fois bien aux données (section 4.3.2.1). Basé sur le modèle des points réverbérants, le modèle de Oliver ([Oli 84]) incorpore les effets de la corrélation entre diffuseurs et la taille finie de la cellule de résolution (aire insonifiée), et dérive les statistiques de l'intensité rétrodiffusée sous la forme de la loi  $\mathcal{K}$  corrélée. Plus tard, ces travaux ont été repris ([Hel 03]) et complétés pour prendre en considération la bathymétrie locale.

La première partie présentera le modèle de Oliver et les calculs menant aux statistiques de l'intensité rétrodiffusée. Le modèle enrichi de Hellequin est explicité dans une seconde partie. Puis un élargissement sera effectué de façon à considérer la diversité des fonds marins et ainsi aboutir à un modèle plus complet. Enfin, la comparaison des trois modèles est réalisée sur des données expérimentales provenant du sondeur multifaisceau EM1000.

#### 4.4.1.2 Le modèle de Oliver - Introduction de la corrélation

Les travaux d'Oliver prennent pour base la modélisation produit (Eq. 4.13) :

$$I = R.S; \tag{4.27}$$

combinant deux processus physiques différents :

- ★ La réflectivité sous-jacente à la scène  $R$ , dépend des propriétés physiques des diffuseurs élémentaires de la surface.
- ★ Le phénomène de speckle  $S$ , supposé non-corrélé, est la conséquence de la distribution aléatoire de ces diffuseurs.

La réponse enregistrée par un système d'imagerie acoustique va dépendre de ces deux processus physiques. Le modèle développé par Oliver propose d'incorporer à la modélisation de ces processus deux hypothèses originales. D'une part, la corrélation est introduite dans le modèle de surface au travers de la variable  $R$ . D'autre part, le processus de diffusion de l'onde sur la surface prend en compte les caractéristiques du système d'acquisition.

**4.4.1.2.1 Le modèle de surface** Le choix d'Oliver pour modéliser les propriétés de la surface découle essentiellement des travaux effectués par Jakeman ([Jak 78]) sur l'interaction des ondes électromagnétiques par une surface rugueuse. Dans ses travaux ([Oli 86a]), le modèle utilisé est celui des points réverbérants (Eq. 4.6) :

- ★ La surface est représentée par un réseau dense de diffuseurs décrits individuellement par leurs amplitudes  $a_n$  et leurs phases  $\phi_n$  ;
- ★ Le champ complexe  $\mathcal{Z}$  enregistré pour un pixel est la somme incohérente des contributions des  $N_d$  diffuseurs à l'intérieur de la cellule de résolution (ou aire insonifiée).
- ★ Le nombre de diffuseur  $N_d$  n'est plus supposé aléatoire mais fixé et proportionnel à l'aire insonifiée. La disposition des points réverbérants est aléatoire sur les aires insonifiées.

Ainsi,

$$\mathcal{Z} = \sum_{n=1}^{N_d} a_n \exp(i\phi_n). \tag{4.28}$$

L'intérêt du modèle d'Oliver réside dans le fait qu'il prouve que la surface n'est pas entièrement décrite par les statistiques de premier ordre (densité de probabilité) mais qu'une connaissance complète passe par l'étude de ses propriétés corrélatoires ([Oli 98]).

En résumé, la surface est décrite par la variable aléatoire  $R$  supposée stationnaire, distribuée selon la loi  $\Gamma$ ,  $f_R(R)$  et de coefficient de corrélation spatiale  $\rho_R$ , dont les caractéristiques sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_R(R) = \left( \frac{\nu}{\mathbb{E}[R]} \right)^\nu \frac{R^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} \exp\left(-\frac{\nu R}{\mathbb{E}[R]}\right), \\ \mathbb{E}[R^m] = \left( \frac{\mathbb{E}[R]}{\nu} \right)^m \frac{\Gamma(\nu+m)}{\Gamma(\nu)}, \\ \rho_R(\xi) = \frac{\mathbb{E}[R(\xi_1)R(\xi_2) - \mathbb{E}[R]^2]}{\mathbb{E}[R^2] - \mathbb{E}[R]^2}, \\ = \nu \left( \frac{\mathbb{E}[R(\xi_1)R(\xi_2)]}{\mathbb{E}[R]^2} - 1 \right). \end{array} \right. \quad (4.29)$$

où  $\xi = |\xi_1 - \xi_2|$  est la distance entre les échantillons positionnés en  $\xi_1$  et en  $\xi_2$  et où  $m > 0$  est l'ordre des moments.

**Modèles de spectres de corrélations spatiales** Les spectres considérés dans ces études sont généralement de deux formes :

★ exponentielles (Lorentziennes) 1D et 2D :

$$\rho_R(x) = \exp\left(-\frac{|x|}{\sqrt{L_{c_t} \cdot L_{c_l}}}\right); \quad (4.30)$$

$$\rho_R(x, y) = \exp\left(-\frac{|x|}{L_{c_t}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|y|}{L_{c_l}}\right); \quad (4.31)$$

★ gaussiennes 1D et 2D :

$$\rho_R(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{L_{c_t} \cdot L_{c_l}}\right); \quad (4.32)$$

$$\rho_R(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{L_{c_t}^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{L_{c_l}^2}\right). \quad (4.33)$$

où  $x = x_1 - x_2$ ,  $y = y_1 - y_2$  et  $(L_{c_t}, L_{c_l})$  sont les longueurs de corrélations dans les deux dimensions transversales et longitudinales.

La corrélation a été introduite pour représenter le relief. Ainsi, la corrélation de la réflectivité sous-jacente  $R$  apparaît lorsque les amplitudes élémentaires à l'intérieure de la cellule de résolution  $\{a_i, i = 1, \dots, N_d\}$  (Eq. 4.28) sont corrélées. La taille de l'aire insonifiée joue un rôle important dans la détermination des statistiques :

★ Dans le cas de faibles aires insonifiées, les amplitudes élémentaires sont fortement corrélées et ainsi peuvent être considérées comme constantes sur ce petit élément de surface. L'équation (4.28) se simplifie pour l'intensité en  $R = |\sum_{n=1}^{N_d} a_n e^{-j\Phi_n}|^2 = |a_n|^2$ . On ne connaît pas a priori les distributions des amplitudes élémentaires. Cependant, de nombreux auteurs (par exemple [Jak 78, Abr 02]), en raisonnant par l'absurde, ont déterminé les distributions des amplitudes conduisant à une intensité rétrodiffusée modélisée par une loi  $\mathcal{K}$  :

★★ Pour Jakeman, les amplitudes élémentaires  $a_n$  sont  $\mathcal{K}$ -distribuées et le facteur de forme de l'intensité est  $\nu_I = (\nu_{a_n} + 1) \cdot N_d - 1$ .

- ★★ Abraham et Lyons supposent les  $a_n$  exponentiellement distribuées et  $\nu_I = \frac{N_d}{2}$ .
- ★ Pour des aires insonifiées plus importantes, du fait de la corrélation, la simplification précédente ne s'applique pas. On ne connaît pas a priori la distribution de l'intensité rétrodiffusée. Cependant, Oliver ([Oli 85]) montre que l'écart entre la loi de  $I$  et la loi  $\mathcal{K}$  est faible. Cet écart dépend de la fonction de corrélation du relief. Le paragraphe suivant va quantifier cet écart, en particulier celui entre le paramètre de forme  $\nu$  de la loi  $\Gamma$  (représentant les caractéristiques du relief) et le paramètre de forme  $\nu_I$  de la loi  $\mathcal{K}$  de l'intensité rétrodiffusée.

**4.4.1.2.2 Le processus de diffusion** Supposons qu'on dresse l'image d'une zone homogène dont le caractère aléatoire est décrit par une loi  $\Gamma$  corrélée (cf. 4.4.1.2.1) par un système acoustique d'imagerie sonar. L'intensité rétrodiffusée  $I(\xi)$  à la position  $\xi$  provenant d'une scène d'amplitude complexe<sup>4</sup>  $A(\xi)$  à la position  $\xi$  est donnée par ([Oli 84]) :

$$I(\xi) \equiv |\mathcal{Z}(\xi)|^2 = \int_{\mathbb{R}^2} \left[ A(\xi_1)A^*(\xi_2)h(\xi - \xi_1)h^*(\xi - \xi_2) \right] d\xi_1 d\xi_2, \quad (4.34)$$

où  $h$  est la réponse impulsionnelle spatiale du sonar (trace du signal sur le fond), \* désigne la conjugaison complexe et  $\mathcal{Z}$  est le champ complexe de rétrodiffusion. Cette expression suppose qu'il n'y a pas de recouvrement entre les cellules de résolutions.

Dans le cas des systèmes sonars, la fonction  $h$  est approchée par la fonction porte :

$$h(x) = \begin{cases} \frac{1}{La_t \cdot La_l} & \text{si } -\frac{La_t}{2} \leq x \leq \frac{La_t}{2}; \\ & \text{et } -\frac{La_l}{2} \leq x \leq \frac{La_l}{2}; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.35)$$

où  $La_t$  et  $La_l$  sont les longueurs de la cellule de résolution respectivement dans le plan transversal et longitudinal.

En moyennant sur l'ensemble des réalisations du speckle, on observe que les contributions à différentes positions du champ rétrodiffusé  $A$  s'annulent à cause du caractère aléatoire équiréparti de la phase des diffuseurs. Ainsi, on a la propriété intéressante suivante :

$$\mathbb{E} [I(\xi)] = \int_{\mathbb{R}} \left[ \mathbb{E} [|A(\xi)|^2] |h(\xi - \xi_1)|^2 \right] d\xi_1 = \mathbb{E} [R(\xi)]. \quad (4.36)$$

**4.4.1.2.3 Dérivation des moments de l'intensité diffusée** Oliver définit le moyen de dériver les moments normalisés de l'intensité mesurée en tenant compte à la fois de la corrélation des diffuseurs et des spécificités du système d'imagerie. Pour des données L-vues, on aura :

$$\frac{\mathbb{E} [I^n]}{\mathbb{E} [I]^n} = \frac{\Gamma(L+n)}{L^n \Gamma(L)} \cdot \int_{\mathbb{R}^n} \left[ \frac{\mathbb{E} [R(\xi_1) \dots R(\xi_n)]}{\mathbb{E} [R]^n} |h(\xi_1)|^2 \dots |h(\xi_n)|^2 \right] d\xi_1 \dots d\xi_n; \quad (4.37)$$

où  $\xi_i = (x_i, y_i)$  représente la position.

---

<sup>4</sup> $R = |A(\xi)|^2$

De plus,  $R$  est supposé stationnaire et de fonction d'autocorrélation (Eq. (4.29)) :

$$\mathbb{E}[R(\xi_1)R(\xi_2)] = \mathbb{E}[R]^2 \left(1 + \frac{\rho_R(\xi_1 - \xi_2)}{\nu}\right). \quad (4.38)$$

En prenant  $n = 2$ , en utilisant (4.38) et en remplaçant par l'expression de  $h$ , le moment normalisé d'ordre 2 devient :

$$\frac{\mathbb{E}[I^2]}{\mathbb{E}[I]^2} = \frac{L+1}{L} \frac{1}{La_t^2 \cdot La_l^2} \int_{-\frac{La_t}{2}}^{\frac{La_t}{2}} \int_{-\frac{La_l}{2}}^{\frac{La_l}{2}} \left[ \frac{\mathbb{E}[R(\xi_1)R(\xi_2)]}{\mathbb{E}[R]^2} \right] d\xi_1 d\xi_2; \quad (4.39)$$

$$= \frac{L+1}{L} \frac{1}{La_t^2 \cdot La_l^2} \int_{-\frac{La_t}{2}}^{\frac{La_t}{2}} \int_{-\frac{La_l}{2}}^{\frac{La_l}{2}} \left[ 1 + \frac{\rho_R(\xi_1 - \xi_2)}{\nu} \right] d\xi_1 d\xi_2. \quad (4.40)$$

**Cas du spectre gaussien 2D** Pour un relief caractérisé par (4.33), le calcul de (4.39) devient :

$$\frac{\mathbb{E}[I^2]}{\mathbb{E}[I]^2} = \frac{L+1}{L} \left[ 1 + \frac{F_{Gauss}(\gamma_t)F_{Gauss}(\gamma_l)}{\nu} \right]; \quad (4.41)$$

où

$$\begin{cases} F_{Gauss}(x) = \frac{\sqrt{\pi}}{x} \cdot \text{erf}(x) + \frac{\exp(-x^2)}{x^2} - x^{-2}, \\ \gamma_t = \frac{La_t}{Lc_t}, \\ \gamma_l = \frac{La_l}{Lc_l}, \end{cases} \quad (4.42)$$

et  $\text{erf}(\cdot)$  est la fonction d'erreur.

**Cas du spectre exponentiel 2D** Pour un relief caractérisé par (4.31), le calcul de (4.39) devient :

$$\frac{\mathbb{E}[I^2]}{\mathbb{E}[I]^2} = \frac{L+1}{L} \left[ 1 + \frac{F_{Exp}(\gamma_t)F_{Exp}(\gamma_l)}{\nu} \right]; \quad (4.43)$$

où

$$F_{Exp}(x) = 2 \frac{\exp(-x) + x - 1}{x^2}. \quad (4.44)$$

**Détermination du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$ ,  $\nu_I$  à partir du moment normalisé d'ordre 2** D'un point de vue analytique, le moment normalisé d'ordre 2 associé à une loi  $\mathcal{K}$ , est calculable (Annexe B) :

$$\frac{\mathbb{E}[I^2]}{\mathbb{E}[I]^2} = \left(\frac{L+1}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{\nu_I}\right). \quad (4.45)$$

Le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  à partir du paramètre de forme de la loi  $\Gamma$  et des spécificités du sondeur peut être déterminé grâce à :

$$\nu_I = \frac{\nu}{F(\gamma_t)F(\gamma_l)}, \quad (4.46)$$

où  $F$  désigne  $F_{Gauss}$  ou  $F_{Exp}$ .

Ce modèle bénéficie des propriétés suivantes :

- ★ En l'absence de corrélation (cas  $Lc_t$  et/ou  $Lc_l \rightarrow 0 \Rightarrow F(.) \rightarrow 1$ ), on retrouve la propriété de  $\nu_I \approx \nu$ .
- ★ La loi de Rayleigh est classiquement retrouvée dans le cas limite  $\nu \rightarrow +\infty$  par l'intermédiaire du moment normalisé d'ordre 2 égal à 1 pour des données pleine résolution ( $L = 1$ ).
- ★ Les statistiques de la rétrodiffusion sont fortement dépendantes d'un coefficient  $\gamma$  représentant le contraste entre la taille de la surface d'insonification et les propriétés corrélatoires du relief (Fig. 4.4) :
  - ★★ pour de faibles aires insonifiées ( $La \ll Lc$ ),  $F(.) \rightarrow 1$  et  $\nu_I \approx \nu$ . L'aire insonifiée est suffisamment faible pour suivre les détails du relief.
  - ★★ pour de grandes cellules de résolution, ( $La \gg Lc$ ),  $F(.) \rightarrow 0$  et  $\nu_I \propto \gamma \cdot \nu$ . Le paramètre de forme  $\nu_I$  augmente très rapidement et les statistiques de l'amplitude rétrodiffusée tendent très rapidement vers la loi de Rayleigh.

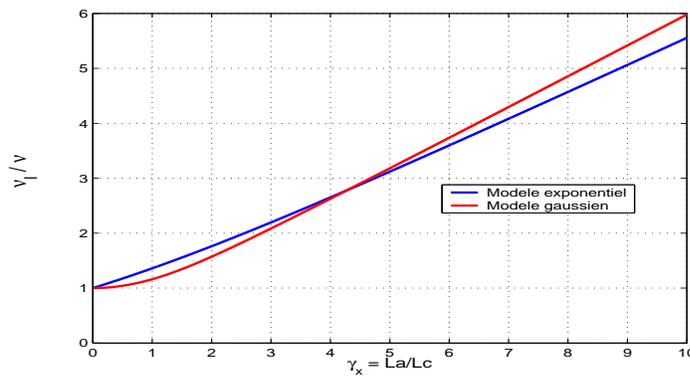


FIG. 4.4 – Evolution angulaire de  $\nu_I$  en fonction de l'aire insonifiée.

Dans le cas des systèmes sonars, l'aire insonifiée angulaire varie de façon conséquente le long de la fauchée. Celle-ci est classiquement déterminée par les résolutions du système ; dans le plan longitudinal, la résolution est fixée par l'ouverture du faisceau de directivité et dans le plan transversal par la durée du signal d'émission. Cette variation de surface implique ainsi une dépendance angulaire du paramètre de forme. La figure (4.5) présente quelques exemples de la dépendance angulaire du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  en fonction des angles d'incidence pour les caractéristiques d'aire insonifiée du sondeur multifaisceau EM1000.

L'analyse de cette figure révèle que :

- ★ Les variations de  $\nu$  (Fig. 4.5 gauche) entraînent à la fois une translation de la courbe de  $\nu_I$ , une variation de sa pente pour les angles rasants et une variation pour les angles spéculaires.
- ★ La variation des deux paramètres de corrélation n'engendre pas les mêmes variations sur le paramètre de forme  $\nu_I$ . Alors que la dépendance transversale est quasi-nulle, la dépendance longitudinale est importante. La dimension de la surface d'insonification est à l'origine de cette différence entre les dimensions. En effet, la longueur de la surface insonifiée dans le plan longitudinal est beaucoup plus importante que dans le plan

transversal. Le coefficient de contraste  $\gamma$  prend donc des valeurs totalement différentes.

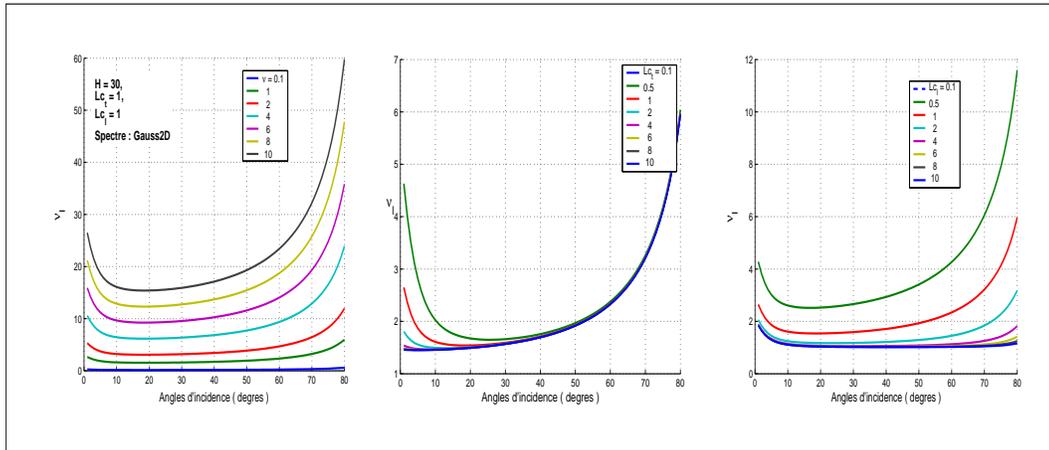


FIG. 4.5 – Évolution angulaire de  $\nu_I$  pour le modèle de Oliver pour différentes valeurs de  $\nu$  (*gauche*), de  $Lc_t$  (*milieu*) et de  $Lc_l$  (*droite*).

Ce premier modèle est une avancée importante dans le processus de prise en compte des caractéristiques du système pour l'exploitation des statistiques de la rétrodiffusion. Cependant les comportements observés sur la figure (4.2) ne sont en aucun cas modélisés par Oliver.

#### 4.4.1.3 Modèle de Hellequin

Dans sa thèse ([Hel 98]), Hellequin reprend les travaux d'Oliver dans l'optique de découpler totalement les propriétés du système d'acquisition EM1000 des propriétés du fond. Confrontant les résultats d'Oliver à des données expérimentales, il propose un enrichissement du modèle d'Oliver ([Hel 03]). L'hypothèse principale est que le paramètre de forme  $\nu$  de la loi de la réflectivité  $R$  (loi  $\Gamma$  corrélée, sous-jacente à la scène) dépend de l'angle d'incidence.

D'une part, dans le cas des systèmes acoustiques d'imagerie, l'indice de rétrodiffusion présente une dépendance angulaire forte (section 1.3) caractérisée parfois par des variations énergétiques rapides pour les angles spéculaires et les incidences rasantes.

D'autre part, l'estimation des angles d'incidence sur le fond présente un caractère aléatoire. En effet, une estimation précise nécessite un modèle numérique de terrain (section 2.1.5). Dans le cas du sondeur multifaisceau, l'acquisition des données ne permet pas une estimation exacte des angles d'incidence  $\theta_{inc}$ . En effet, l'acquisition de la bathymétrie ne se réalise pas à la même résolution que l'imagerie. En conséquence, la bathymétrie est interpolée pour les sondes manquantes ([Hel 98]). L'angle d'incidence du signal est alors calculé par la relation  $\theta_{inc} = \theta_{emi} - \phi_{bat}$ ,  $\phi_{bat}$  étant l'angle de la pente du fond. Le manque de données bathymétriques procure donc un caractère aléatoire à  $\phi_{bat}$  et par conséquent aux angles  $\theta_{inc}$ . Le sonar latéral ne possédant pas de capacité bathymétrique, les angles sont déterminés grâce au couple temps de retour et hauteur d'eau sous le sonar. On peut supposer une nouvelle fois un caractère aléatoire des angles d'incidence.

Le modèle suppose une distribution gaussienne des pentes<sup>5</sup> centrée en 0 et d'écart-type  $\sigma$  :

$$f_{\phi_{bat}}(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\phi^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.47)$$

$$\implies f_{\theta_{inc}}(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\theta_{emi} - \phi)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4.48)$$

La distribution associée à la nouvelle variable aléatoire  $\theta_{inc}$  est une gaussienne  $\mathcal{N}(\theta_{emi}, \sigma^2)$ .

Compte tenu de l'utilisation du modèle produit (Eq. 4.27) et de l'indépendance des variables aléatoires  $R$  et  $S$ , on a la propriété (4.36) :

$$\mathbb{E}[I] = \mathbb{E}[R] = \mathbb{E}[BS(\theta_{inc})], \quad (4.49)$$

Hellequin utilise un modèle simpliste de rétrodiffusion angulaire (section 1.3) composé :

- ★ d'une gaussienne pour les angles spéculaires,
- ★ d'une loi de Lambert pour les angles rasants.

Ainsi,

$$BS(\theta_{inc}) = A \exp(-\alpha\theta_{inc}^2) + B \cos^2(\theta_{inc}), \quad (4.50)$$

Il est alors possible de calculer les moments d'ordre  $m$  de  $R$  :

$$\mathbb{E}[R^m] = \int_{\mathbb{R}} BS^m(\theta_{inc}) f_{\theta_{inc}}(\theta_{inc}) d\theta. \quad (4.51)$$

Les deux premiers moments sont donnés par :

$$\begin{cases} \mathbb{E}[R] = C_1 \cdot \exp(-D_1\theta_{emi}^2) + \frac{B}{2} \cdot [1 + \cos(2\theta_{emi}) \exp(-2\sigma^2)]; \\ \mathbb{E}[R^2] = I_1 + I_2 + I_3; \end{cases} \quad (4.52)$$

où

$$\begin{cases} I_1 = C_2 \cdot \exp(-D_2\theta_{emi}^2); \\ I_2 = B \cdot C_1 \cdot \exp(-D_1\theta_{emi}^2) \left(1 + \exp(-2C_3) \cos\left(\frac{2\theta_{emi}}{1 + 2\alpha\sigma^2}\right)\right); \\ I_3 = \frac{B^2}{8} \left(3 + 4 \cos(2\theta_{emi}) \exp(-2\sigma^2) + \cos(4\theta_{emi}) \exp(-8\sigma^2)\right); \end{cases} \quad (4.53)$$

et

$$\begin{cases} C_1 = \frac{A}{\sqrt{1 + 2\alpha\sigma^2}}, & D_1 = \frac{\alpha}{1 + 2\alpha\sigma^2}, \\ C_2 = \frac{A^2}{\sqrt{1 + 4\alpha\sigma^2}}, & D_2 = \frac{2\alpha}{1 + 4\alpha\sigma^2}, \\ C_3 = \frac{\sigma^2}{1 + 2\alpha\sigma^2}. \end{cases} \quad (4.54)$$

La variable  $R$ , supposée distribuée selon une loi  $\Gamma$ , fournit la propriété permettant de déterminer  $\nu$  :

$$\frac{\text{Var}[R]}{\mathbb{E}[R]^2} = \frac{1}{\nu}. \quad (4.55)$$

---

<sup>5</sup>Cette hypothèse a été parfois mise en doute, cependant elle est justifiée par sa simplicité calculatoire dans les expressions analytiques.

Enfin, la propriété (4.46) permet de remonter au paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  en intégrant le modèle d'Oliver ; elle est réécrite ici :

$$\nu_I = \frac{\nu}{F(\gamma_t)F(\gamma_l)}, \quad (4.56)$$

Pour illustrer ce modèle, la figure (4.6) présente les résultats de simulations de  $\nu_I$ . Tout d'abord, la figure (4.6 *gauche*) représente l'évolution angulaire de l'indice de rétrodiffusion  $BS(\theta_{inc})$ . La déformation de l'indice due à l'incertitude sur les angles d'incidence, est aussi représentée pour différentes valeurs de  $\sigma$ . La rugosité provoque ainsi un élargissement du lobe spéculaire et une augmentation de l'indice pour les incidences rasantes.

D'une manière générale, l'évolution angulaire de  $\nu_I$  (Fig. 4.6 *droite*) pour différentes valeurs de  $\sigma$  présente des comportements très différents par rapport à ceux rencontrés lors des simulations du modèle de Oliver. Le comportement type peut être découpé selon trois secteurs angulaires :

- ★ le secteur spéculaire pour lequel l'évolution de  $\nu_I$  est quasi-stable ;
- ★ un secteur intermédiaire présentant une croissance rapide du facteur de forme de la loi  $\mathcal{K}$  ;
- ★ le secteur des angles rasants pour lequel le modèle d'Hellequin permet désormais une décroissance du paramètre  $\nu_I$ .

Plus la rugosité est importante et plus  $\sigma$  possède des valeurs élevées, plus l'angle de cassure est important. Les comportements expérimentaux observés du paramètre de forme sont désormais accessibles. Enfin, les dépendances en fonction des longueurs de corrélation présentent les mêmes caractéristiques que pour le modèle d'Oliver.

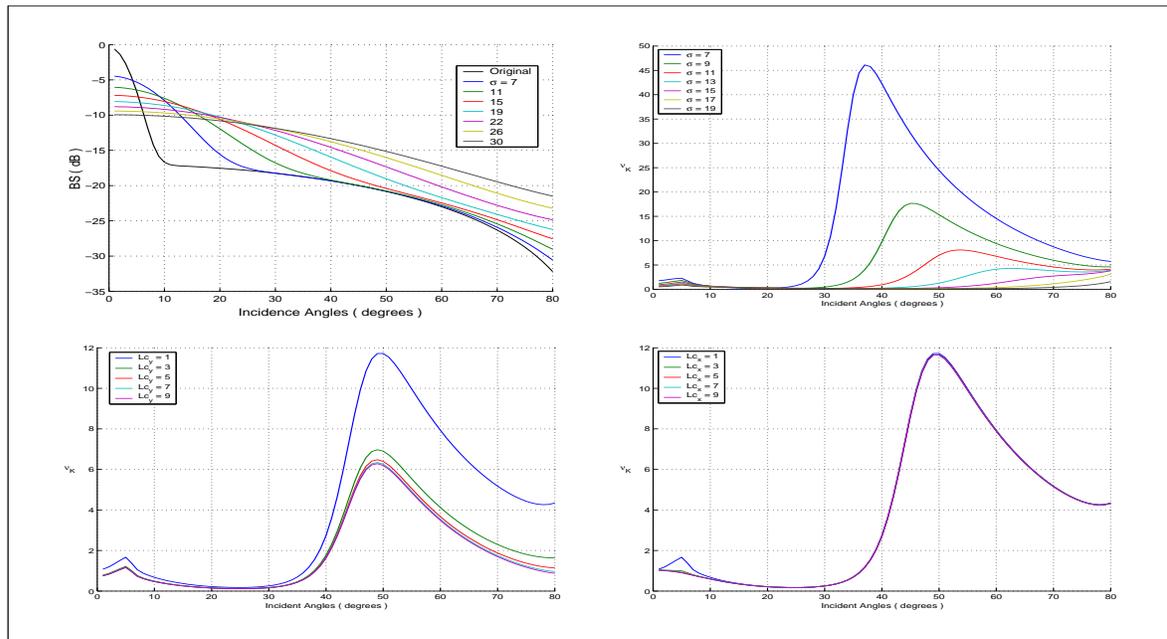


FIG. 4.6 – Modèle simple de  $BS(\theta_{inc})$  ( $A = 0.9$ ,  $\alpha = 200$  et  $B = 0.02$ ) et indices de rétrodiffusion modifiés par la distribution gaussienne des pentes d'écart-type  $\sigma$  (*haut gauche*). (*Haut droite*) Paramètres de forme  $\nu_I$  correspondants. Evolutions angulaire du modèle de Hellequin pour différentes valeurs de la longueur de corrélation longitudinale (*bas gauche*) et transversale (*bas droite*).

## 4.4.1.4 Extension à un modèle de rétrodiffusion plus complet

Le modèle choisi par Hellequin pour l'indice de rétrodiffusion est trop simpliste pour prendre en compte l'éventail de comportement angulaire des types de fonds. Une modélisation du type  $\beta$ -Lambert pour les angles rasants (remplacement du terme  $\cos^2(\theta_{inc})$  par  $\cos^\beta(\theta_{inc})$  dans l'équation (4.50)) serait plus adaptée au regard des mesures de l'indice obtenues (chapitre 3).

Malheureusement, le calcul analytique des moments de la réflectivité sous-jacente  $R$  (Eq. 4.51) n'est alors pas possible. La variable  $\phi_{bat}$  décrivant les pentes de la bathymétrie étant centrée sur 0, un développement limité de la fonction  $\cos^\beta(\theta_{emi} - \phi)$  est cependant possible et donne ainsi naissance à un nouveau modèle plus complet (appelé par la suite modèle étendu de la dépendance angulaire de la loi  $\mathcal{K}$  : **EDAK**).

Ainsi, en réalisant un développement limité en  $\phi_{bat}$  autour de 0 à l'ordre 3, l'équation (4.50) devient :

$$BS(\theta_{inc}) = A \exp(-\alpha\theta_{inc}^2) + B \cos^\beta(\theta_{inc}), \quad (4.57)$$

$$= A \cdot \exp(-\alpha(\theta_{emi} - \phi)^2) + (b_1 + b_2\phi + b_3\phi^2 + b_4\phi^3). \quad (4.58)$$

où :

$$\begin{cases} b_1 = B \cdot \cos^\beta(\theta_{emi}), \\ b_2 = B \cdot \beta \cdot \cos^{\beta-1}(\theta_{emi}) \cdot \sin(\theta_{emi}), \\ b_3 = \frac{b_1 \cdot \beta}{2} [(\beta - 1) \cdot \tan^2(\theta_{emi}) - 1] \\ b_4 = \frac{b_2 \cdot \beta}{6} [(\beta^2 - 3\beta + 2)(1 + \tan^2(\theta_{emi})) - \beta^2]. \end{cases} \quad (4.59)$$

En reprenant les notations de (4.54), les deux premiers moments deviennent :

$$\mathbb{E}[R] = C_1 \cdot \exp(-D_1\theta_{emi}^2) + b_1 + b_3 \cdot \sigma^2; \quad (4.60)$$

$$\mathbb{E}[R^2] = J_1 + J_2 + J_3; \quad (4.61)$$

où

$$\begin{cases} J_1 = C_2 \cdot \exp(-D_2\theta_{emi}^2), \\ J_2 = b_1^2 + (b_2^2 + 2b_1b_3)\sigma^2 + 3(b_3^2 + 2b_2b_4)\sigma^4 + 15b_4^2\sigma^6, \\ J_3 = 2C_1 \cdot \exp(-D_1\theta_{emi}^2)(b_1 + b_3C_3 + 6b_4C_3^2 \\ \quad + 2\alpha b_2C_3\theta_{emi} + 4\alpha^2C_3^2b_3\theta_{emi}^2 + 8\alpha^3C_3^3b_4\theta_{emi}^3). \end{cases} \quad (4.62)$$

Pour clore la présentation du nouveau modèle EDAK, il était important de quantifier l'erreur introduite par le biais du développement limité (de manière à fixer son ordre en particulier). La figure (4.7) présente les courbes différences entre le modèle de Hellequin et le modèle EDAK (en fixant  $\beta = 2$ ) et ceci pour des variations d'un des trois paramètres ( $\sigma$ ,  $L_{cl}$  ou  $L_{ct}$ ). Ces courbes sont à comparer avec les niveaux des courbes représentées sur la figure (4.6). Cette comparaison permet de conclure que l'approximation réalisée par le développement limité est satisfaisante puisque l'erreur maximale sur  $\nu_I$  est de 0.06 pour des indices  $\nu_I$  pouvant atteindre des niveaux de 50 (Fig. 4.6).

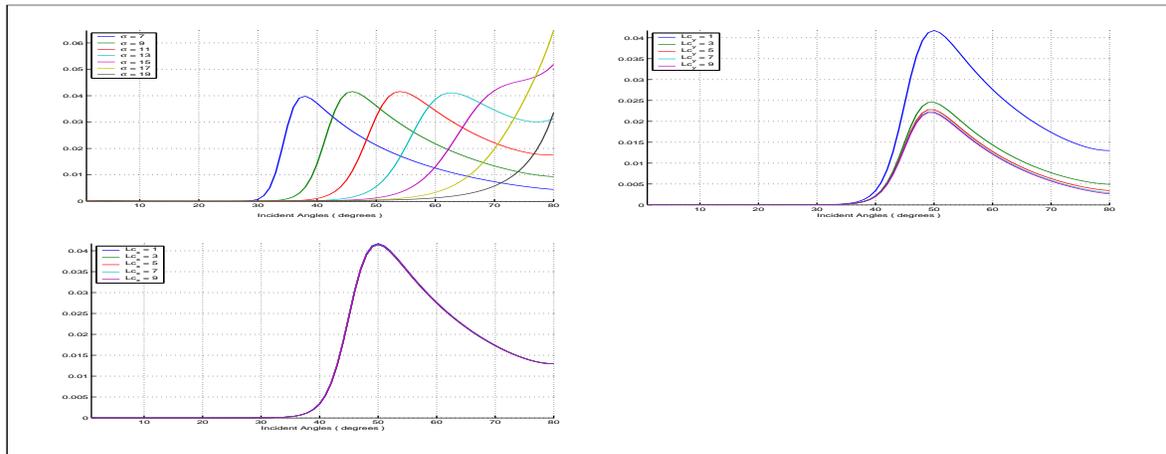


FIG. 4.7 – Courbes de différences entre modèles EDAK et Hellequin pour le calcul de  $\nu_I$  pour différentes valeurs de  $\sigma$ .

#### 4.4.2 Confrontation expérimentale

Dans cette partie, les résultats expérimentaux vont être ajustés sur trois modèles différents :

- ★ le modèle de Oliver,
- ★ le modèle de Hellequin issu d'une modélisation de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  en  $\cos^2$ ,
- ★ le modèle EDAK avec une loi de  $BS$  en  $\cos^\beta$ .

Dans un premier temps, l'étude sera réalisée sur un site de sable fin "homogène" qui réunit les avantages suivants :

- ★ homogénéité sédimentaire,
- ★ bathymétrie plate,
- ★ paramètre de forme ayant une décroissance pour les angles rasants,
- ★ ajustement adéquat de l'indice de rétrodiffusion  $BS(\theta)$  selon le modèle en  $\cos^2$ .

Ce fond de sable fin (site 5 de la campagne *Reflacou*) permet de vérifier l'ajustement des deux modèles Hellequin et EDAK sur un fond présentant un loi de rétrodiffusion en  $\cos^2$ .

Dans un second temps, les modèles sont ajustés sur quatre autres fonds (Annexe C) :

- ★ 1 zone de roches ;
- ★ 1 zones (site 1) de vase colonisée par des crépidules (bivalves) ;
- ★ 1 zone de sable grossier (site 4) ;
- ★ 1 seconde zone de sable fin (site 2).

Ces fonds présentent des caractéristiques de rugosité diverses ; en particulier, le comportement de leur indice angulaire de rétrodiffusion est variables (cf. Chapitre 3). Les ajustements des trois modèles du paramètre de forme sont comparés pour déterminer leur capacité à représenter l'évolution angulaire des fonds marins.

Les données en intensité ont été récoltées pour les sites décrits ci-dessus. Puis, ceux-ci sont triés par secteurs angulaires de 5 degrés partant de -75 degrés (bâbord) à 75 degrés (tribord). L'estimation des paramètres de la loi  $\mathcal{K}$  est réalisée par l'estimateur  $A$  (cf. Annexe B). Les paramètres des trois modèles de dépendance du paramètre de forme sont obtenus par ajustement ; l'algorithme d'optimisation utilisé est de type Newton.

4.4.2.1 Résultats sur un fond de sable fin *homogène*

La première étape menant à la détermination des paramètres du modèle de Hellequin consiste à ajuster l'indice de rétrodiffusion  $BS(\theta)$  mesuré sur les deux modèles Hellequin et EDAK. La figure (4.8) présente les résultats.

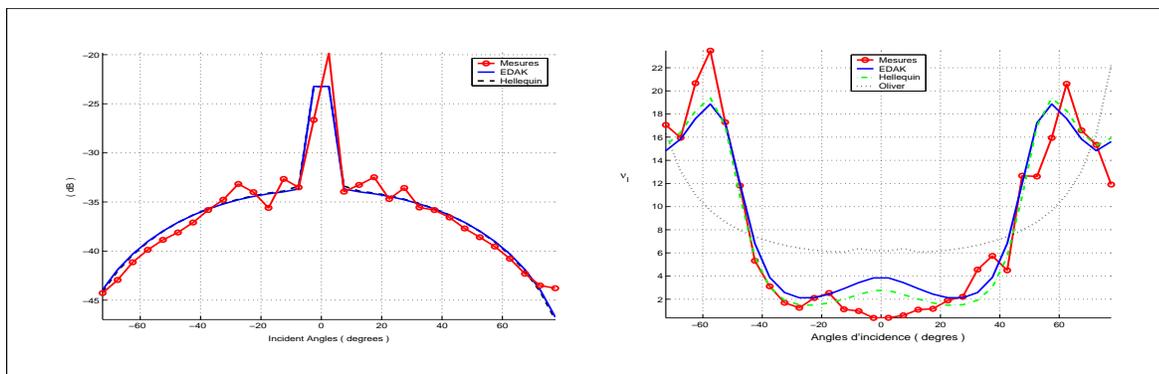


FIG. 4.8 – Ajustements pour les modèles Oliver, Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion (*gauche*) et du paramètre de forme  $\nu_I$  (*droite*) pour un fond de **sable fin** homogène (site 5).

Les ajustements de l'indice de rétrodiffusion (Fig. 4.8 *gauche*) sont satisfaisants au sens de l'erreur quadratique moyenne (Tab. 4.3 et 4.4). L'ajustement du modèle EDAK amène numériquement à  $\beta = 1.935$ ; proche de la valeur théorique de 2 pour laquelle le site a été choisi. Les courbes des modèles Hellequin et EDAK sont d'ailleurs superposées.

Les ajustements sur le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  obtenus d'une part à partir du modèle de Oliver (de paramètres  $L_{c_t}$  et  $L_{c_l}$  : longueurs de corrélations spatiales de l'image et  $\nu$  paramètre de forme de la loi  $\Gamma$  supposé constante le long de la fauchée) et d'autre part par les modèles Hellequin et EDAK (de paramètres  $L_{c_l}$ ,  $L_{c_t}$ ,  $\sigma$  écart-type des angles d'incidence et les paramètres de la fonction  $BS$ ) sont représentés en figure (4.8). La figure (4.8) montre clairement que le modèle de Oliver est incapable de prévoir l'évolution angulaire du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$ . Les modèles Hellequin et EDAK démontrent une bonne adéquation aux données pour les angles rasants; les deux modèles étant quasiment superposés. Pourtant, pour les angles spéculaires ( $[-20^\circ, 20 \text{ deg}]$ ), les ajustements s'éloignent des données réelles. La validité du modèle est donc remise en cause pour ce secteur angulaire. Enfin, l'évolution angulaire du paramètre de forme est légèrement dissymétrique. Quantitativement, l'écart quadratique moyen (EQM) entre le modèle d'Oliver et les données réelles est de 5.751. Cet écart pour le modèle Hellequin (respectivement EDAK) est de 1.95 (resp. 2.21).

En conclusion, pour une site choisi homogène, les modèles Hellequin et EDAK témoignent d'une plus grande capacité d'adéquation aux données expérimentales que le modèle d'Oliver. En effet, celui-ci ne permet pas de prendre en compte les singularités de certains types de fonds. Ce fond présente un indice de rétrodiffusion dont l'évolution angulaire pour les angles rasants peut être modélisé par une loi de Lambert ( $\beta = 2$ ). Les ajustements des modèles Hellequin et EDAK étant presque superposés, la justification du modèle EDK est une nouvelle fois assurée. Enfin, ces premiers résultats ont mis en évidence le fait que l'évolution angulaire n'est pas symétrique. En conséquence, les ajustements sur les fonds dans la section suivante seront réalisés distinctement à bâbord puis à tribord.

#### 4.4.2.2 Résultats sur l'ensemble des zones

Une analyse quantitative est menée sur l'ensemble des fonds dans cette partie. Ainsi, les figures (4.9, 4.10, 4.11, 4.12 et 4.13) montrent les ajustements sur l'indice de rétrodiffusion  $BS$  mesuré pour les deux modèles (Hellequin et EDAK). De façon à quantifier les différences, les écarts quadratiques moyens (EQM) sont calculés pour chaque ajustement et retranscrits dans les tableaux (4.3) et (4.4) avec les paramètres des modèles.

Facies	Modèle Hellequin				
	EQM	A	$\alpha$	B	$\beta$
Vase/crépidules (site 1)	<b>3.46</b>	-15.2	328	-23.8	2
Sable fin (site 2)	<b>2.18</b>	-21.6	309	-33.1	2
Sable grossier (site 4)	<b>2.14</b>	-11.1	459	-20.1	2
Sable fin (site 5)	<b>1.28</b>	-21.1	310	-33.6	2
Roches	<b>3.73</b>	-11.9	601	-25.0	2

TAB. 4.3 – Résultats de l'ajustement sur l'indice de rétrodiffusion  $BS$  pour le modèle Hellequin (les paramètres A et B sont exprimés en dB).

Facies	Modèle EDAK				
	EQM	A	$\alpha$	B	$\beta$
Vase/crépidules (site 1)	<b>1.52</b>	-13.4	487	-27.3	0.35
Sable fin (site 2)	<b>2.04</b>	-21.2	389	-32.2	2.43
Sable grossier (site 4)	<b>1.39</b>	-11.1	405	-21.9	0.93
Sable fin (site 5)	<b>1.27</b>	-20.5	370	-33.7	1.95
Roches	<b>1.12</b>	-13.0	433	-22.8	0.12

TAB. 4.4 – Résultats de l'ajustement sur l'indice de rétrodiffusion  $BS$  pour le modèle EDAK (les paramètres A et B sont exprimés en dB).

Le modèle Lambert inclu dans le modèle Hellequin ne permet pas d'ajuster correctement les données de l'indice de rétrodiffusion. Les ajustements du modèle EDAK sont de meilleure qualité, permettant une plus grande flexibilité de l'évolution angulaire pour les angles intermédiaires et les incidences rasantes. Seul l'ajustement du fond de sable fin (site 2) pose problème (Fig. 4.10 *milieu*); le modèle EDAK n'est pas meilleur que le modèle en  $\cos^2$ . La pente quasi-constante de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  pour ce type de fond pourrait être modélisée par l'ajout d'une composante transitoire (sous la forme d'une gaussienne) faisant le lien entre le secteur spéculaire et le secteur des angles rasants ([Lur 02]).

Les figures restantes (Fig. 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 et 4.13) représentent pour chaque zone sédimentaire, les ajustements du côté bâbord et du côté tribord, des trois modèles (Oliver, Hellequin et EDAK du paramètre de forme  $\nu_I$ ).

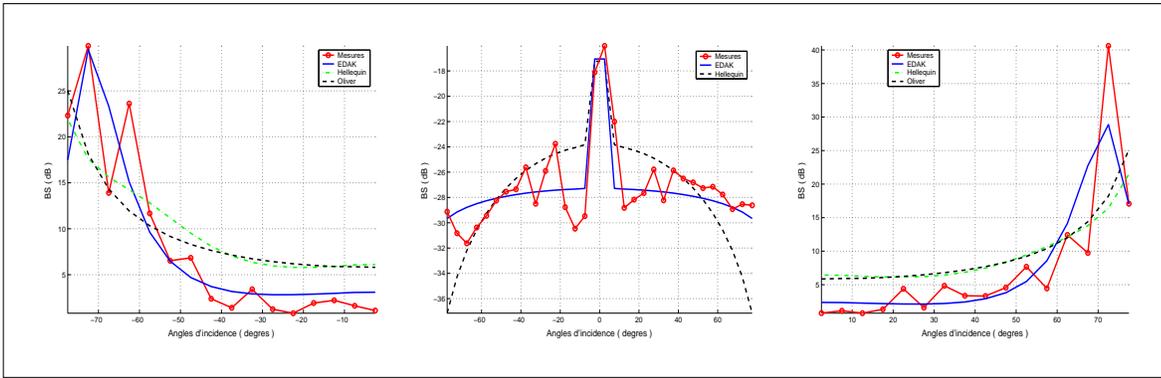


FIG. 4.9 – Ajustements pour les modèles Oliver , Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion (*milieu*) et du paramètre de forme  $\nu_I$  bâbord (*gauche*) et tribord (*droite*) pour un fond de **vase/crépidules** (site 1).

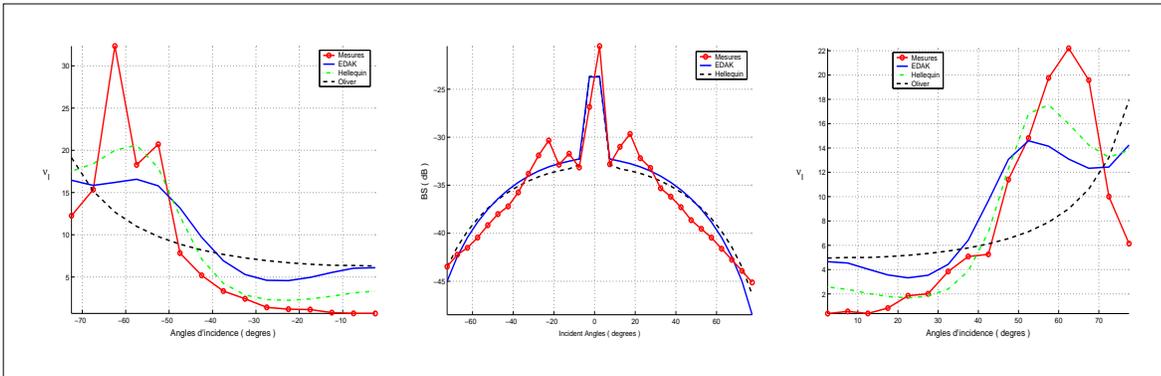


FIG. 4.10 – Ajustements pour les modèles Oliver , Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion (*milieu*) et du paramètre de forme  $\nu_I$  bâbord (*gauche*) et tribord (*droite*) pour un fond de **sable fin** (site 2).

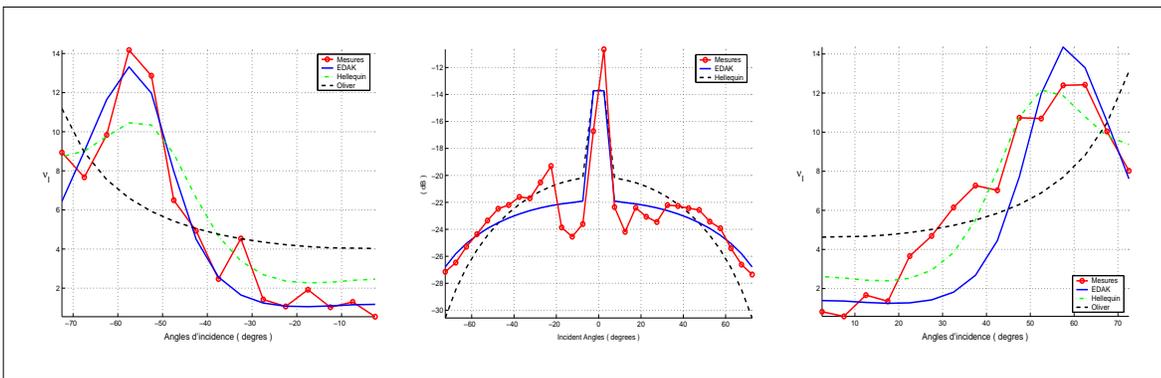


FIG. 4.11 – Ajustements pour les modèles Oliver , Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion (*milieu*) et du paramètre de forme  $\nu_I$  bâbord (*gauche*) et tribord (*droite*) pour un fond de **sable grossier** (site 4).

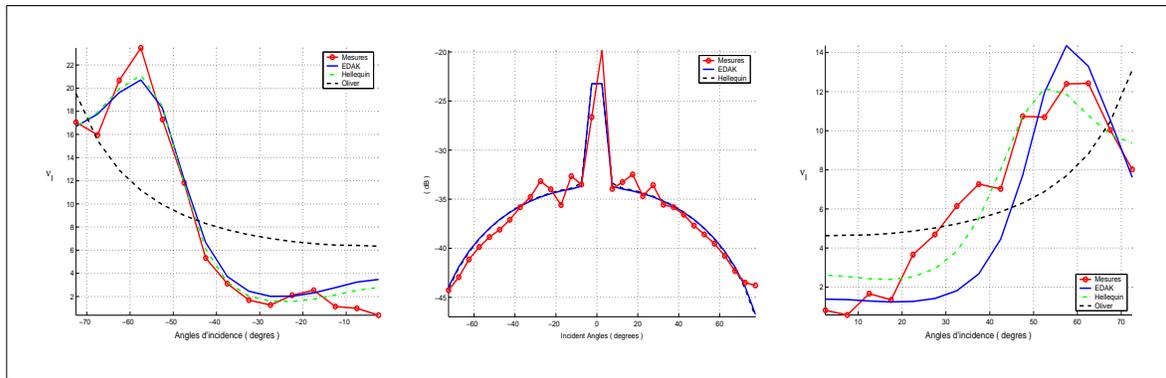


FIG. 4.12 – Ajustements pour les modèles Oliver , Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion (*milieu*) et du paramètre de forme  $\nu_I$  bâbord (*gauche*) (*droite*) pour un fond de **sable fin** (site 5).

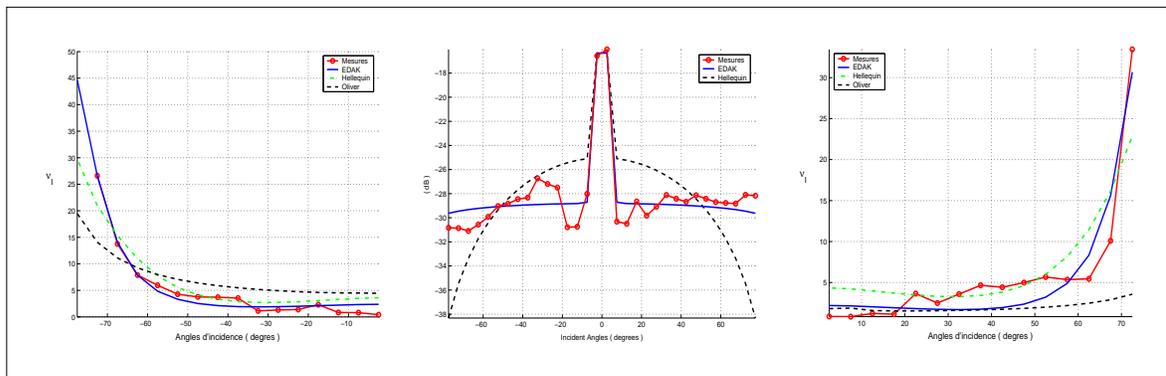


FIG. 4.13 – Ajustements pour les modèles Oliver , Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion (*milieu*) et du paramètre de forme  $\nu_I$  bâbord (*gauche*) (*droite*) pour un fond de **roches**.

Les écarts quadratiques entre mesures expérimentales et modèles ont été calculés et sont retranscrits dans les tableaux 4.5 et 4.6 accompagnés des paramètres d'ajustements des modèles.

Premièrement, les ajustements trouvés par modèle de Oliver simple sont médiocres révélant une nouvelle fois l'incapacité de ce modèle, seul à suivre l'évolution angulaire du facteur de forme de la loi  $\mathcal{K}$ . L'apport des modèles Hellequin et EDAK sur le modèle d'Oliver est indéniable pour l'ensemble des fonds.

Dans l'optique de comparer les deux modèles Hellequin et EDAK, trois cas de figures peuvent être distingués :

- ★ Le comportement angulaire de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  du site 5 (sable fin) est modélisé par une loi  $\beta$ -Lambert où  $\beta$  vaut 2. Les ajustements pour les deux modèles du paramètre de forme présentent des comportements et des niveaux identiques (Fig. 4.12 *gauche* et *droite*). Le développement limité effectué pour le calcul du modèle EDAK n'a pas engendré de biais. En outre, les ajustements séparément à bâbord puis tribord permet de gagner en précision par rapport aux résultats du paragraphe précédent (réalisés sur le même site).

- ★ Les ajustements sur les fonds de sable grossier, de roches et de vase/crépidules sont nettement meilleurs (Tab. 4.6) pour le modèle EDAK. Pour ce type de zone à forte rugosité, le comportement angulaire de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  s'éloigne largement de la loi en  $\cos^2$  (vase/crépidules :  $\beta = 0.35$ , sable grossier :  $\beta = 0.93$  et roches :  $\beta = 0.12$ ). L'importance du modèle d'indice de rétrodiffusion  $BS$  est ainsi prouvée et le développement du nouveau modèle justifié.
- ★ Pour le site 2 de sable fin, les modèles ne retranscrivent pas d'une façon raisonnable le comportement angulaire du facteur de forme (Fig. 4.10 *gauche et droite*). La modélisation de l'indice de rétrodiffusion  $BS$  pour cette zone n'a pas été trouvée suffisante. Un enrichissement du modèle de  $BS$  pourrait alors être envisagé.

Facies	Modèle Oliver			
	EQM	$Lc_l$	$Lc_t$	$\nu$
Vase/crépidules bâbord	<b>5.53</b>	4.50	0.190	1.14
Vase/crépidules tribord	<b>7.05</b>	4.98	0.350	1.84
Sable fin (site 2) bâbord	<b>7.50</b>	4.99	0.304	2.87
Sable fin (site 2) tribord	<b>6.77</b>	4.99	0.710	2.89
Sable grossier (site 4) bâbord	<b>3.42</b>	4.99	0.672	2.04
Sable grossier (site 4) tribord	<b>3.20</b>	4.99	0.600	2.16
Sable fin (site 5)	<b>5.80</b>	4.99	0.250	1.61
Sable fin (site 5)	<b>5.16</b>	4.95	0.210	2.10
Roches bâbord	<b>4.34</b>	4.99	0.160	0.71
Roches tribord	<b>5.84</b>	4.99	0.120	0.59

TAB. 4.5 – Résultats de l'ajustement sur le paramètre de forme  $\nu_I$  pour le modèle de Oliver.

Facies	Modèle Hellequin			
	EQM	$Lc_l$	$Lc_t$	$\sigma$
Vase/crépidules (site 1)bâbord	<b>5.39</b>	4.99	0.130	19.91
Vase/crépidules (site 1)tribord	<b>7.43</b>	4.99	0.126	21.74
Sable fin (site 2)bâbord	<b>4.05</b>	5.00	0.163	14.46
Sable fin (site 2)tribord	<b>3.21</b>	5.00	0.225	13.78
Sable fin (site 4)bâbord	<b>1.76</b>	4.99	0.360	15.68
Sable fin (site 4)tribord	<b>1.40</b>	5.00	0.347	15.18
Sable fin (site 5)bâbord	<b>1.21</b>	4.99	0.170	13.66
Sable fin (site 5)tribord	<b>2.10</b>	5.00	0.203	13.75
Roches bâbord	<b>2.31</b>	4.99	0.080	19.07
Roches tribord	<b>3.95</b>	4.99	0.070	19.57

TAB. 4.6 – Résultats de l'ajustement sur le paramètre de forme  $\nu_I$  pour le modèle Hellequin.

Facies	Modèle EDAK			
	<b>EQM</b>	$L_{cl}$	$L_{ct}$	$\sigma$
Zone 1 bâbord	<b>3.64</b>	4.97	0.089	23.03
Zone 1 tribord	<b>4.85</b>	4.87	0.110	22.14
Zone 2 bâbord	<b>5.73</b>	5.01	0.127	15.00
Zone 2 tribord	<b>4.48</b>	5.02	0.170	13.70
Zone 4 bâbord	<b>1.28</b>	4.99	0.780	15.55
Zone 4 tribord	<b>2.30</b>	3.71	0.600	16.14
Zone 5 bâbord	<b>1.50</b>	4.98	0.145	13.83
Zone 5 tribord	<b>2.13</b>	5.00	0.170	13.88
Zone 6 bâbord	<b>1.10</b>	5.00	0.090	23.84
Zone 6 tribord	<b>2.40</b>	5.00	0.106	22.99

TAB. 4.7 – Résultats de l’ajustement sur le paramètre de forme  $\nu_l$  pour le modèle EDAK.

L’interprétation quantitative des paramètres du modèle EDAK est difficile et périlleuse. Cependant, les valeurs d’écart-type  $\sigma$  trouvées par ajustement (Tab. 4.7) montre une variation en fonction du type de fond intéressante, ses valeurs pour les fonds très rugueux (roches et vase/crépidules) sont très supérieurs (autour de  $23^\circ$ ) par rapport aux autres fonds. La longueur de corrélation transversale  $L_{ct}$  présente toujours la même valeur d’ajustement qui est la limite fixée lors de l’algorithme d’ajustement. De plus, ce paramètre a montré lors des présentations de modèles, que ses variations entraînent peu de conséquence sur les niveaux du paramètre de forme simulé. La prise en compte d’un modèle à deux dimensions n’est sans doute dans ces conditions pas nécessaire. Enfin, nous ne donnerons aucune interprétation du second paramètre de corrélation.

Enfin, même si les ajustements sur les angles rasants semblent corrects, les niveaux du modèle sur les angles spéculaires ( $[-20^\circ, 20^\circ]$ ) posent des problèmes. En effet, les courbes de modélisation n’ajustent jamais correctement les données expérimentales. Cette découpe angulaire rappelle celle réalisée pour les modélisations physiques de l’indice de rétrodiffusion ([Med 98]) :

- ★ Pour les angles spéculaires, les modélisations s’appuient sur l’existence de facettes orientées perpendiculairement à la direction d’émission.
- ★ Pour les angles rasants, les lois de la diffusion géométrique s’appliquent et le modèle des petites perturbations est utilisé, la rétrodiffusion est contrôlé par les effets dus au microrelief.

Une transposition aux modélisations statistiques peut ainsi être menée. Si le modèle des petites perturbations est utilisé pour les angles rasants, cela sous-entend que la rugosité de la surface de diffusion domine le processus et donc qu’il se produit des phénomènes d’interférence au sein de la cellule de résolution. Le modèle des points réverbérants, base du modèle de Oliver, est alors valide. Pour les angles spéculaires, l’existence de plans tangents suppose qu’un petit ensemble de diffuseurs domine le processus, invalidant de ce fait les hypothèses du modèle des points réverbérants. Ceci pourrait expliquer pourquoi l’ajustement du paramètre de forme n’est pas de bonne qualité dans ce domaine angulaire. Une extension du modèle EDAK peut alors être envisagé.

## 4.5 Conclusions

Dans ce chapitre, la modélisation des statistiques de la rétrodiffusion des fonds marins a été étudiée pour deux systèmes sonar haute résolution. La loi  $\mathcal{K}$  a montré une bonne capacité et robustesse à modéliser les données empiriques pour ces deux systèmes d'acquisition. Son interprétation physique a montré l'intérêt de son utilisation dans un contexte d'identification des fonds marins. En particulier, ses deux paramètres permettent une description énergétiques et texturales du site d'étude.

En outre, l'évolution angulaire du paramètre décrivant sa forme a montré une variété de comportements discriminant du type de fond insonifié. En particulier, les deux fonds présentant le même indice de rétrodiffusion (roches et sable grossier) peuvent être discriminés grâce à ce paramètre.

Un modèle de la dépendance angulaire du paramètre de forme a été étendu tenant compte des caractéristiques du système d'acquisition et des caractéristiques d'une grande diversité de fond. Ce modèle a été vérifié sur des données expérimentales.

Les méthodes de segmentation statistique d'images sonar doivent dans un premier temps évoluer pour tenir compte des caractéristiques d'acquisition et d'une modélisation adaptée des données en loi  $\mathcal{K}$ . Le chapitre suivant réalise cette évolution.

## Chapitre 5

# Application à la segmentation d'images sonar

La communauté scientifique des géosciences marines (géophysique, sédimentologie, géotechnique, ...) a à sa disposition divers moyens d'exploration utilisés pour obtenir des informations quant à la nature du fond. Les outils de prélèvement tels que les carottages ou les prélèvements par benne, donnent grâce à l'analyse granulométrique et à des tests géotechniques, des indications très précises de la composition du sédiment mais leur caractère ponctuel ne permet pas une cartographie extensive. Par contre, les systèmes acoustiques d'imagerie peuvent couvrir de très grandes zones en peu de temps et produisent des images des fonds marins traduisant les caractéristiques de l'interface eau/sédiment ; ils sont donc employés systématiquement en complément des mesures, observations et prélèvements géologiques, permettant d'élaborer des cartes sédimentaires des sites d'études. Le dépouillement et les recoupements d'une telle masse de données sont longs et fastidieux. Cette section s'inscrit donc dans un contexte de développements d'outils pour l'aide à la construction de telles cartes par le biais d'une segmentation supervisée des images sonar des fonds marins.

Les analyses menées dans les deux chapitres précédents ont mis en évidence des caractéristiques particulières des signaux rétrodiffusés par les fonds marins et enregistrés par les systèmes sonar. Premièrement, le caractère discriminant du type de fond de l'indice de rétrodiffusion a été mis en évidence malgré des fluctuations importantes liés à de petits changements des conditions d'acquisition. La dépendance de l'indice en fonction de l'angle d'incidence est sa particularité principale et doit être prise en compte dans un processus de segmentation. En outre, les signaux issus de deux systèmes sonar ont été caractérisés par un comportement statistique répondant à une loi  $\mathcal{K}$  sur l'ensemble de la fauchée. Le paramètre décrivant la forme de cette distribution, s'est révélé être un descripteur de la rugosité du fond, évoluant en fonction de l'angle d'incidence et permettant de discriminer des fonds de mêmes indices de rétrodiffusion.

La segmentation est un traitement qui consiste à partitionner l'image à traiter en régions homogènes, suivant des critères *a priori*. De nombreuses approches ont été testées (énergétiques, texturales, mixtes,...). Celle proposée par Dugelay ([DUG97]) est l'une des seules tenant compte des particularités d'acquisition des systèmes de cartographie sous-marine. Dans son mémoire de thèse, elle propose un algorithme de segmentation basée sur une approche markovienne. Dans ce chapitre, l'approche proposée considère la dépendance angulaire des caractéristiques énergétiques et statistiques des systèmes sonar dans la discrimination des fonds

marins. La première partie propose d'inclure la loi  $\mathcal{K}$  (et ses paramètres dépendant de l'angle d'incidence) dans l'algorithme de segmentation markovienne préalablement développé par Dugelay (approche proposée par Hellequin ([Hel 98]) pour le sondeur multifaisceau EM1000 qui ne l'avait toutefois pas mise en œuvre). Les avantages de la prise en compte de la loi  $\mathcal{K}$  sont exposés. La seconde partie propose un algorithme de segmentation selon une approche combinant une méthode SVM (Support Vector Machines) probabilisée et des champs de Markov. Avant d'exploiter les données, ce chapitre débute par des rappels théoriques sur ces deux méthodes.

## 5.1 Présentation et notations

Dans ce chapitre, nous nous placerons dans le cadre de la segmentation supervisée d'images sonar pour la discrimination des fonds marins. En fonction de la connaissance du terrain (issue de prélèvements ou de l'analyse du contexte), un expert géologue définit préalablement de petites zones d'apprentissage sur l'image sonar à partir de critères d'homogénéité (en général visuels) de l'énergie rétrodiffusée (niveau de gris de l'image). De cette manière, on dispose d'un ensemble d'**échantillons d'apprentissage** pour lequel la "vérité géologique" est connue. De manière à quantifier la qualité de la segmentation, on a souvent recours à un second ensemble d'**échantillons de test**, intermédiaires pour lequel on connaît également la vérité géologique. Le dernier ensemble constitue les images à segmenter.

Segmenter une image consiste à estimer un ensemble de variables  $Y$  cachées à partir d'observations  $X$ . Soit  $X = \{X_p \in \mathbb{R}^L, p \in \mathcal{P}\}$  le champ aléatoire des observations de l'image de dimension  $N * M$ , considérée comme un ensemble de sites  $\mathcal{P} = \{p = (i, j), 1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n\}$ . Soit  $Y = \{Y_p, p \in \mathcal{P}\}$ , le champ aléatoire des étiquettes, chaque  $Y_p$  prend ses valeurs dans l'ensemble fini  $\mathcal{E} = \{1, \dots, S\}$  des étiquettes possibles. Enfin, soient  $x = \{x_p, p \in \mathcal{P}\}$  une réalisation (mesures ou observations) du champ  $X$  et  $y = \{y_p, p \in \mathcal{P}\}$  une réalisation du champ  $Y$ .

L'idée sous-jacente de tout processus de classification est d'établir une règle de décision, qui associe une étiquette aux observations. La résolution de ce problème se résume alors à l'estimation d'une fonction  $d : \mathbb{R}^L \rightarrow \mathcal{E}$ , en utilisant l'ensemble d'apprentissage. La vérité géologique étant disponible, cet ensemble est composé de couples de variables aléatoires supposées indépendantes et identiquement distribuées selon une distribution  $\mathbb{P}[X, Y]$  :

$$(x_1, y_1), \dots, (x_p, y_p) \in \mathbb{R}^L \times E. \quad (5.1)$$

La meilleure fonction  $d$  que l'on peut obtenir est celle minimisant le **risque théorique**  $R(d)$  :

$$\hat{d}_{opt} \triangleq \operatorname{argmin}_d [R(d)], \quad (5.2)$$

$$\triangleq \operatorname{argmin}_d \left[ \int L(d(x), y) d\mathbb{P}[x, y] \right], \quad (5.3)$$

où  $L$  désigne une fonction de coût choisie.

Nous nous placerons pour résoudre ce problème dans un cadre de classification bayésienne pour lequel le critère d'estimation est basé sur la minimisation de l'espérance d'une fonction de

coût conditionnellement aux observations. L'estimateur optimal  $\hat{y}_{opt}$  sera alors obtenu lorsque le risque est minimal :

$$\hat{y}_{opt}(x) = \operatorname{argmin}_{\hat{y}} \mathbb{E}[L(Y, \hat{y})|X = x], \quad (5.4)$$

$$= \operatorname{argmin}_{\hat{y}} \left[ \sum_{y \in \mathcal{E}} L(y, \hat{y}) \cdot \mathbb{P}[Y = y|X = x] \right]. \quad (5.5)$$

où la probabilité  $\mathbb{P}[Y = y|X = x]$  est appelée **probabilité a posteriori**.

L'estimateur du **Maximum a Posteriori** (MAP) est l'estimateur dont la fonction de coût pénalise de la même façon toutes les configurations différentes de  $\hat{y}(x)$  :

$$L(y, \hat{y}) = 1 - \delta(y, \hat{y}) \text{ avec } \delta(y, \hat{y}) = \begin{cases} 1 & \text{si } y = \hat{y}; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.6)$$

Alors,

$$\hat{y}_{MAP}(x) = \operatorname{argmin}_{\hat{y}} \left[ \sum_{y \in \mathcal{E}} (1 - \delta(y, \hat{y})) \mathbb{P}[Y = y|X = x] \right], \quad (5.7)$$

$$= \operatorname{argmax}_{y \in \mathcal{E}} \mathbb{P}[Y = y|X = x]. \quad (5.8)$$

L'estimation par MAP consiste à chercher la configuration d'étiquettes la plus probable à partir des observations de la réalisation, donc à maximiser la probabilité  $\mathbb{P}[Y = y|X = x]$ . Cette maximisation ne peut être réalisée directement car l'espace des configurations est trop grand. La segmentation d'une image de  $N^2$  pixels en deux classes nécessiterait l'estimation de  $2^{N^2}$  probabilités.

Le cadre de la théorie bayésienne permet de calculer la probabilité *a posteriori* de l'équation (5.8) :

$$\mathbb{P}[Y = y|X = x] = \frac{\mathbb{P}[X = x|Y = y]\mathbb{P}[Y = y]}{\mathbb{P}[X = x]}; \quad (5.9)$$

où

- ★  $\mathbb{P}[X = x|Y = y]$  est la probabilité de  $X$  conditionnellement à  $Y = y$  qui modélise la déformation qui conduit du champ des étiquettes  $Y$  au champ des paramètres  $X$  ;
- ★  $\mathbb{P}[Y = y]$  est la probabilité *a priori* de l'état  $y$  qui traduit l'information a priori que l'on a sur l'image ;
- ★  $\mathbb{P}[X = x]$  est la probabilité de l'état  $x$ , qui ne dépend pas de  $y$  et n'intervient donc pas dans l'estimation de  $\hat{y}$ .

L'équation (5.8) devient donc :

$$\hat{y}_{MAP}(x) = \operatorname{argmax}_{y \in \mathcal{E}} \left[ \mathbb{P}[X = x|Y = y] \cdot \mathbb{P}[Y = y] \right]. \quad (5.10)$$

## 5.2 Champs de Markov

La résolution du problème de segmentation se situe désormais au niveau du choix des deux termes de probabilité de l'équation (5.10). Le cadre de la modélisation markovienne offre une solution qui a été de multiples fois utilisée en segmentation d'images radar ou sonar (par exemple [Fjo 00, Kua 87, Dug 97]). Les notions de base de cette approche (définition d'un champ de Markov, systèmes de voisinage, cliques, ...) sont rapidement rappelées dans la suite, les détails peuvent être trouvés la thèse de Dugelay ([Dug 97]) et dans les références incluses.

La philosophie de cette approche repose sur le fait qu'un pixel est fortement influencé par ses voisins les plus proches et quasiment pas par des pixels lointains. La notion de voisinage est alors primordiale. L'intérêt de la modélisation markovienne est de pouvoir spécifier localement un modèle global. Cependant, la réalisation de cet objectif passe par l'estimation de paramètres pour chaque site (pixel) :

- ★ ceux associés à la loi  $\mathbb{P}[X = x|Y = y]$  caractérisant le modèle du bruit. Cette probabilité permet de modéliser le lien entre les étiquettes et les observations. Une segmentation de qualité nécessitera une bonne connaissance de la nature du bruit qui s'applique sur l'image (i.e la nature des lois associées à chacune des classes existant dans l'image et paramètres associés à ces lois).
- ★ ceux associés à la loi  $\mathbb{P}[Y = y]$  qui caractérise et modélise les propriétés du champ des étiquettes et que l'on définit dans une segmentation markovienne comme étant une distribution de Gibbs ([Dug 97]). C'est l'estimation de ces paramètres (et plus précisément des paramètres associés à chaque clique) qui va permettre d'introduire des contraintes génériques qui, dans le processus de segmentation, traduisent les propriétés locales et globales du champ des étiquettes (propriétés géométriques, homogénéité, ...) que l'on cherche à obtenir.

Soit  $\mathcal{V}_p$  un voisinage du pixel  $p$  dont la forme ne dépend pas de celui-ci, le champ des étiquettes  $Y$  est **markovien** si et seulement si la probabilité que le pixel  $p$  appartienne à une classe  $y_p$  conditionnellement à toutes les classes attribuées aux pixels du reste de l'image est égale à la probabilité de  $y_p$  conditionnellement aux classes du voisinage  $\mathcal{V}_p$  de  $p$  :

$$\mathbb{P}[Y_p = y_p|Y_q = y_q; q \neq p \in \mathcal{P}] = \mathbb{P}[Y_p = y_p|Y_q = y_q; q \in \mathcal{V}_p] \quad (5.11)$$

En outre, le théorème de Hammersley et Clifford garantit que le champ  $Y$  est alors une **distribution de Gibbs** :

$$\mathbb{P}[Y = y] = \frac{1}{Z} e^{-U(y)}, \quad (5.12)$$

où

- ★  $U(y)$  l'**énergie de régularisation** du champ des étiquettes, est la somme des potentiels locaux  $V_c$  sur les cliques  $c \in \mathcal{C}$ , i.e  $U(y) = \sum_{c \in \mathcal{C}} V_c(y)$  ;
- ★  $Z$  est une constante de normalisation définie telle que  $U(y) = \sum_{y \in \mathcal{E}^{(N.M)}} e^{-U(y)}$ .

Cette probabilité est en pratique impossible à estimer en raison du grand nombre de configurations possibles :  $S^{N.M}$  pour une images de  $N.M$  pixels. Le théorème de Hammersley

et Clifford rend également possible le lien entre probabilité locale (au niveau du pixel) et globale (au niveau de l'image) ([Fjo 00]) :

$$\mathbb{P}[Y_p = y_p | Y_q = y_q; q \in \mathcal{V}_p] = \frac{1}{Z_p} e^{-U_p(y_p, (y_q)_{q \in \mathcal{V}_p})}, \quad (5.13)$$

où  $U_p(y_p, (y_q)_{q \in \mathcal{V}_p})$  est l'énergie de régularisation locale et  $Z_p$  sa constante de normalisation.

Enfin, en supposant que les variables aléatoires  $(X_p)_{p \in \mathcal{P}}$  sont indépendantes conditionnellement à  $Y$  et que la distribution de chaque  $X_p$  conditionnellement à  $Y$  est égale à sa distribution conditionnellement à  $Y_p$ , la distribution de  $X$  conditionnellement à  $Y$  est déterminée par les  $S$  distributions de  $X_p$  conditionnellement à  $Y_p = 1, \dots, S$  :

$$\mathbb{P}[X = x | Y = y] = \prod_{p \in \mathcal{P}} \left( \mathbb{P}[X_p = x_p | Y_p = y_p] \right) \quad (5.14)$$

L'estimateur global du MAP est alors (Eq. 5.10) :

$$\hat{y}_{MAP}(x) = \operatorname{argmax}_{y \in \mathcal{E}} \left[ \frac{1}{Z'} e^{-U(y) + V(x, y)} \right]. \quad (5.15)$$

où  $Z'$  est une nouvelle constante de normalisation et  $V(x, y) = -\log(\mathbb{P}[X = x | Y = y])$  est l'**énergie de rappel aux données**.

La version locale de cet estimateur est alors donnée par :

$$\hat{y}_{MAP}(x_p) = \operatorname{argmax}_{y \in \mathcal{E}} \left[ \frac{1}{Z'_p} \exp \left( -U_p(y_p, (y_q)_{q \in \mathcal{V}_p}) + \sum_{p \in \mathcal{P}} \log \mathbb{P}[X_p = x_p | Y_p = y_p] \right) \right]. \quad (5.16)$$

Le recherche d'un tel maximum est ensuite un problème classique d'optimisation. Une solution approchée peut être obtenue par des algorithmes déterministes comme l'algorithme ICM (*Iterated Conditional Modes*, [Bes 77]). Des estimateurs autres que le MAP existent comme l'estimateur du Mode des Marginales a Posteriori (MPM) mais ne seront pas utilisés dans ce chapitre. La description de ces estimateurs et algorithmes d'optimisation est réalisée en détail dans ([Dug 97, Mig 98]).

## 5.3 Méthodes SVM

Dans les années 90, un nouveau type de méthode est venu compléter l'éventail d'approches destinées à la classification. Cette méthode basée sur la théorie de l'apprentissage statistique, est appelée SVM (Support Vector Machines). Son originalité réside dans le fait qu'elle permet de sélectionner dans une base d'exemples ceux étant les plus pertinents pour la discrimination : les vecteurs supports. Cette méthode est désormais largement popularisée grâce aux bons résultats qu'elle a permis d'obtenir, notamment sur le problème de reconnaissance de caractères ([Vap 95]).

Dans cette section, les notations de la section (5.1) sont reprises. On dispose de  $n$  échantillons d'apprentissage  $\{x_i \in \mathbb{R}^L; i = 1, \dots, n\}$  caractérisés par  $L$  mesures ou observations. La méthode SVM a été construite pour la séparation d'un ensemble en deux étiquettes. Dans un premier temps, pour introduire le concept, l'ensemble des étiquettes sera fixé à deux classes, i.e  $\mathcal{E} = \{-1, +1\}$ . Le problème multiclasse sera évoqué en fin de section. On rappelle que la stratégie est d'utiliser un ensemble d'échantillons pour apprendre les paramètres de classification pour les tester sur un autre ensemble permettant de définir la qualité de la classification.

### 5.3.1 Minimisation du risque

Les observations d'apprentissage permettent d'approximer le risque théorique (Eq. 5.2) par son estimateur empirique :

$$R_{emp}(d) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(d(x_i), y_i), \quad (5.17)$$

qui sera appelé **risque empirique**.

La première solution pour résoudre le problème de minimisation du risque théorique décrit par l'équation (5.2), consiste pour une population d'apprentissage donnée, à minimiser le risque empirique avec comme argument la fonction de décision  $d$ . Deux situations peuvent alors être envisagées ([Mül 01]) :

- ★ Dans le cas où  $n$  est important, on pourra déterminer avec précision la manière de séparer deux nuages de points. Cependant, si la forme de la fonction  $d$  est trop complexe, la séparation d'un trop grand nombre de points extrêmes (qui peuvent être liés au bruit de mesure des paramètres  $x_i$ ) lors de la phase d'apprentissage peut causer des erreurs importantes de classification sur les échantillons de test.
- ★ Dans le cas où le nombre d'échantillons d'apprentissage est faible, la minimisation du risque sera très éloignée de la solution optimale car plusieurs solutions sont possibles.

Cette dichotomie montre le problème de la minimisation du seul risque empirique et représente le compromis à trouver entre un nombre de points d'apprentissage suffisant et la complexité de la classe de fonctions  $\mathcal{D}$ .

La théorie de Vapnik et Chervonenkis ([Vap 95, Vap 98]) fournit une réponse basée sur une mesure de la complexité de la classe de fonction  $\mathcal{D}$  : la dimension Vapnik-Chervonenkis ( $VC$ ),  $h$ . La dimension  $VC$  mesure le nombre de points d'apprentissage qui peuvent être séparés pour toutes les configurations possibles d'étiquettes pour les fonctions  $d$  de la classe  $\mathcal{D}$ . Ils obtiennent alors le résultat important suivant :

Soit  $h$  la dimension  $VC$  de la classe de fonctions  $\mathcal{D}$  et soit  $R_{emp}$  le risque empirique.

$$\forall \delta > 0 \text{ et } d \in \mathcal{D}, R(d) \leq R_{emp}(d) + \sqrt{\frac{h \ln(\frac{2n}{h}) - \ln(\delta/4)}{n}}, \quad (5.18)$$

avec la probabilité  $1 - \delta$  pour  $n > h$ .

Le but de cette démarche baptisée **minimisation du risque structurel**, est de minimiser le risque  $R(d)$ , en obtenant une faible erreur d'apprentissage  $R_{emp}(d)$  tout en gardant la classe des fonctions  $\mathcal{D}$  d'une complexité aussi faible que possible.

Les deux cas suivants peuvent alors se produire :

- ★ Une classe de fonctions très simple entraîne de faibles valeurs du second terme de l'équation mais l'erreur d'apprentissage se révèle très élevée.
- ★ Une classe de fonctions très complexe provoque une faible erreur d'apprentissage mais la valeur du second terme sera dans ce cas, trop importante.

Ces deux remarques exposent le problème : trouver le meilleur compromis entre un modèle de données adéquat et un risque minimal.

Dans la pratique, la borne de l'équation n'est parfois pas analytique ou même pas vraiment utile ; elle sert souvent uniquement de cadre théorique. La technique SVM se contente généralement de contrôler cette dimension  $VC$  par l'intermédiaire d'une autre borne.

### 5.3.2 Marges et dimension VC

Supposons que les échantillons d'apprentissage soient séparables en deux classes (Fig. 5.1) et que l'on cherche à séparer ces deux classes linéairement.

Les classifieurs linéaires sont définis par un **hyperplan** d'équation  $\langle w, x \rangle + b = 0$  où  $w, b$  et  $x \in \mathbb{R}^L$ .  $w$  est le vecteur normal à l'hyperplan,  $b$  est un vecteur de décalage,  $x$  est un vecteur quelconque et  $\langle, \rangle$  dénote le produit scalaire. Chacun des deux demi-espaces définis par ce classifieur correspond à une classe attribuée par le classifieur  $y = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b)$  où  $\text{sign}$  est la fonction signe. Enfin, la **marge** est la distance entre les vecteurs les plus proches de l'hyperplan et l'hyperplan lui-même.

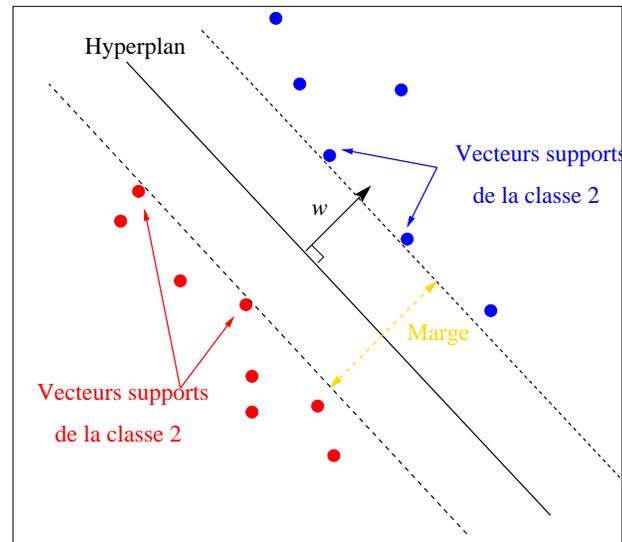


FIG. 5.1 – Hyperplan optimal séparant deux classes, marge et vecteurs supports.

La représentation canonique de l'hyperplan sera utilisée dans la suite, elle est équivalente mais permet des expressions plus simples. Les vecteurs  $w$  et  $b$  sont recalculés de telle manière que les **vecteurs supports**  $x_i$  les plus proches de la frontière de décision satisfassent à  $|\langle w, x_i \rangle + b| = 1$ . Ainsi, soit  $x_1$  et  $x_2$  de tels vecteurs mais de classes différentes, ces vecteurs vérifient  $\langle w, x_1 \rangle + b = 1$  et  $\langle w, x_2 \rangle + b = -1$ .

La distance  $\text{dist}(x; w, b)$  d'un point  $x$  à un hyperplan  $(w, b)$  est définie par :

$$\text{dist}(x; w, b) = \frac{\langle w, x \rangle + b}{\|w\|}. \quad (5.19)$$

La marge  $M$  est alors définie par la distance entre les deux points perpendiculairement à l'hyperplan :

$$M(w, b) = \frac{\langle w, x_1 \rangle + b}{\|w\|} - \frac{\langle w, x_2 \rangle + b}{\|w\|}; \quad (5.20)$$

$$= \frac{2}{\|w\|}. \quad (5.21)$$

L'ensemble des vecteurs d'apprentissage  $\{x_i, i = 1, \dots, n\}$  sera alors séparé de manière optimale par un hyperplan si cet ensemble est séparé sans erreur et si la marge  $M$  est maximale.

L'hyperplan qui sépare les données de manière optimale est celui maximisant la marge et donc minimisant la quantité :

$$\Phi(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2; \quad (5.22)$$

sous les contraintes

$$\forall i \in 1, \dots, n, \quad y_i \cdot [\langle w, x_i \rangle + b] \geq 1. \quad (5.23)$$

Le résultat liant la dimension  $VC$  de la classe des hyperplans canoniques à la marge tient en deux inégalités ([Vap 95]) :

$$h \leq A^2 R^2 + 1 \text{ et } \|w\| \leq A, \quad (5.24)$$

où  $R$  est le rayon de la plus petite boule autour de l'ensemble des données et  $1/A$  représente la distance minimale entre les hyperplans solutions et chaque échantillon ([Gun 98]).

Ainsi, minimiser l'équation (5.22) est équivalent à minimiser la borne supérieure de la dimension  $VC$  de la classe des fonctions hyperplans et par conséquent le risque associé à ce classifieur. C'est le principe exploité par les algorithmes SVM pour résoudre le problème de classification.

### 5.3.3 SVM : cas linéaire sans erreur.

Le cas envisagé dans le paragraphe précédent est une version très simple du problème mais permet de bien comprendre la démarche proposées par les méthodes SVM. Dans cette section, le problème de la minimisation de l'équation (5.22) est explicitée. On se place comme précédemment dans le cas où l'ensemble d'apprentissage doit être séparé en deux classes distinctes. En outre, les deux classes peuvent être séparées sans erreur par un hyperplan.

La stratégie adoptée par les méthodes SVM est donc de minimiser  $\|w\|^2$  et ceci peut être reformulé comme un problème d'optimisation quadratique :

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2, \quad (5.25)$$

sous les  $n$  contraintes données par :

$$\forall i \in 1, \dots, n; \quad y_i \cdot [\langle w, x_i \rangle + b] \geq 1. \quad (5.26)$$

La solution du problème est donnée par le point selle du Lagrangien  $\Phi$  ([Min 86]) :

$$\Phi(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n [\alpha_i (y_i (\langle w, x_i \rangle + b - 1))], \quad (5.27)$$

où  $\{\alpha_i; i = 1, \dots, n\}$  sont les multiplicateurs lagrangiens.

Pour répondre au problème, le lagrangien  $\Phi$  doit être minimisé par rapport à  $w$  et  $b$  et maximisé par rapport aux variables  $\alpha_i$ . Résoudre le problème consiste alors à résoudre le problème d'optimisation quadratique dual :

$$\max_{\alpha} (W(\alpha)) = \max_{\alpha} \left( \min_{w,b} \Phi(w, b, \alpha) \right). \quad (5.28)$$

Le minimum du lagrangien  $\Phi$  pour les variables  $w$  et  $b$ , est alors donné par les équations :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i, \end{cases} \quad (5.29)$$

En reportant, les équations (5.29) dans l'expression (5.27) puis dans (5.28), il vient :

$$\max_{\alpha} (W(\alpha)) = \max_{\alpha} \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle + \sum_{i=1}^n \alpha_i \right], \quad (5.30)$$

$$(5.31)$$

La solution du problème est alors  $\hat{\alpha}$  répondant à :

$$\hat{\alpha} = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle - \sum_{i=1}^n \alpha_i \right], \quad (5.32)$$

$$(5.33)$$

sous les contraintes :

$$\begin{cases} \forall i = 1, \dots, n \quad \alpha_i \geq 0, \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0. \end{cases} \quad (5.34)$$

En pratique, cette optimisation détermine les coefficients multiplicateurs de Lagrange  $\alpha_i$  permettant de déterminer explicitement l'hyperplan solution :

$$\begin{cases} \hat{w} = \sum_{i=1}^n \hat{\alpha}_i y_i x_i, \\ \hat{b} = -\frac{1}{2} \langle \hat{w}, x_1 + x_2 \rangle, \end{cases} \quad (5.35)$$

où  $x_1$  et  $x_2$  sont deux vecteurs de support de chaque classe (satisfaisant donc  $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ ;  $y_1 = 1$  et  $y_2 = -1$ ).

### 5.3.4 SVM : cas linéaire avec erreurs

La partie précédente a introduit la démarche proposée par les méthodes SVM pour répondre à la problématique de séparation de deux classes d'échantillons. Cependant, la discussion a été restreinte aux cas où les deux classes sont séparables sans erreurs possibles, il s'agit d'une hypothèse simpliste du problème. Les données sont en général bruitées et un classifieur sans erreur est alors impossible à trouver. Pour prendre en compte ce bruit, deux stratégies (non distinctes) sont possibles en fonction de l'hypothèse réalisée sur le classifieur. Dans le cas où on suppose que la séparation peut se faire linéairement, une méthode basée sur l'introduction d'une composante de coût additionnel associée à une erreur de classification est

proposée. L'alternative repose sur l'utilisation de frontières plus complexes que les hyperplans et sera étudiée en section (5.3.5).

Le premier cas est discuté dans la suite et est basé sur l'introduction d'une fonction de pénalité :

$$F(\eta) = \sum_{i=1}^n \eta_i, \quad (5.36)$$

où les variables  $\eta_i \geq 0$  sont associées à des mesures d'erreurs de classification.

Le problème de séparation en deux classes par un hyperplan réside dans la minimisation du risque et des erreurs de classifications. Les contraintes du problème (Eq. 5.26) sont modifiées :

$$\forall i = 1, \dots, n; \quad y_i \cdot (\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1 - \eta_i, \quad (5.37)$$

où  $\eta_i \geq 0$ .

Résoudre le problème consiste donc à déterminer le vecteur  $w$  minimisant la fonction :

$$\Phi(w, \eta) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \eta_i; \quad (5.38)$$

sous les contraintes de l'équation (5.37) et où  $C$  est une constante de régularisation permettant de réaliser le compromis entre l'erreur empirique et le terme de complexité (cf section 5.3.1).

Le raisonnement qui suit est le même que dans la section précédente. La résolution du problème ci-dessus est réalisée par détermination du point selle du Lagrangien :

$$\Phi(w, b, \alpha, \eta, \beta) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \eta_i - \sum_{i=1}^n [\alpha_i (y_i (\langle w, x_i \rangle + b) - 1 + \eta_i)] - \sum_{i=1}^n \beta_i \eta_i, \quad (5.39)$$

où  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  sont les multiplicateurs lagrangiens.

Pour répondre au problème, le lagrangien  $\Phi$  doit être minimisé par rapport à  $w$ ,  $b$  et  $\eta$  et maximisé par rapport aux variables  $\alpha_i$  et  $\beta_i$ . Résoudre le problème consiste alors à résoudre le problème d'optimisation quadratique dual :

$$\max_{\alpha, \beta} (W(\alpha, \beta)) = \max_{\alpha, \beta} \left( \min_{w, b, \eta} \Phi(w, b, \alpha, \eta, \beta) \right). \quad (5.40)$$

Le minimum du lagrangien  $\Phi$  pour les variables  $w$ ,  $b$  et  $\eta$ , est alors donné par les équations :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = 0 \Rightarrow \alpha_i + \beta_i = C, \end{cases} \quad (5.41)$$

La solution du problème est alors  $\hat{\alpha}$  répondant à :

$$\hat{\alpha} = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle - \sum_{i=1}^n \alpha_i \right], \quad (5.42)$$

$$(5.43)$$

sous les contraintes :

$$\begin{cases} \forall i = 1, \dots, n \ 0 \leq \alpha_i \leq C, \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0. \end{cases} \quad (5.44)$$

En résumé, pour le cas linéaire avec erreurs, le problème de minimisation possède la même solution que dans le cas séparable, la seule différence se situe sur les bornes des coefficients de Lagrange  $\alpha_i$ . La borne  $C$  doit donc être déterminée par l'utilisateur. Les études menées ont conduit à le considérer comme un paramètre de régularisation ([Smo 97]) ou pour refléter la connaissance du bruit des données ([Bla 96]).

### 5.3.5 SVM : cas non-linéaire avec erreurs

Le choix de la classe des fonctions linéaires est généralement trop limité pour séparer l'ensemble d'apprentissage. Les méthodes SVM ont été généralisées aux cas de frontières de séparation non-linéaires ([Sch 02]). L'idée est de projeter l'espace d'entrée (ou des paramètres) dans un espace de plus grande dimension afin d'obtenir une configuration des données linéairement séparables (Fig. 5.2).

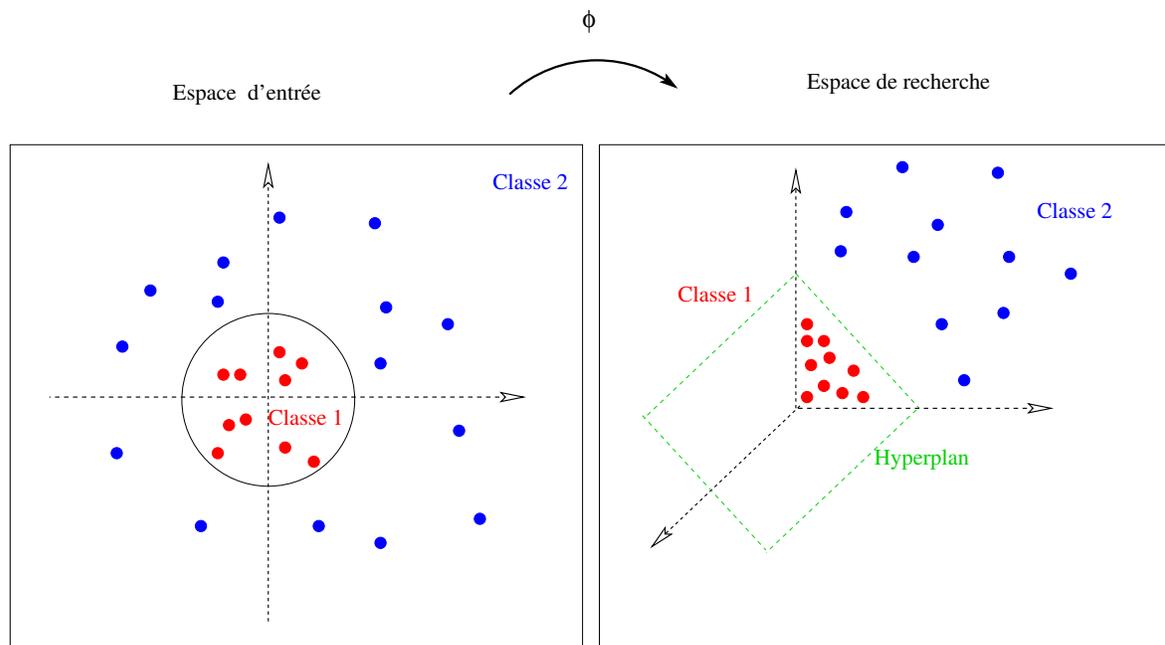


FIG. 5.2 – Illustration de la recherche de frontières non-linéaires. Alors que dans l'espace d'entrée, les deux classes sont séparables par une ellipsoïde non-linéaire (*gauche*), dans l'espace de recherche projeté, on peut trouver une solution en utilisant un hyperplan linéaire (*droite*).

Par la fonction de projection,

$$\phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathcal{F} \quad (5.45)$$

$$x \mapsto \phi(x) \quad (5.46)$$

les données d'apprentissage  $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}^n$  sont projetées dans un espace qui peut être de dimension très grande.

Le problème d'apprentissage est le même qu'auparavant mais est envisagé dans l'espace  $\mathcal{F}$  au lieu de  $\mathbb{R}^n$ ; i.e on travaillera avec les échantillons  $(\phi(x_1), y_1), \dots, (\phi(x_n), y_n) \in \mathcal{F} \times Y$ . L'équation (5.40) définissant le problème est alors modifiée en :

$$\hat{\alpha} = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle - \sum_{i=1}^n \alpha_i \right], \quad (5.47)$$

$$(5.48)$$

sous les mêmes contraintes :

$$\begin{cases} \forall i = 1, \dots, n \quad 0 \leq \alpha_i \leq C, \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0. \end{cases} \quad (5.49)$$

Résoudre le problème consiste une nouvelle fois à estimer les multiplicateurs de Lagrange pour déterminer le classifieur donné par  $y(x) = \operatorname{sign}(\sum_{i=1}^n y_i \hat{\alpha}_i \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle + \hat{b})$ , où la fonction  $\operatorname{sign}$  est la fonction signe. Ainsi, la généralisation du problème aux cas non-linéaires est uniquement basée sur l'utilisation du produit scalaire  $\langle, \rangle$  appelé noyau et noté  $K(., .)$ . De nombreux noyaux ont été utilisés dans les études passées. Ce noyau doit remplir certaines conditions basées sur la théorie des espaces de Hilbert à noyau reproduisant ([Len 02]).

Un produit scalaire dans l'espace  $\mathcal{F}$  possède un noyau dans l'espace d'entrée ( $\mathbb{R}^L$ ) sous certaines conditions :

Si  $K : \mathcal{C} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}$  est un noyau continu d'un opérateur intégral positif, défini sur un espace de Hilbert où  $\mathcal{C}$  est un ensemble compact tel que  $\mathcal{C} \subset \mathbb{R}^n$ , i.e.

$$\forall f \in L_2(\mathcal{C}), \int_{\mathcal{C}} K(x, x') f(x) f(x') dx dx' \geq 0, \quad (5.50)$$

alors il existe un espace  $\mathcal{F}$  et un fonction  $\phi : \mathbb{R}^L \rightarrow \mathcal{F}$  telle que  $K(x, y) = \langle \phi(x), \phi(y) \rangle$ .

Parmi les exemples de noyau trouvés dans la littérature, on peut citer ceux de type :

$$\star \text{ polynômial} \quad K(x, x') = \langle x, x' \rangle^d, \quad (5.51)$$

$$\star \text{ gaussien} \quad K(x, x') = e^{-\frac{\|x-x'\|^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.52)$$

$$\star \text{ exponentiel} \quad K(x, x') = e^{-\frac{\|x-x'\|}{2\sigma^2}}, \quad (5.53)$$

$$\star \text{ perceptron multicouche} \quad K(x, x') = \tanh(\rho \cdot \langle x, x' \rangle + \rho'), \quad (5.54)$$

$$\star \text{ séries de Fourier} \quad K(x, x') = \frac{\sin(N + 1/2)(x - x')}{\sin(\frac{1}{2}(x - x'))}. \quad (5.55)$$

### 5.3.6 Méthodes multiclassés

A l'origine construites pour des classifications binaires (en deux classes), les techniques permettant d'étendre ces algorithmes à un problème multiclassé sont encore à l'étude ([Sch 02]).

Alors que les plus courantes sont basées sur la combinaison de plusieurs classifieurs binaires pour construire un classifieur multiclasse ([All 02]), les nouveaux développements permettent une détermination directe ([Wen 99, Cra 00, Gue 00]). Dans ([Hsu 01]), une comparaison de trois méthodes préconisent l'emploi de l'algorithme "un contre un" qui obtient de bons résultats. C'est celui que nous utiliserons et il est présenté dans la suite avec l'algorithme "un-contre-tous".

Dans la suite, l'ensemble des étiquettes est  $\mathcal{E} = \{1, \dots, S\}$ ,  $f(x_j) = \langle w, \phi(x_j) \rangle + b$  est le "score" calculé par l'algorithme SVM à l'échantillon  $x_j$  et  $y_j \in \mathcal{E} = \{1, \dots, S\}$  est l'étiquette de la variable  $x_j$ .

Le plus ancien de tous les algorithmes multiclassés nommé "un contre tous" ([Bot 94]), est basé sur le principe suivant.  $S$  classifieurs binaires SVM sont construits ; le  $i$ -ème consiste à chercher la fonction de décision correspondant à la séparation des échantillons de la  $i$ -ème classe contre les  $S - 1$  restantes. Ainsi, en reprenant les notations précédentes, le  $i$ -ème SVM répond au problème suivant :

$$\begin{cases} \min_{(w^i, b^i, \eta_i)} = \frac{1}{2} \|w^i\|^2 + C \sum_{j=1}^n \eta_j^i; \\ \langle w^i, \phi(x_j) \rangle + b^i \geq 1 - \eta_j^i & \text{si } y_j = i; \\ \langle w^i, \phi(x_j) \rangle + b^i \leq -1 + \eta_j^i & \text{si } y_j \neq i; \\ \eta_j^i \geq 0. \end{cases} \quad (5.56)$$

A l'issue de ces  $S$  résolutions,  $S$  scores ont été estimés, la décision finale de l'algorithme un-contre-tous consiste à prendre le score le plus grand :

$$y(x) = \arg \max_{i=1, \dots, S} [f^i(x)] = \arg \max_{i=1, \dots, S} [\langle w^i, \phi(x) \rangle + b^i]. \quad (5.57)$$

La stratégie de l'algorithme "un-contre-un" ([Kre 99]) est de construire  $S(S - 1)/2$  classifieurs binaires mettant en concurrence chaque classe alternativement l'une contre l'autre. L'apprentissage de la  $i$ -ème classe contre la  $j$ -ème consiste à résoudre le problème de classification binaire :

$$\begin{aligned} & \min_{(w^{ij}, b^{ij}, \eta^{ij})} \left[ \frac{1}{2} \|w^{ij}\|^2 + C \sum_{k=1}^n \eta_k^{ij} \right]; \quad (5.58) \\ & \text{sous les contraintes } \begin{cases} \langle w^{ij}, \phi(x_k) \rangle + b^{ij} \geq 1 - \eta_k^{ij} & \text{si } y_k = i; \\ \langle w^{ij}, \phi(x_k) \rangle + b^{ij} \leq -1 + \eta_k^{ij} & \text{si } y_k = j; \\ \eta_k^{ij} \geq 0. \end{cases} \quad (5.59) \end{aligned}$$

La décision d'attribution de l'étiquette à l'issue de la résolution des  $S(S - 1)/2$  classifieurs, est basée sur la stratégie du vote. En d'autres termes, si pour une valeur  $x_k$ , la fonction  $\text{sign}[f^{ij}(x_k)] = \text{sign}[\langle w^{ij}, \phi(x_k) \rangle + b^{ij}]$  correspond au choix de classer  $x_k$  dans la  $i$ -ème classe, le vote pour la  $i$ -ème classe sera augmenté d'une unité, dans le cas contraire le vote de la  $j$ -ème sera augmenté d'une unité. La décision finale choisira l'étiquette ayant récolté le maximum de votes.



Comme  $\sum_{i=1}^S p_i(x) = 1$ , l'existence de la solution du système n'est pas garantie puisqu'il y a  $S - 1$  paramètres pour  $S(S - 1)/2$  équations. Les auteurs utilisent alors un algorithme itératif d'optimisation basé sur une minimisation de la distance entre  $r_{ij}$  et son estimée  $\hat{r}_{ij}$ . Après convergence de l'algorithme, les probabilités de classe  $\{p_i, i, \dots, S\}$  sont estimées sous l'hypothèse de connaître les probabilités  $r_{ij}$  de chaque code.

Reste à estimer les probabilités conditionnelles  $\mathbb{P}[M(C_i, B_{ij}) = 1 | X = x]$  pour chaque classifieur binaire : la probabilité qu'un échantillon soit étiqueté  $i$  dans la compétition entre la classe  $i$  et  $j$ . Nous nous ramenons donc à l'écriture du classifieur binaire ( $\mathcal{E} = \{-1, +1\}$ ) pour une simplification des expressions qui suivront, nous avons donc :

$$\mathbb{P}[M(c_i, b_{ij}) = 1 | X = x] \sim \mathbb{P}[Y = 1 | X = x]. \quad (5.62)$$

Une solution basée sur une approche paramétrique, a été proposée par Platt ([Pla 99]) et consiste à ajuster la probabilité conditionnelle empirique :

$$\mathbb{P}_{emp}[Y = 1 | X = x] = \frac{\mathbb{P}_{emp}[f(x) | Y = 1] \mathbb{P}_{emp}[Y = 1]}{\sum_{i=\pm 1} \mathbb{P}_{emp}[f(x) | Y = i] \mathbb{P}_{emp}[Y = i]}, \quad (5.63)$$

toujours sous l'hypothèse que l'information pour classer  $x$  est contenue dans son score  $f(x)$ .

Le modèle utilisé par Platt est une sigmoïde de paramètres  $A$  et  $B$  et de la forme :

$$\mathbb{P}[Y = 1 | X = x] = \frac{1}{1 + \exp(A \cdot f(x) + B)} \quad (5.64)$$

Les paramètres  $A$  et  $B$  sont estimés par maximisation de la vraisemblance ([Pla 99]). Cette approche est purement heuristique et réside sur l'observation des formes des probabilités empiriques. Elle a néanmoins montré des résultats au moins égaux à la version standard du SVM ([Pla 99]). Son principal avantage réside dans l'obtention d'une version probabilisée des méthodes SVM pour être exploité en conjonction avec d'autres classifieurs.

## 5.4 Applications aux images sonar de cartographie

La construction de cartes sédimentaires est longue et fastidieuse pour les experts géologues et dépend bien évidemment de l'importance de la surface d'étude. L'utilisation d'un processus de segmentation adéquat des données sonar peut s'avérer extrêmement utile. De nombreuses approches ont été testées ; on y trouve les méthodes basées sur les analyses de textures ([Blo 93, Lin 94]), sur les extractions de contours ([Leb 93, Gem 89]), sur des descripteurs énergétiques et/ou statistiques ([Dug 97]).

Peu de chercheurs ont considéré le processus de formation des images sonar pour l'intégrer à un classifieur. Parmi ceux-ci, Dugelay ([Dug 97]) a adapté avec succès un algorithme markovien basé sur des critères énergétiques et statistiques liés aux spécificités de l'imagerie acoustique basse résolution du sondeur multifaisceau EM12. L'étude des distributions statistiques de l'intensité rétrodiffusée a amené l'auteur à choisir une énergie de rappel aux données basé sur une loi du  $\chi^2$  à  $2N_{moy}$  degrés de liberté<sup>1</sup>. Cette loi du  $\chi^2$  possède un seul paramètre

<sup>1</sup> $N_{moy}$  nombre de moyennage du pixel, quantifie la résolution de l'image à segmenté et est parfaitement connu pour tous les pixels de l'image.

variable en fonction de l'angle d'incidence modélisant la dépendance angulaire de l'indice de rétrodiffusion. L'auteur montre dans sa thèse l'apport d'une telle prise en compte.

En outre, le terme de régularisation markovienne utilisé intègre une nouvelle fois les caractéristiques du système d'acquisition. Les fonctions potentiels  $V_c$  associant un potentiel sur chaque clique  $c$  de l'image, incluent un pondérateur dépendant de la distance spatiale interpixels.

L'approche suivie dans ce chapitre s'inscrit tout d'abord dans la continuité du travail de Dugelay. La prise en compte des particularités du système d'acquisition demeure notre stratégie. Ainsi, l'algorithme markovien proposé par Dugelay a été modifié pour incorporer la loi statistique adaptée aux données du sondeur multifaisceau EM1000. Le cas de tels systèmes haute résolution est particulier dans le sens où des textures apparaissent sur les images. Le chapitre d'exploitation des statistiques a montré la capacité de la loi  $\mathcal{K}$  à modéliser les données de ce système d'imagerie acoustique. Cette loi dépend de deux paramètres : la moyenne de l'intensité rétrodiffusée et un paramètre de forme. Si le premier possède un caractère énergétique, le second a été proposé comme indicateur de textures ([Oli 98]). La première étape de cette étude montre l'intérêt de l'utilisation de la loi  $\mathcal{K}$  angulaire dans un processus de segmentation.

Les chapitres 3 et 4 ont montré l'intérêt de la prise en compte simultanée des deux paramètres de la loi  $\mathcal{K}$ . En particulier, deux fonds très différents (un de roches, le second de sable grossier) possèdent des indices angulaires similaires (Chapitre 3). Le chapitre (4) a montré que la prise en compte du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  peut permettre de les discriminer. Le second objectif de ce chapitre est donc d'intégrer un indicateur de textures au critère de décision du processus de segmentation grâce à l'utilisation des méthodes SVM.

#### 5.4.1 Données acoustiques et méthodologie

La segmentation des données enregistrées par le sondeur multifaisceau EM1000 est considérée dans le reste du chapitre. Des données de la Baie de Douarnenez nous ont été fournies par un expert géologue<sup>2</sup> de l'Ifremer et vont servir à l'application des algorithmes développés. La réalité géologique est disponible via l'étude géologique du site et la carte sédimentaire réalisée<sup>3</sup> par le géologue.

Les données acoustiques ont été corrigées des artefacts provoqués par le système d'acquisition et le milieu de propagation acoustique par la méthode décrite dans le chapitre 2. A l'issue de cette phase, les données acoustiques disponibles sont constituées des images rectilignes (cf. Chapitre 2) de l'**intensité rétrodiffusée**, des angles d'incidence et du nombre  $N_{moy}$  de valeurs ayant été moyennées pour obtenir la valeur du pixel<sup>4</sup>. Les données utilisées possèdent une résolution pixel de 1 mètre malgré la possibilité pour ce système d'obtenir une résolution transversale de 15 centimètres en fin de portée. La justification de ce sous-échantillonnage se trouve dans la recherche d'un compromis. Utiliser les données hautes résolutions permet bien évidemment d'obtenir des détails plus fins, cependant, le niveau de bruit de speckle (Chapitre 4) augmente également, ceci aboutissant à l'apparition de fausses classifications. En outre, les données hautes résolutions de l'ensemble du site d'étude représentent une quantité de données

<sup>2</sup>Merci à C. Augris (DRO/GM)

<sup>3</sup>ATLAS THÉMATIQUE DE LA BAIE DE DOUARNENEZ à paraître en 2004

<sup>4</sup>Ce nombre sera appelé par la suite nombre de moyennages.

très importante mais difficilement exploitable dans un processus de segmentation. Enfin, le niveau de détails nécessaire pour concevoir les cartes sédimentaires ne descend pas en dessous de la résolution du mètre.

Un exemple d'images multicouches est représenté en figure (5.3) pour une résolution pixel de 1 mètre. Ces trois images représentent les informations à partir desquelles le processus de segmentation sera construit. Ces images montrent une bande verticale centrale sans données, correspondant aux angles d'incidence  $[-20^\circ, 20^\circ]$ . D'une part, ce secteur angulaire comporte des résidus d'artefact dus aux caractéristiques d'acquisition du sondeur (Chapitre 2) et d'autre part les paramètres utilisés pour segmenter ne montrent aucune possibilité de discrimination des fonds dans ce secteur angulaire. Il a donc été décidé de ne pas prendre en compte ce secteur angulaire très pénalisant en particulier lors de l'utilisation d'une régularisation markovienne. Confrontée à ce problème, Dugelay a proposé une solution basée sur un principe de "multirésolution locale" avec succès. Il n'a néanmoins pas été implémenté dans nos algorithmes pour des raisons d'optimisation.

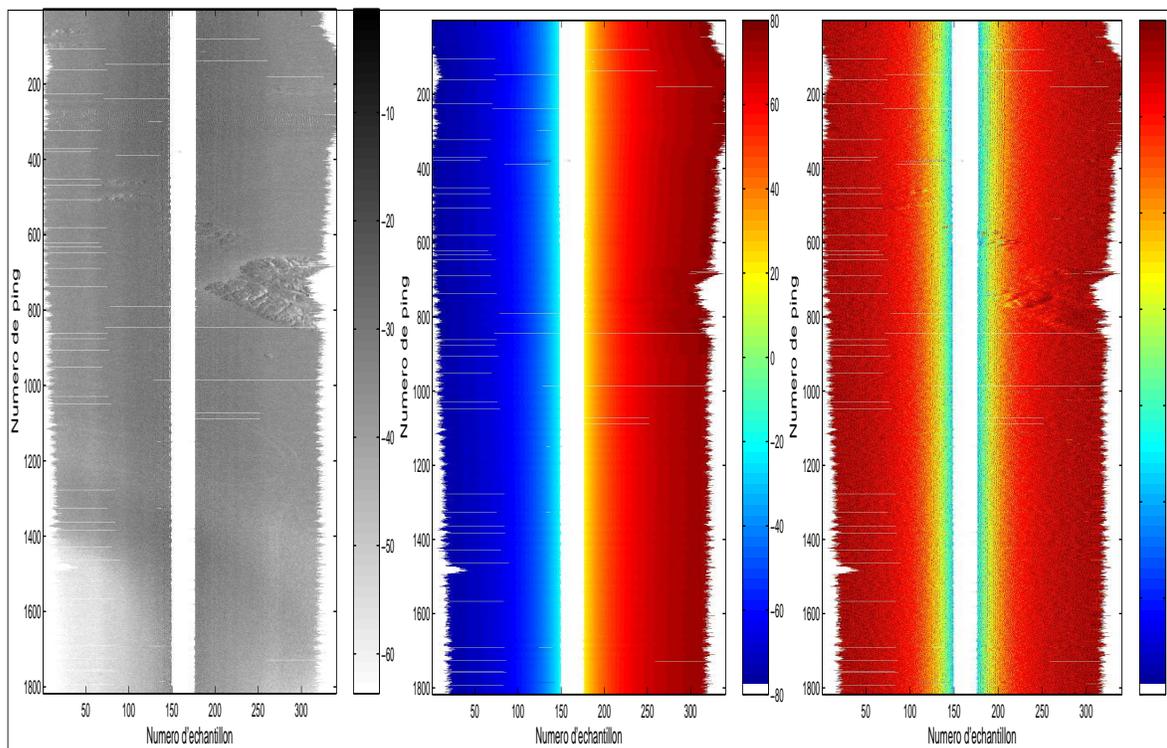


FIG. 5.3 – Exemple d'une image rectiligne multicouche : (gauche) indice de rétrodiffusion (dB), (milieu) angles d'incidence (degrés) et (droite) nombre de moyennages.

En complément, les données de localisation géographique des pixels permettent de projeter les images rectilignes et de réaliser ainsi la mosaïque sonar du site étudié. La mosaïque sonar de l'ensemble des données est représentée en figure (5.4).

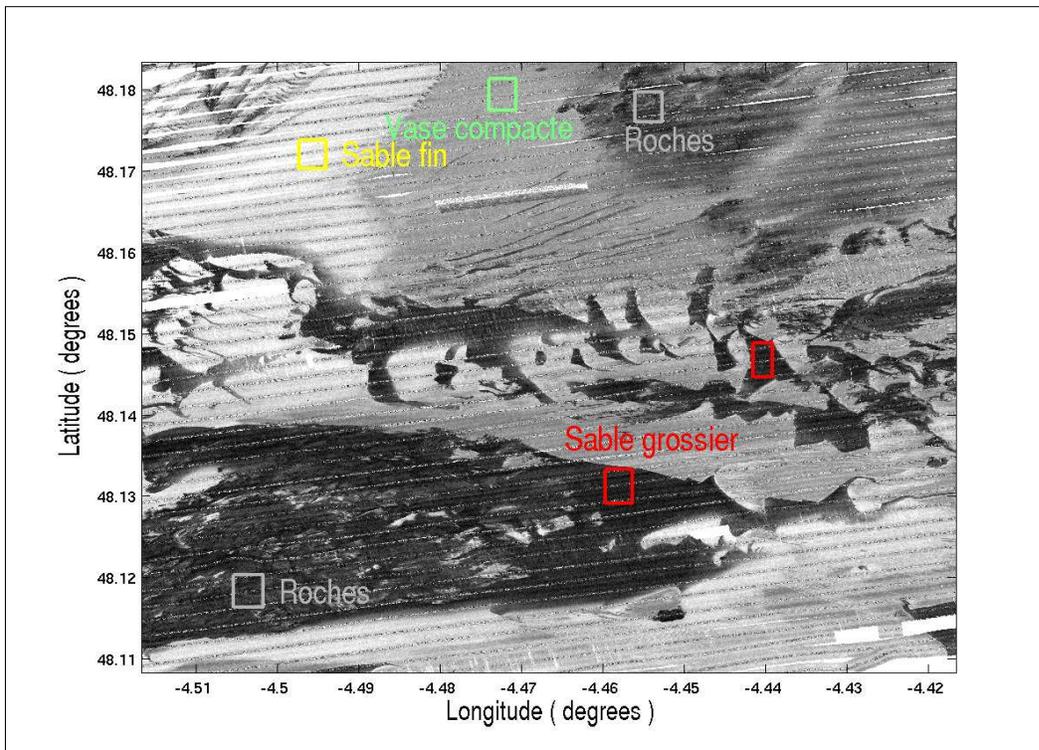


FIG. 5.4 – Mosaïque sonar (résolution du pixel 2.5 mètres) des données EM1000 enregistrées lors de la campagne d'acquisition *Canadou* dans la Baie de Douarnenez. Les cadres de couleurs constituent les sites d'apprentissage définis par un expert géologue.

La surface couverte est approximativement de 7.5 km (en abscisse) sur 8 km et présente des faciès sédimentaires (représentés par des niveaux de gris<sup>5</sup>) très différents. Dans cette carte de rétrodiffusion, l'expert a déterminé quatre classes sédimentaires caractéristiques (Fig. 5.4) :

- ★ les roches (gris),
- ★ les sables grossiers (rouge),
- ★ les vases (vert),
- ★ les sables fins (jaune).

De ces sites géographiques, les images multicouches correspondantes sont extraites. Ces données permettent alors d'estimer la probabilité du champ  $X$  conditionnellement aux champs des étiquettes  $Y$ ,  $\mathbb{P}[X = x|Y = y]$  soit le terme de rappel aux données.

La démarche proposée dans la suite est scindée en trois parties et concerne l'estimation du terme de rappels aux données  $\mathbb{P}[X = x|Y = y]$ . Dans une première partie, la modélisation de ce terme est réalisée à partir de l'image de l'intensité rétrodiffusée et aboutit ainsi aux densités de probabilités "classiques". Les résultats montrent l'intérêt d'utiliser la loi  $\mathcal{K}$  et sa dépendance angulaire pour discriminer les fonds marins.

Constatant les limites de cette modélisation, un algorithme SVM probabilisé est exploité pour modéliser le terme de rappel aux données et pour donner plus de poids au paramètre de forme dans la classification.

<sup>5</sup>L'échelle de gris représente l'énergie de rétrodiffusion du fond insonifié avec la convention suivante : à une faible énergie correspond la couleur claire.

Enfin, les deux termes de probabilités seront introduits dans l'algorithme markovien de manière à appliquer le caractère de régularisation inhérent à cette modélisation.

### 5.4.2 Apport de la loi $\mathcal{K}$ angulaire

L'objectif de cette section est de montrer l'apport de la dépendance angulaire de la loi  $\mathcal{K}$  sur deux autres configurations :

- ★ La loi  $\Gamma$  généralisée (Annexe B) permet de modéliser les données des systèmes sonar basse résolution. La loi du  $\chi^2$  étant un cas particulier de cette loi, cette configuration permet de se ramener au terme de probabilité  $\mathbb{P}[X = x, Y = y]$  utilisé par Dugelay ([Dug 97]). En outre, l'unique paramètre de cette distribution présentera une dépendance angulaire.
- ★ L'intérêt de l'utilisation de la dépendance angulaire ne peut être confirmé sans la comparaison entre les résultats donnés par une loi  $\mathcal{K}$  dont les paramètres varient en fonction de l'angle et une seconde loi  $\mathcal{K}$  estimée sur l'ensemble de la fauchée. Le scénario de la seconde configuration est donc la loi  $\mathcal{K}$  angulaire contre la loi  $\mathcal{K}$ .

Le champ aléatoire des mesures  $X$  représente l'**intensité rétrodiffusée** par les fonds marins, l'image à segmenter étant une réalisation  $x$ . L'ensemble des étiquettes est composé de  $\mathcal{E} = \{\text{roches, sable grossier, vase compacte, sable fin}\}$  ; elles sont numérotées de 1 à 4 dans l'ordre de cette liste pour une simplicité d'écriture.

Les sites d'apprentissage déterminés dans la section précédente permettent d'estimer les paramètres des différents modèles de distribution de chaque étiquette dans l'ensemble  $\mathcal{E}$ . Dans ce but, les images rectilignes de l'intensité rétrodiffusée ont été extraits de ces sites à une résolution du pixel de 1 mètre. De manière à introduire l'évolution angulaire des lois candidates, la fauchée (de  $-75^\circ$  à  $75^\circ$ ) a été découpée en secteurs angulaires de pas  $2.5^\circ$ , sur lesquels sont estimés les paramètres des lois.

L'expression de la densité de probabilité  $\Gamma$  généralisée modélisant la probabilité d'obtenir une valeur d'intensité rétrodiffusée  $x_p$  conditionnellement à l'étiquette  $Y = i$  ( $i=1, \dots, 4$ ) est donnée par :

$$\mathbb{P}[X_p = x_p | Y_p = i] = \frac{1}{\Gamma(N_{moy})} \left( \frac{N_{moy}}{\mu_i} \right)^{N_{moy}} x_p^{(N_{moy}-1)} e^{-\frac{x_p N_{moy}}{\mu_i}}, \quad (5.65)$$

où le nombre de moyennages  $N_{moy}$  est connu et où  $\mu_i$  est la moyenne angulaire de l'intensité pour l'étiquette  $i$ . La dépendance angulaire moyenne  $\mu_i$  estimée pour chaque étiquette est représentée sur la figure (5.5 *gauche*).

Dans le cas des images où la résolution du pixel est 1 mètre, les données en intensité peuvent être modélisées selon la loi  $\mathcal{K}$  généralisée (Annexe B) :

$$\mathbb{P}[X_p = x_p | Y_p = i] = \frac{2}{\Gamma(N_{moy})\Gamma(\nu_i)} \left( \frac{N_{moy}\nu_i}{\mu_i} \right)^{\frac{N_{moy}+\nu_i}{2}} x_p^{\frac{N_{moy}+\nu_i-2}{2}} K_{\nu_i-N_{moy}} \left[ 2\sqrt{\frac{N_{moy}\nu_i x_p}{\mu_i}} \right], \quad (5.66)$$

où  $\mu_i$  est la moyenne angulaire de l'intensité rétrodiffusée et  $\nu_i$  le paramètre de forme pour chaque étiquette  $i$ . La figure (5.5) montre cette évolution pour les deux paramètres de cette loi et pour les quatre fonds d'apprentissage.

Enfin, l'estimation des paramètres de la loi  $\mathcal{K}$  sur l'ensemble de la fauchée angulaire a été réalisée pour chaque type de fond. Le couple des paramètres composé de la moyenne (exprimée en dB) et du paramètre de forme vaut :

- ★ pour la roche :  $\mu_1 = -23.6$  dB et  $\nu_1 = 0.13$  ;
- ★ pour le sable grossier :  $\mu_2 = -26.2$  dB et  $\nu_2 = 1.33$  ;
- ★ pour la vase compacte :  $\mu_3 = -38.1$  dB et  $\nu_3 = 1.06$  ;
- ★ pour le sable fin :  $\mu_4 = -40.7$  dB et  $\nu_4 = 0.37$ .

De manière à s'affranchir du bruit d'estimation, les deux paramètres angulaires ont été ajustés par leur modèle respectif.

Le modèle de rétrodiffusion utilisé est un modèle heuristique composé de trois éléments (cf. section 1.3) :

- ★ une gaussienne permet de modéliser le comportement pour les faibles angles d'incidence ;
- ★ une loi de type  $\beta$ -Lambert est utilisée pour les incidences rasantes ;
- ★ une seconde gaussienne modélise la transition entre les deux secteurs.

Le modèle de dépendance angulaire du paramètre de forme est le modèle étendu EDAK du chapitre 4. Les ajustements sont représentés sur la figure (5.5 *droite*).

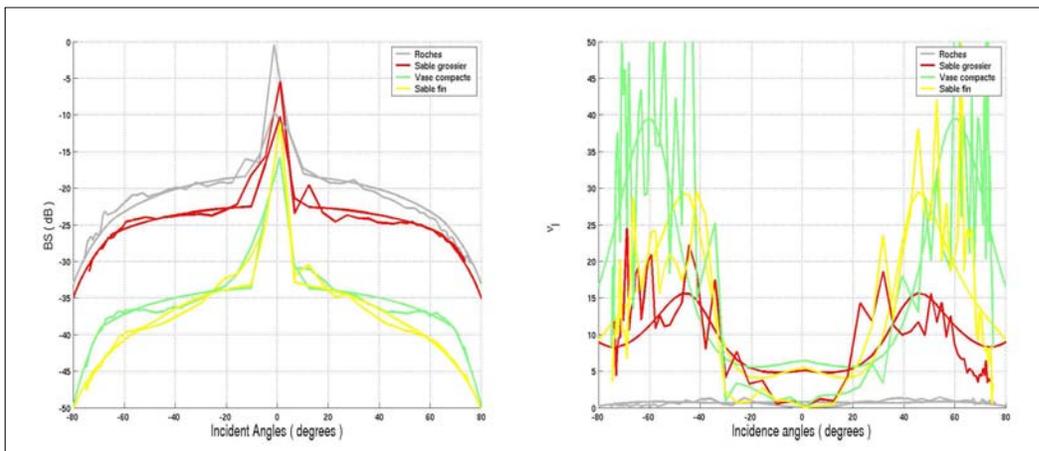


FIG. 5.5 – Evolution angulaire des paramètres d'apprentissage de la loi  $\mathcal{K}$  : (*gauche*) moyenne de l'intensité rétrodiffusée (exprimée en dB) et (*droite*) paramètre de forme.

Les caractéristiques de dépendance en fonction de l'angle d'incidence et en fonction du type de fond reflètent celles observées et étudiées dans les chapitres précédents. Les quatre fonds peuvent être regroupés par deux :

- ★ Les deux fonds de sable grossier et de roches possèdent des niveaux similaires de leur indice de rétrodiffusion. Le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  des deux fonds est très différent et doit donc permettre de les discriminer.
- ★ Les deux autres fonds (sable fin et vase compacte) sont discriminables sur leur indice de rétrodiffusion alors que leurs paramètres de forme présentent des évolutions similaires.

En chaque pixel  $p$  et pour chaque étiquette  $i = 1, \dots, 4$ , les probabilités  $\mathbb{P}[X_p = x_p | Y_p = i]$  issues des trois modélisations  $\Gamma$  angulaire,  $\mathcal{K}$  et  $\mathcal{K}$  angulaire sont estimées. Dans la suite, le cadre markovien n'est pas pris en considération, l'objectif est de vérifier l'intérêt d'utiliser une modélisation adaptée du bruit des données. Le critère d'attribution des étiquettes est ainsi

simplement le critère du maximum de vraisemblance pour chaque modèle de loi :

$$\hat{y}_p = \arg \max_{i=1,\dots,4} \left[ \mathbb{P}[X_p = x_p | Y_p = i] \right]. \quad (5.67)$$

Les figures (5.6 et 5.7) présentent les résultats obtenus pour les trois modèles de lois et pour deux images de fonds :

- ★ Le fond décrit sur la figure (5.6 *haut gauche*) est composé majoritairement d'une zone de sable grossier (la partie 3/4 haute) dans laquelle on distingue plusieurs petites bandes de roches (en haut à droite notamment). La partie basse de l'image est composée d'une zone de sable fin dans laquelle des rochers sont visibles.
- ★ La figure (5.7 *haut gauche*) montre globalement les mêmes natures de fonds puisque le haut de l'image est composé de sable grossier et le bas de sable fin. La transition entre les deux types de fonds est moins brutale et un gros rocher est visible à l'intérieur de la zone de sable grossier.

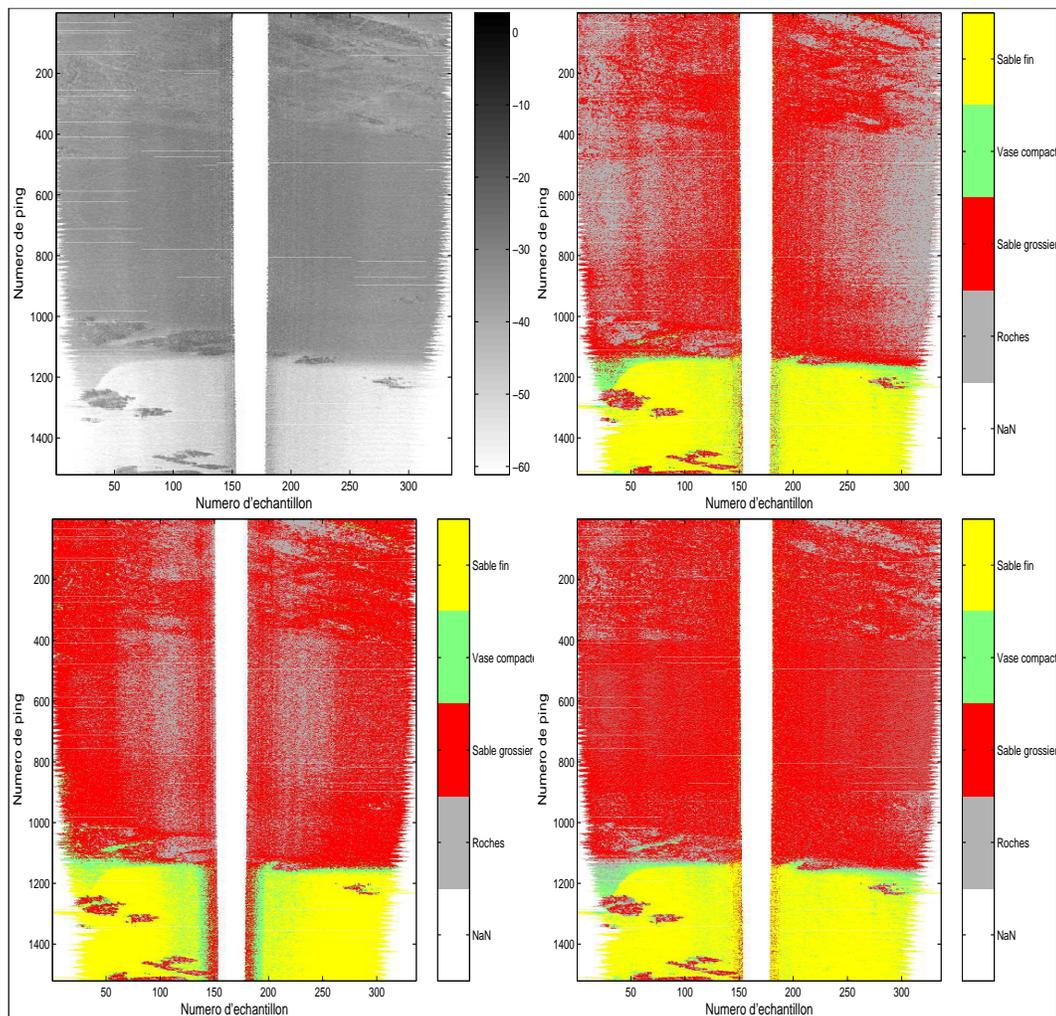


FIG. 5.6 – (Haut gauche) Image de l'indice de rétrodiffusion, images segmentées selon le maximum de vraisemblance de la loi (haut droit)  $\Gamma$  angulaire, (bas gauche) de la loi  $\mathcal{K}$  et (bas droit)  $\mathcal{K}$  angulaire.

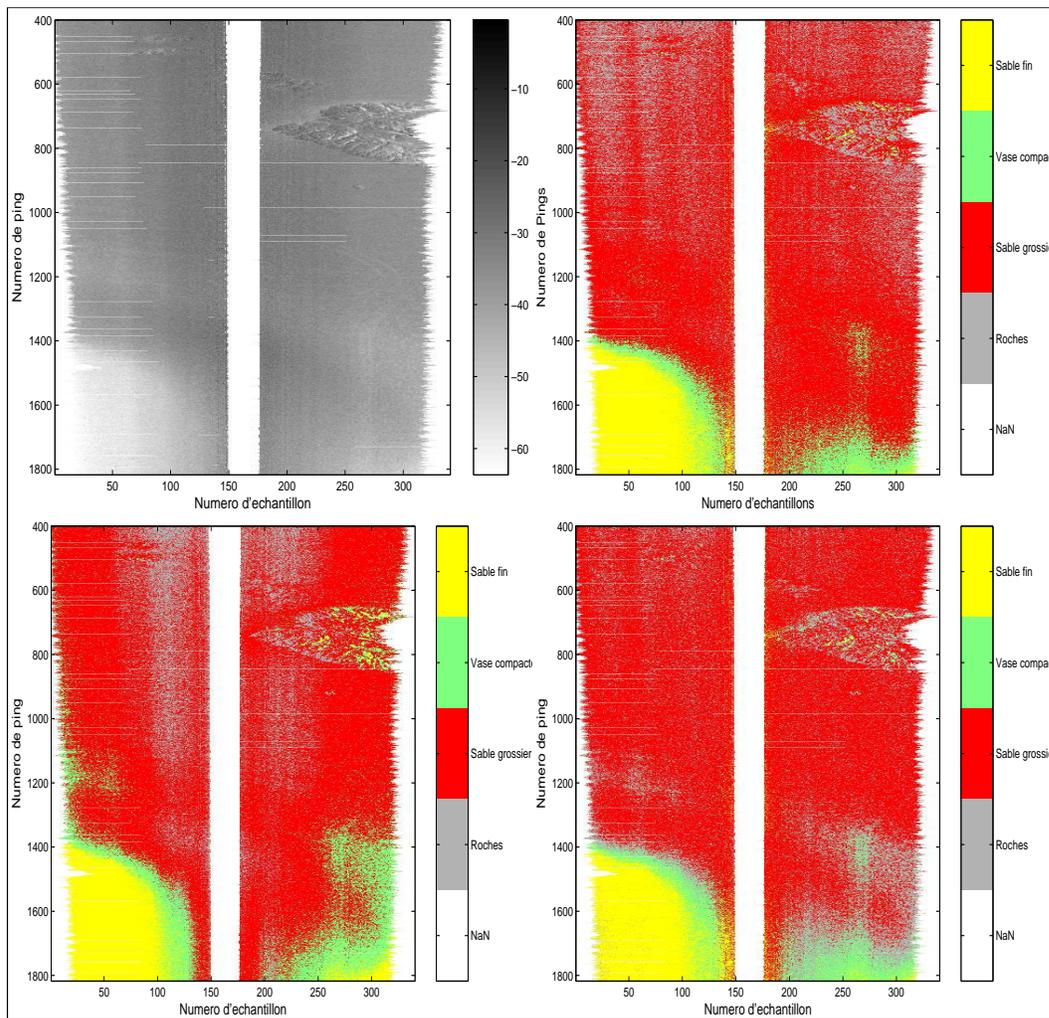


FIG. 5.7 – (Haut gauche) Image de l'indice de rétrodiffusion, images segmentées selon le maximum de vraisemblance de la loi (haut droit)  $\Gamma$  angulaire, (bas gauche) de la loi  $\mathcal{K}$  et (bas droit)  $\mathcal{K}$  angulaire.

Les trois modélisations permettent d'étiqueter les grands faciès acoustiques. Sur les deux images, les zones de sable grossier et de sable fin sont bien détectées. Pourtant, la transition entre les zones de sable grossier et les zones de sable fin pour les trois modélisations, s'accompagne de fausses classifications. Le mélange des deux sédiments est détecté comme de la vase compacte.

Les résultats de la modélisation selon la loi  $\Gamma$  angulaire (Fig. 5.6 *haut droite* et 5.7 *haut droite*) montrent pour les deux images une confusion importante dans le classement des pixels de sable grossier en roches. Les secteurs de sable grossier présentent une alternance de pixels classés en rouge ou gris sur l'ensemble de la fauchée angulaire. De même, les rochers de la partie basse de la figure (5.6) et ceux de la figure (5.7) sont étiquetés comme du sable grossier. L'étiquetage des secteurs de sable fin est bien effectué hormis dans la zone de transition entre sable grossier et sable fin.

L'introduction de la loi  $\mathcal{K}$  améliore les résultats (Fig. 5.6 *bas gauche* et 5.7 *bas gauche*). La confusion du classement des pixels entre les deux classes rouge et grise est moins présente en fin de portée (sur les cotés extérieurs des images). Les structures sont mieux localisées, notamment en ce qui concerne les bandes de rochers de l'image (5.6). Cependant, la partie centrale de l'image est très mal segmentée. En particulier, la confusion entre le choix des étiquettes roches et sable grossier, est très importante, la zone centrale du secteur de sable fin est très mal segmentée.

La loi  $\mathcal{K}$  angulaire améliore nettement le résultat. Les structures sont bien repérées sur l'ensemble de l'image. Le niveau de confusion entre roches et sable grossier a baissé mais cependant les rochers sont systématiquement étiquetés sable grossier.

Ces premiers résultats de segmentation démontre l'intérêt de la prise en compte conjointe des particularités angulaires de l'image sonar et d'une loi adaptée aux données rétrodiffusées. L'amélioration de la qualité de la segmentation est clairement démontrée. Pourtant, les limites de cette modélisation apparaissent lorsque deux fonds de nature très différente possèdent des niveaux similaires de leur indice de rétrodiffusion. Les informations de texture ne sont pas assez pris en considération.

Pourtant, les évolutions angulaires des deux paramètres de la loi  $\mathcal{K}$  montrent clairement le caractère discriminant du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  pour les deux fonds de sable grossier et de roches. La stratégie de la partie suivante est d'augmenter significativement l'influence du paramètre de forme grâce à la mise en œuvre d'un algorithme SVM angulaire probabilisé.

### 5.4.3 Comparaison des méthodes SVM et loi $\mathcal{K}$ angulaire

Dans ce chapitre, le champ aléatoire  $X = \{X_p; p \in \mathcal{P}\}$  est composé de deux types de mesures  $X_p$  en chaque pixel  $p$ . La première mesure de type énergétique, est l'intensité rétrodiffusée et la seconde, le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  donne des informations sur les textures. Ce dernier a été estimé sur une fenêtre glissante de dimension 9\*9 pixels par l'estimateur classique du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  (estimateur  $I$ , cf. Annexe B). Le champ des étiquettes est comme pour la partie précédente  $\mathcal{E} = \{\text{roches, sable grossier, vase compacte, sable fin}\}$ .

Les sites d'apprentissage sont identiques à la partie précédente. Les mesures  $x_p$  en chaque pixel des images rectilignes sont extraites pour l'intensité rétrodiffusée et estimée pour le paramètre de forme. En outre, ces mesures sont séparées en secteurs angulaires de 2.5° couvrant la gamme  $[-75^\circ, 75^\circ]$ . L'association de ces mesures d'apprentissage à leurs étiquettes, constituent les données d'entrée de l'algorithme SVM.

Le choix du type de noyau a été restreint à la famille des noyaux gaussiens, ceux-ci possèdent un seul paramètre : l'écart-type  $\sigma$ . Une étude plus poussée pourra être effectuée dans le futur. En effet, le choix de type de noyau et de ses paramètres est une décision essentielle pour les résultats des classifieurs SVM ([Sch 02]). En particulier, pour la recherche de code génétique, un type de noyau particulier a été crée de manière à inclure des informations biologiques a priori sur l'espace de recherche ([Mül 01]). La recherche du meilleur noyau est donc un axe d'étude à part entière qui n'a pas été abordée dans cette thèse.

La phase d'apprentissage de l'algorithme comporte trois phases réalisées sur les 64 secteur angulaires. L'ensemble participant à l'apprentissage est constitué de 400 échantillons par étiquettes représentant donc un total de 1600 échantillons pour chaque secteur angulaire. La stratégie multiclassé choisie est basée sur l'algorithme un-contre-un (section 5.3.6) basée sur la création de 6 classifieurs binaires.

La détermination de  $\sigma$  et de la constante de régularisation  $C$  constitue la première étape de l'apprentissage sur ces 6 classifieurs. Des techniques ont été mises au point pour automatiser ce choix longtemps heuristique ([Mül 01]). Parmi elles, la plus utilisée et celle que nous avons choisie est la technique de validation croisée. L'ensemble des 1600 échantillons est divisé en  $k$  sous-ensembles de même taille,  $k$  est fixé à 3 pour notre application. Chaque classifieur binaire SVM est alors entraîné  $k$  fois avec une valeur particulière de  $\sigma$  et de  $C$ . Au cours de l'itération  $i$  ( $i = 1, \dots, k$ ), le classifieur est entraîné sur tous les sous-ensembles excepté le  $i$ -ème. L'erreur de classification est alors calculée pour la  $i$ -ème itération. La moyenne de l'erreur de classification sur ces  $k$  itérations donnera une bonne estimation de l'erreur de généralisation. Le processus est réitéré pour tous les couples de valeurs  $\sigma$  et  $C$ . Le couple présentant l'erreur de classification minimale est alors conservé. Dans cette phase, l'écart-type  $\sigma$  appartient à l'ensemble  $\{1, 2, \dots, 10\}$  et l'échelle de détermination de la constante de régularisation  $C$  est fixé à  $\{1, 100, 200, \dots, 1000\}$ .

La seconde étape permet l'estimation plus précise des paramètres des 6 classifieurs binaires pour les valeurs retenues de  $\sigma$  et  $C$ . Les classifieurs sont entraînés une nouvelle fois permettant d'affiner l'apprentissage des paramètres de la modélisation SVM (i.e : la détermination des vecteurs supports, des coefficients du Lagrangien et du vecteur de décalage  $b$ ).

La dernière phase consiste à évaluer les probabilités conditionnelles  $\mathbb{P}[X_p = x_p | Y_p = i]$  ( $i=1, \dots, 4$ ) selon la procédure décrite en section (5.3.7).

Les paramètres de l'algorithme SVM étant déterminés pour chaque secteur angulaire, l'algorithme de segmentation est maintenant appliqué sur les deux images sonars. Dans cette section, l'objectif est de comparer la modélisation du terme de rappel aux données obtenu d'une part par la modélisation en loi  $\mathcal{K}$  angulaire et d'autre part celui obtenu par l'algorithme SVM probabilisé. Dans ce but, le critère d'attribution des étiquettes sera une nouvelle fois le critère du maximum de vraisemblance.

Les figures (5.8) et (5.9) montrent les segmentations obtenues d'une part, par la modélisation en loi  $\mathcal{K}$  angulaire (cf. section précédente) et d'autre part, par la modélisation issue de l'algorithme angulaire SVM.

Les grands faciès sont parfaitement retrouvés. Le problème de mélange sédimentaire est observé entre la zone de sable grossier et celle de sable fin. Cependant, l'amélioration obtenue par l'algorithme SVM est nette. Sur les deux images, les roches sont parfaitement localisées et étiquetées. En particulier, la structure transverse des bandes de roches dans la partie haute de la figure (5.9) *droite* est mise en évidence. Le rocher de figure (5.8 *droite*) est parfaitement classé.

Les deux images souffrent d'un aspect bruité néfaste à l'interprétation, la modélisation markovienne va nous permettre de régulariser ce classement.

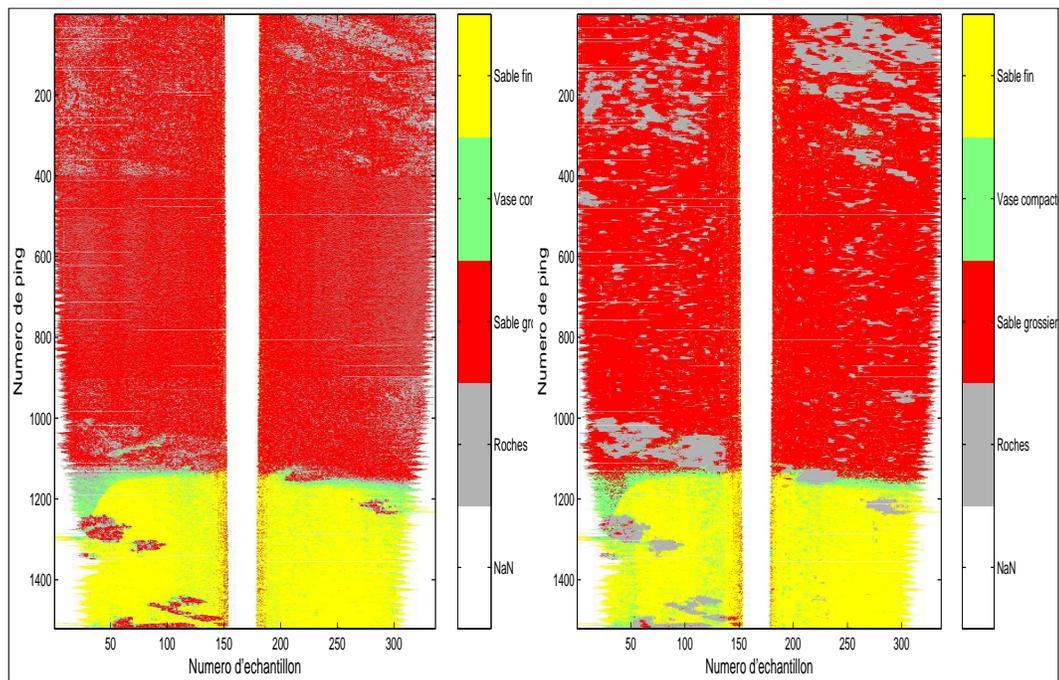


FIG. 5.8 – Comparaison de résultats de segmentation (*gauche*) Maximum de vraisemblance de la loi  $\mathcal{K}$  et (*droite*) SVM.

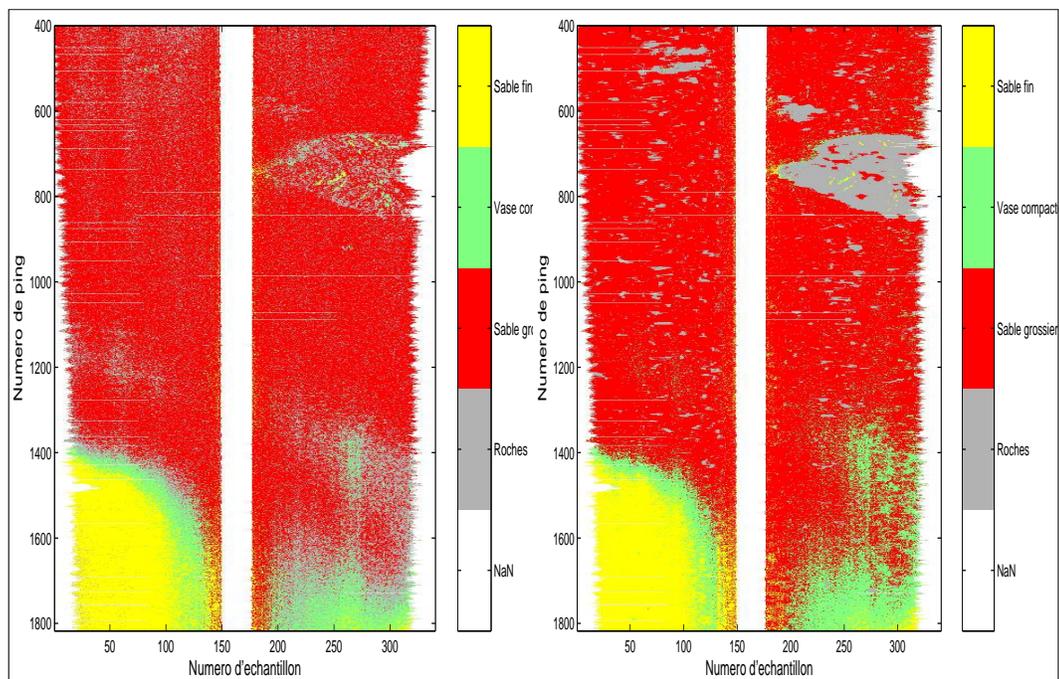


FIG. 5.9 – Résultat de segmentation de l'ensemble de la zone d'étude.

#### 5.4.4 Régularisation markovienne

Cette partie concerne l'introduction du cadre markovien dans la segmentation permettant la prise en compte d'un modèle globale de l'image. Le principe a été présenté en section (5.2) aboutissant au problème de maximisation de la probabilité a posteriori :

$$\mathbb{P}[Y = y|X = x] = \frac{1}{Z} e^{-(U(y)+V(x,y))}. \quad (5.68)$$

où  $V(x, y) = -\log(\mathbb{P}[X = x|Y = y])$  est l'énergie de rappel aux données et  $U(y)$  est l'énergie de régularisation.

Il n'est pas possible de créer des réalisations a posteriori de  $Y$  distribué selon (5.68) directement, mais elles peuvent être approximées itérativement ([Fjo 00]). Un algorithme itératif de type ICM (Iterative Conditional Modes, [Bes 74]) a été utilisé pour cette approximation. Une version locale de l'équation (5.68) est donc nécessaire et est donnée par :

$$\mathbb{P}[Y_p = y_p|X_p = x_p] = \frac{1}{Z'_p} \exp\left(-U_p(y_p) + \sum_{p \in \mathcal{P}} \log \mathbb{P}[X_p = x_p|Y_p = y_p]\right). \quad (5.69)$$

Le terme de régularisation  $U_p(y_p)$  retenu se base simplement sur les occurrences de l'étiquette des 8 plus proches voisins du pixel  $p$  :

$$U(y_p) = \sum_{y_q|q \in \mathcal{V}(p)} (-\beta \cdot \delta(y_p, y_q)). \quad (5.70)$$

où  $\delta(., .)$  est le symbole de Kronecker et  $\beta$  est un paramètre de régularisation. En pratique, l'algorithme se place en un pixel  $p$  ; le voisinage  $\mathcal{V}(p)$  des huit plus proches voisins, est défini. Le terme de régularisation compte alors le nombre d'occurrences du label  $y_p$  dans le voisinage du pixel et vient pondérer le terme de rappel aux données. La variable  $\beta$  est un paramètre fixant la qualité de régularisation ; plus sa valeur est élevée, plus la régularisation est importante. Nous avons choisi de fixer empiriquement la valeur de ce terme à 0.5.

L'ensemble des étiquettes est toujours  $\mathcal{E} = \{\text{roches, sable grossier, vase compacte, sable fin}\}$  numéroté de 1 à 4 par simplicité d'écriture.

Cet algorithme markovien est appliqué dans un premier temps à un terme de rappel aux données classiques modélisé par une loi  $\mathcal{K}$  angulaire. Les probabilités locales estimées en chaque pixel ont été définies dans la section (5.4.2). La seconde application concerne un terme de rappel aux données issu de l'algorithme SVM angulaire dont les paramètres et les probabilités locales sont issues de la section précédente. Les figures (5.10) et (5.11) représentent deux images sonar segmentées. Chaque figure comporte le résultat de l'algorithme markovien classique et celui du modèle hybride Markov/SVM.

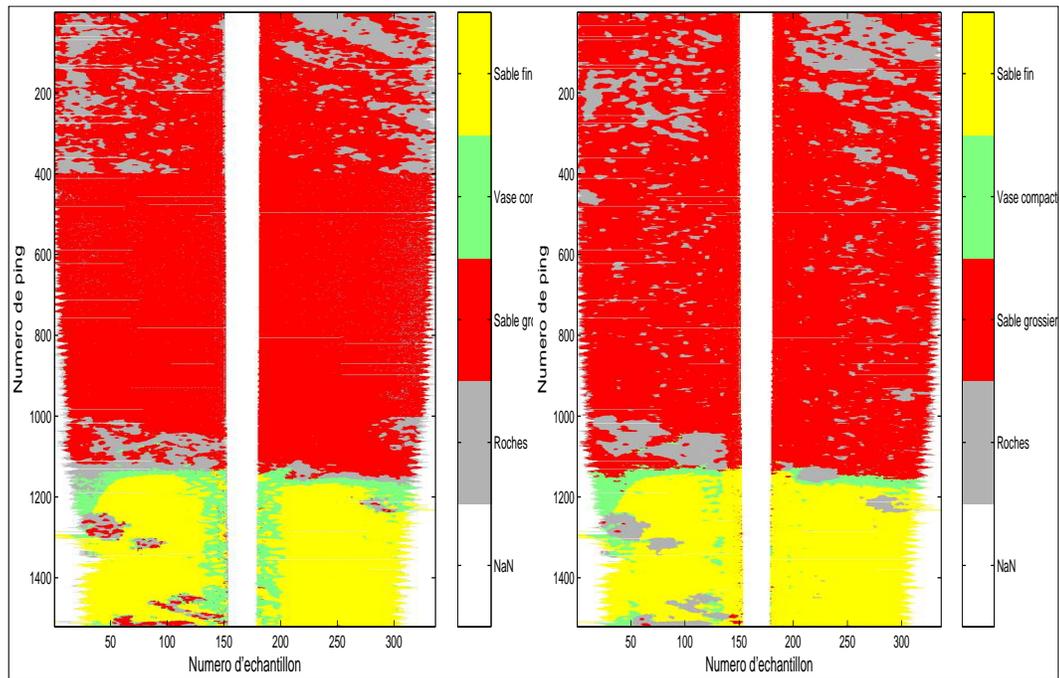


FIG. 5.10 – Segmentation markovienne basée sur un terme de rappel aux données modélisé par (*gauche*) la loi  $\mathcal{K}$  angulaire et (*droite*) l'algorithme SVM probabilisé.

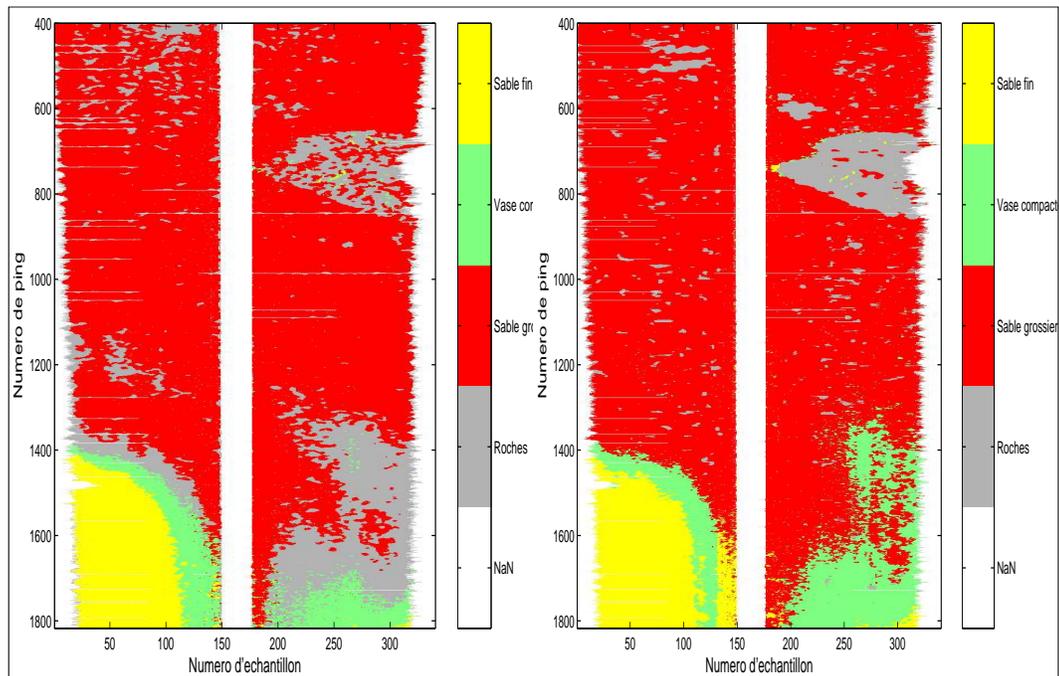


FIG. 5.11 – Segmentation markovienne basée sur un terme de rappel aux données modélisé par (*gauche*) la loi  $\mathcal{K}$  angulaire et (*droite*) l'algorithme SVM probabilisé.

La régularisation markovienne effectuée sur le terme de rappel aux données modélisé en loi  $\mathcal{K}$  angulaire, a amélioré la discrimination de classe de sable grossier et de roches. Les structures de roches sont nettement mieux localisées. Les zones homogènes (sable fin et sable grossier) sont bien étiquetées. Cependant, beaucoup de mauvais étiquetages sont restés et d'autres sont apparus. Le mélange sédimentaire observé sur les deux images et localisé à la transition entre sable grossier et sable fin est étiqueté systématiquement en vase compacte ou en roches. La régularisation a contribué à étendre cette zone. Un autre type d'approche doit être envisagé pour résoudre le problème de mélange de classes; on peut penser à la théorie de logique floue notamment. Enfin, le cadre markovien a contribué à une légère amélioration des étiquetages des roches mais la confusion avec le sable grossier est encore présente.

Les résultats de segmentation du modèle combinant les probabilités issues de l'algorithme SVM angulaire et le cadre markovien sont représentés en figure (5.10 *droite*) et (5.11 *droite*). Les résultats présentent pour les deux images les mêmes problèmes de mélanges sédimentaires. Les zones homogènes de sable fin et de sable grossier sont bien régularisées et les structures bien conservées montrant l'intérêt des deux approches combinées.

## 5.5 Conclusions

Dans ce chapitre, la segmentation supervisée des images du sondeur multifaisceau EM1000 a été envisagée. Conformément aux résultats obtenus dans les chapitres précédents, la modélisation du terme représentant les données à été étudiée.

L'introduction d'un modèle de bruit adapté aux données ainsi que la prise en compte des particularités de dépendance angulaire des systèmes sonar a tout d'abord été envisagée. L'utilisation d'une loi  $\mathcal{K}$  dont les paramètres varient en fonction de l'angle d'incidence, a montré son intérêt dans un processus de segmentation. Cependant, les limites de la discrimination ont été atteintes pour deux types de fonds (sable grossier et roches) présentant sensiblement les mêmes niveaux de leur indice de rétrodiffusion et pour lesquels la loi  $\mathcal{K}$  ne prend pas assez en considération les informations de texture.

Une modélisation des données basée à la fois sur une mesure énergétique (l'indice de rétrodiffusion) et une mesure de textures (le paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$ ) a donc été envisagée. Les méthodes SVM probabilisées ont été utilisées pour construire des classifieurs basées sur ces deux mesures. L'intérêt d'une telle démarche a été clairement démontrée sur des résultats expérimentaux.

Enfin, cette modification du terme de rappel aux données a permis son introduction dans un cadre markovien. Cette approche mêlant champ markovien et méthodes SVM, permet la combinaison de deux propriétés intéressantes. D'une part, les méthodes SVM donnent la possibilité de discriminer avec succès des descripteurs d'origines diverses et d'autre part, le modèle markovien permet une régularisation des erreurs de classifications. Grâce à cette modélisation, le processus de segmentation pourra prendre en compte un vecteur de mesures comprenant un plus grand nombre de descripteurs du type de fond marin comme des descripteurs d'origine topographique (pentes du fond) ou d'autres descripteurs de textures (comme ceux issus des matrices de cooccurrences notamment).

# Conclusions

Menés dans le cadre du programme d'études en caractérisation des fonds au sein du laboratoire d'acoustique sous-marine de l'Ifremer, ces travaux de thèse s'inscrivent dans la continuité des recherches concernant l'utilisation des données des systèmes hautes résolutions de cartographie sous-marine. Dans ce contexte, les signaux enregistrés par deux systèmes sonars différents ont été exploités : un sondeur multifaisceau et un sonar latéral.

L'objectif premier était d'aboutir à une séparation des caractéristiques du système d'acquisition de celles concernant le fond marin. Le sondeur multifaisceau avait déjà été étudié en détail et une procédure de correction des données mise au point. Par contre, la comparaison avec les signaux enregistrés par le sonar latéral nécessitait la conception d'une procédure adaptée de corrections à partir de l'étude en profondeur de ce système d'acquisition. Cette étape a nécessité un temps important d'analyse et d'investigation au cours duquel, la découverte de particularités de conception (absence de générateur de signaux) et d'acquisition (modifications des statistiques) est venue modifier les objectifs de comparaison quantitative en comparaison qualitative des descripteurs enregistrés par les deux systèmes. Cette étape a néanmoins permis la réalisation d'un processus adapté à l'ensemble des sonars latéraux.

L'indice moyen de rétrodiffusion angulaire est le descripteur le plus classique en caractérisation acoustique des fonds. L'analyse en fonction du type de fond a permis de confirmer son rôle essentiel pour la discrimination des sédiments marins. Les limites de la caractérisation par ce seul descripteur ont également été mises en évidence par deux résultats. D'une part, deux sédiments de nature nettement différente (de la roche avec textures et du sable grossier sans textures), présentent pratiquement le même indice moyen de rétrodiffusion. D'autre part, l'étude en fonction de la direction d'insonification, a montré des variations importantes de l'indice de rétrodiffusion. Ces observations ont été confirmées par des simulations basées sur un modèle de rétrodiffusion et identifiant l'organisation du relief d'interface comme cause de ces variations. Cette étude a donc mis en évidence la nécessité pour les modèles de l'indice de rétrodiffusion d'intégrer un spectre de rugosité d'interface sédimentaire à deux dimensions pour la caractérisation d'un fond. Dans le futur, il serait intéressant d'effectuer des analyses quantitatives sur les variations de l'indice en fonction des dimensions du microrelief et du type de sédiment et d'étudier l'impact de cette dépendance sur les performances de l'identification du type de fond à partir de l'indice. En tout état de cause, l'hypothèse commune d'une correspondance biunivoque entre type de sédiment et indice de rétrodiffusion apparaît très contestable.

La description énergétique moyenne des signaux rétrodiffusés a été complétée par une étude statistique plus complète. Parmi un ensemble de lois montrant de bonnes capacités à modéliser les densités empiriques de l'intensité rétrodiffusée, la loi  $\mathcal{K}$  bénéficie d'une interprétation physique basée sur une modélisation statistique de l'interface sédimentaire. Une étude angulaire des distributions empiriques a révélé une évolution de leur forme le long de la

fauchée. En particulier, l'évolution angulaire du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  présente des comportements caractéristiques du type de fond. Un modèle a été proposé pour prévoir cette évolution en fonction des paramètres géoacoustiques du fond et du système d'acquisition. Sa capacité de représentation des comportements angulaires du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  a montré la validité de l'approche. Dans une optique de caractérisation des fonds, des simulations restent à effectuer. En particulier, les liens entre paramètres géophysiques du relief et l'ensemble estimé sur l'image sonar (paramètres de la loi  $\mathcal{K}$ , longueurs de corrélation) doivent être vérifiés.

Ces résultats énergétiques et statistiques ont permis une amélioration des processus de segmentation des images sonars. Le chapitre 5 a mis en évidence l'intérêt de prendre en considération à la fois une modélisation adaptée des données de rétrodiffusion et les particularités de formation de l'imagerie acoustique sous marine comme la dépendance angulaire. L'introduction de la loi  $\mathcal{K}$  angulaire dans un algorithme de segmentation markovienne, a permis d'atteindre cet objectif. Le développement d'un nouvel algorithme basé sur une approche combinant les méthodes SVM et la modélisation markovienne des images a montré des résultats prometteurs. L'introduction de critères de tous types (énergétiques, statistiques, bathymétriques, textures,...) est désormais permise dans le cadre markovien.

# ANNEXES



## Annexe A

# Correction des données du sondeur multifaisceau EM1000

Le dépouillement des données du sondeur multifaisceau EM1000 met en évidence la présence d'artefacts dus aux caractéristiques d'acquisition du système. En effet,

- ★ le diagramme d'émission du sondeur n'a pas été corrigé, créant un décalage de niveau variable le long de la fauchée.
- ★ en réception, la formation de faisceaux crée des modulations importantes sur l'image.

La figure (A.1) montre une image brute issue du sondeur ainsi que l'indice de rétrodiffusion mesuré sur cette même image en fonction de l'angle d'incidence. Les modulations dues aux faisceaux formés en réception sont visibles sur l'image sous la forme de traînées verticales et sont nettement mises en évidence sur la courbe de l'indice de rétrodiffusion. En outre, les niveaux entre bâbord et tribord clairement dissymétriques, montrent que les gains (en émission et en réception) sont mal contrôlés car le fond est homogène.

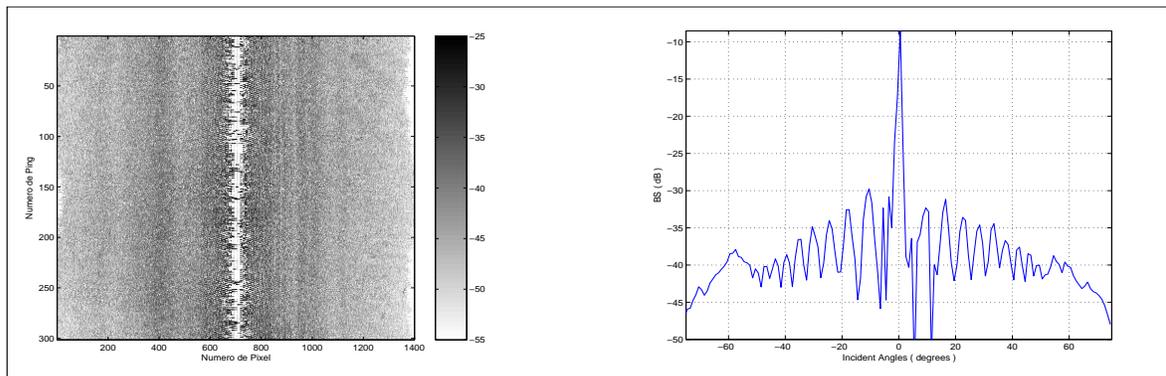


FIG. A.1 – Extrait d'une image du sondeur EM1000 (*gauche*, 1 pixel = 0.15 m.) et indice de rétrodiffusion moyen mesuré (*droite*) en fonction de l'angle d'incidence.

Le problème de correction des données de ce sondeur réside essentiellement dans la détermination conjointe des caractéristiques d'émission et de réception. En effet, la mesure directe des diagrammes de directivité est irréalisable ; un protocole de mesure incluant le sondeur et son porteur serait très difficile à mettre en oeuvre. Une alternative ([Lur 97]) consiste à déterminer les diagrammes d'émission et de réception par une méthode heuristique.

Cette partie exposera la méthode et l'appliquera à une zone parfaitement homogène. Enfin, la validité de la méthode sera évaluée grâce aux données de la mission *Reflacou* fournissant des indices de rétrodiffusion provenant de types de fonds différents.

## A.1 Méthode de correction

L'équation du sonar (cf. 2.10) est à la base de cette méthode de correction. Les termes  $NE$ ,  $SH$ ,  $GT$  et  $AI$ , fournis par le constructeur, sont déduits du niveau reçu  $ER$ . La divergence sphérique, formant avec l'absorption, les pertes de transmissions  $PT$  sont déduites également (un profil de célérité sur zone a été mesuré pour le calcul de l'absorption).

Les données résultantes représentent alors l'indice de rétrodiffusion angulaire du fond modulé par les diagrammes de directivité  $FD$  (en émission et en réception). La forme précise de ces deux diagrammes n'étant pas connue, il est impossible de les différencier. Le processus de correction des données nécessite donc la détermination conjointe des deux diagrammes. La correction des données du sondeur est alors un problème à une équation et deux inconnues :

$$BS = ER_{Cor} - FD. \quad (A.1)$$

où  $ER_{Cor}$  représente l'énergie reçue corrigée des paramètres connus du sondeur et du milieu de propagation.

En dépit de cette indétermination, l'alternative proposée se base sur deux hypothèses pour estimer les diagrammes de directivité de chaque faisceau et diminuer la complexité du problème :

- ★ Les réponses correspondant aux centres de faisceaux ne sont pas trop altérées par les diagrammes de faisceaux.
- ★ Le phénomène de rétrodiffusion angulaire peut être modélisé par un modèle simplifié (cf. 1.3) ; de forme gaussienne près de la verticale, de type  $\beta$ -Lambert pour les incidences rasantes et un transitoire de forme gaussienne faisant la jonction entre les deux secteurs angulaires :

$$BS_{theo} = 10 \log_{10} \left[ A \exp(-\alpha\theta^2) + B \cos^\beta(\theta) + C \exp(-\chi\theta^2) \right]. \quad (A.2)$$

En s'appuyant sur ces hypothèses, la méthode est basée sur le protocole suivant :

- ★ Choix d'une zone d'apprentissage homogène en terme sédimentaire et topographique (fond plat).
- ★ Ajustement des données correspondant aux centres de faisceaux sur le modèle simplifié  $BS_{theo}$  (Fig. A.2 haut).
- ★ Soustraction du modèle de rétrodiffusion, le résultat devient indépendant de la nature sédimentaire du fond et représente les diagrammes de directivité (émission et réception) de chaque faisceau. Un ajustement par un modèle réaliste d'antenne (sinus cardinal ou Tchebychev) permet alors d'estimer les paramètres de directivité de chaque faisceau (Fig. A.2 bas).

Les données du sondeur multifaisceau sont alors corrigées des paramètres caractéristiques du système et l'estimation de l'indice de rétrodiffusion angulaire se trouve améliorée (Fig. A.3).

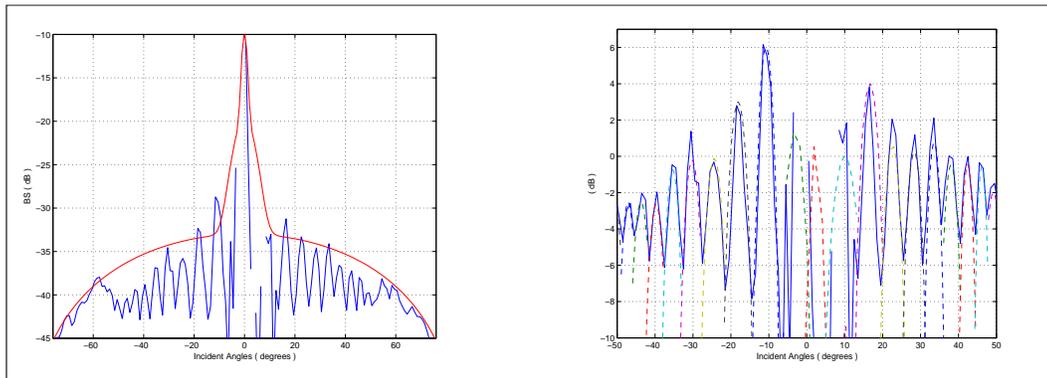


FIG. A.2 – Ajustement sur un modèle simple de *BS* (*gauche*) et ajustement sur le modèle d’antenne (*droite*).

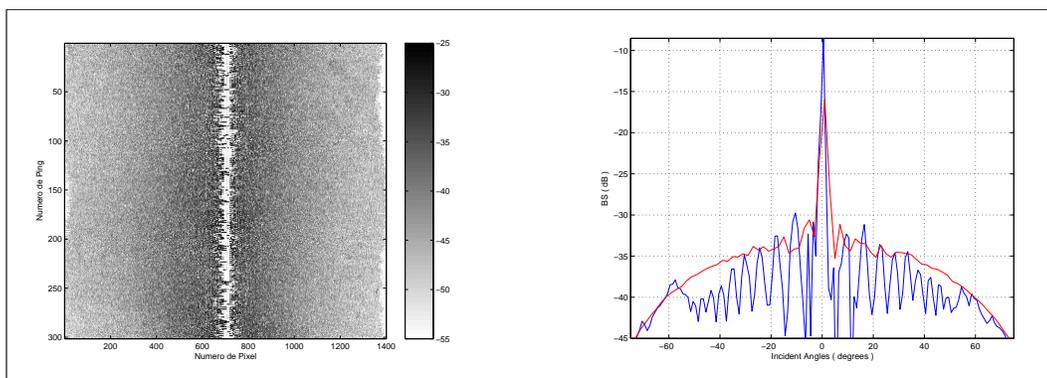


FIG. A.3 – (*Gauche*) Image corrigée des artefacts; (*droite*) réflectivité extraite de l’image corrigée (rouge)

Enfin, Hellequin([Hel 98]) a montré que :

- ★ la méthode est indépendante du type de fond ;
- ★ le domaine de validité de cette correction exclut le secteur spéculaire, environ  $[-20^\circ, 20^\circ]$ . Dans cette zone, les fluctuations du signal, spécialement fortes, sont dues à l’étendue de l’aire insonifiée, et aux fortes variations angulaires de l’indice de rétrodiffusion amenant de grandes difficultés pour déterminer le diagramme de directivité.

## A.2 Résultats

L’étude suivante a pour but de déterminer les avantages et les limites de la méthode de correction décrite précédemment. Dans un premier temps, l’étude sera réalisée sur une zone homogène de référence à partir de cinq images différentes. Les quatre premières ont été acquises dans le même sens de passage et sont distantes d’une quinzaine de mètres sur le fond. La dernière est aussi distante d’une quinzaine de mètres mais dans un sens de passage opposé. L’objectif est d’étudier le caractère répétitif de la méthode et de vérifier la dépendance au sens de passage. Enfin, la dépendance aux types de fond sera étudiée grâce aux données acquises sur trois autres sites.

### A.2.1 Étude sur une zone de référence homogène

L'objectif de cette partie est d'une part, de présenter la méthode plus en détail et d'autre part, d'étudier les variations des différents estimateurs de la méthode. La zone homogène de référence choisie<sup>1</sup>, est sédimentairement constituée de sable fin parfaitement homogène, présentant un relief plat et située à une profondeur de 30 mètres. Dans un premier temps, l'étude sera réalisée sur trois profils de ce sédiment homogène espacés de 15 mètres environ. Ensuite, deux profils enregistrées en sens opposés seront exploités.

La première étape de la correction des données est d'ajuster un modèle simple de rétrodiffusion sur les données des centres théoriques<sup>2</sup>; ceci a été réalisé sur 4 passes de la zone espacés de 15 mètres (Fig. A.4 *haut gauche*). Les ajustements sont très proches sauf dans le secteur spéculaire (faibles angles d'incidence) qui préfigure le problème de correction des données dans ce secteur. En effet, dans un secteur où l'indice de rétrodiffusion varie très rapidement en fonction de l'angle d'incidence, l'erreur d'estimation réalisée est importante et préjudiciable pour la suite de la méthode.

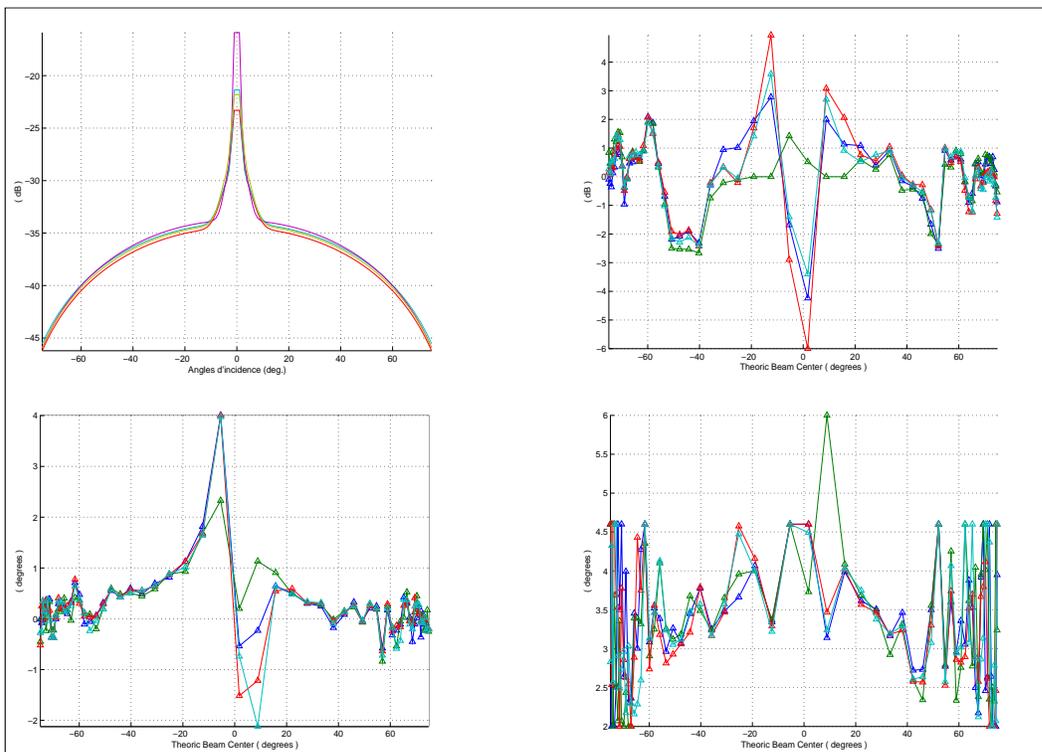


FIG. A.4 – (*Haut gauche*) Comparaison de l'estimation du modèle simple de rétrodiffusion sur 4 profils de nature sédimentaire identique. (*Haut droit*) Évolution du paramètre de gain d'antenne en fonction de l'angle des centres théoriques de faisceaux sur 4 profils d'une zone homogène de sable fin. (*Bas gauche*) Idem pour l'estimation du centre des faisceaux. (*Bas droit*) Idem pour l'estimation de l'ouverture des faisceaux.

<sup>1</sup>Il s'agit de la zone 5 de la Mission Reffacou (cf. Annexe C).

<sup>2</sup>Rappel : les angles d'émission et de réception du sondeur sont contrôlés de manière à compenser le roulis (cf. chapitre 2); en d'autres termes, les angles théoriques sont donc parfaitement connus.

Le modèle de rétrodiffusion est alors soustrait à l'ensemble des données de manière à découpler les propriétés du fond des caractéristiques du sondeur ; les données résultantes représentent les modulations dues aux diagrammes de directivité (en émission et réception). En réception, un processus de formation de voies est réalisé. Chaque faisceau peut alors être modélisé par un sinus cardinal (trois paramètres : gain, angle du centre et ouverture angulaire " $2\theta_3$ "). La figure (A.4) représente l'évolution de ces paramètres en fonction du centre théorique des faisceaux (équivalent au numéro de faisceau formé) après ajustement du modèle d'antenne sur les données.

Le paramètre de gain de l'antenne est important dans le sens où il témoigne de la mauvaise maîtrise des gains d'émission et/ou réception du système pouvant par exemple, provenir d'un défaut d'un transducteur élémentaire de l'antenne. Son estimation dépend fortement de l'ajustement sur le modèle de rétrodiffusion (un mauvais ajustement biaisera le paramètre de gain). L'étude de cet estimateur ne prendra tout son sens que dans la comparaison des réponses de différents types de fond. Néanmoins, son utilisation ici s'inscrit dans l'étude du caractère répétitif de la méthode. Deux secteurs peuvent être distingués sur la figure (A.4 *haut droit*) ; aux incidences rasantes, les différentes courbes se superposent parfaitement, alors que dans la zone spéculaire, les variations sont plus importantes. Une fois encore, la variation rapide de l'indice de rétrodiffusion et l'importance de l'aire insonifiée dans le secteur spéculaire rendent impossible tout ajustement précis.

Une conclusion similaire peut être faite sur les données de la figure (A.4 *bas gauche*). En effet, l'erreur d'estimation du centre de faisceau par rapport au centre théorique est de  $0.5^\circ$  en incidence rasante et atteint  $4^\circ$  en incidence proche de la verticale. Ces erreurs d'estimation sont dues au fait que, à l'intérieur d'un faisceau, le maximum de l'indice de rétrodiffusion ne se situe pas au centre théorique du faisceau, en conséquence l'ajustement sur le modèle d'antenne se cale sur ce maximum. Les données ne sont pas parfaitement décorréliées de la réponse du sédiment, provoquant une estimation biaisée des angles du centre de faisceau. En incidence très rasante, le problème est d'une importance minime puisqu'un biais de  $0.5^\circ$  dans l'estimation du centre de faisceau provoquera en gain un biais de 0.3 dB. Cependant dans le secteur du spéculaire, un biais angulaire de  $3^\circ$  peut provoquer un biais en réflectivité de 15 dB, montrant encore une fois la limite de la correction dans ce secteur angulaire.

Le dernier paramètre est l'ouverture à " $2\theta_3$ " des faisceaux formés en réception. Le constructeur annonce une valeur théorique de  $3.3^\circ$ . On distingue une très grande variation pour les angles rasants. En fait, le sondeur n'émet pas en mode iso-angulaire mais de façon équirépartie sur le fond. En incidence rasante, les faisceaux disposent d'un secteur angulaire très restreint ( $0.5^\circ$  pour les plus rasants). Cependant, ce biais n'est pas préjudiciable puisque les variations de niveaux de deux sinus cardinaux pour des angles proches du lobe principal sont minimales. Le problème réside de nouveau pour les faibles angles d'incidence où la gamme angulaire des faisceaux à l'approche du spéculaire croît jusqu'à une dizaine de degrés et une erreur d'estimation de l'ouverture angulaire engendre d'importantes variations.

Sur une zone de sable fin parfaitement homogène et pour des passes très rapprochées, la méthode montre une robustesse intéressante pour la majorité des angles d'incidence. Seul le secteur spéculaire montre les limites de la méthode. Cependant, ce secteur est généralement délimité par les angles  $[-20^\circ, 20^\circ]$  représentant un faible pourcentage de l'image ; la méthode donne de bons résultats.

Les données récoltées lors de la campagne d'acquisition *Reflacou* permettent de tester la

méthode de détermination des diagrammes de directivités pour deux passes sur un même fond dont les sens de passage sont opposés. Cette étude doit permettre de montrer que les valeurs estimées (et en particulier les gains de chaque faisceau) ne sont pas dépendantes du fond (et de sa polarisation) mais bien des caractéristiques du sondeur. La figure (A.5) montre d'un coté les diagrammes de faisceaux obtenus sur deux passes de sens de passage opposé et de l'autre les gains obtenus. Les diagrammes de faisceaux sont parfaitement stables l'un par rapport à l'autre et les gains sont juxtaposées en dehors du secteur  $[-20^\circ, 20^\circ]$ . La méthode se montre ainsi indépendante du sens de passage.

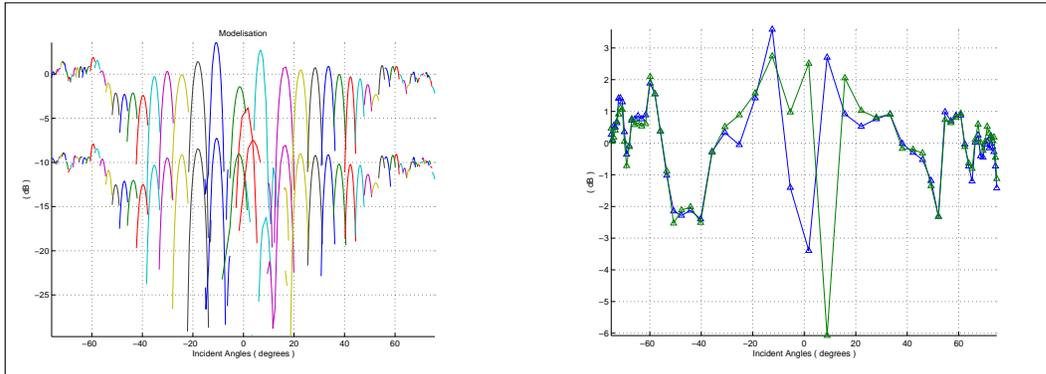


FIG. A.5 – (Gauche) diagrammes de directivités obtenus pour deux passes de la zone homogène ; les deux courbes sont décalées de 10 dB. (Droite) représentations des deux estimateurs de gains.

### A.2.2 Comparaison sur des zones sédimentaires différentes

Le but de cette méthode est d'obtenir un diagramme de directivité heuristique robuste au changement de type de fond. Ainsi, les ajustements ont été réalisés pour quatre types de fonds (de la vase au sable grossier). La figure (A.6) représente les résultats obtenus. Une fois encore, la méthode montre une remarquable stabilité dans la majorité de la fauchée angulaire. En effet, hormis les secteurs spéculaires, les différences entre les différents fonds n'excèdent pas 1 dB. La méthode se montre donc très robuste au changement de type de fond.

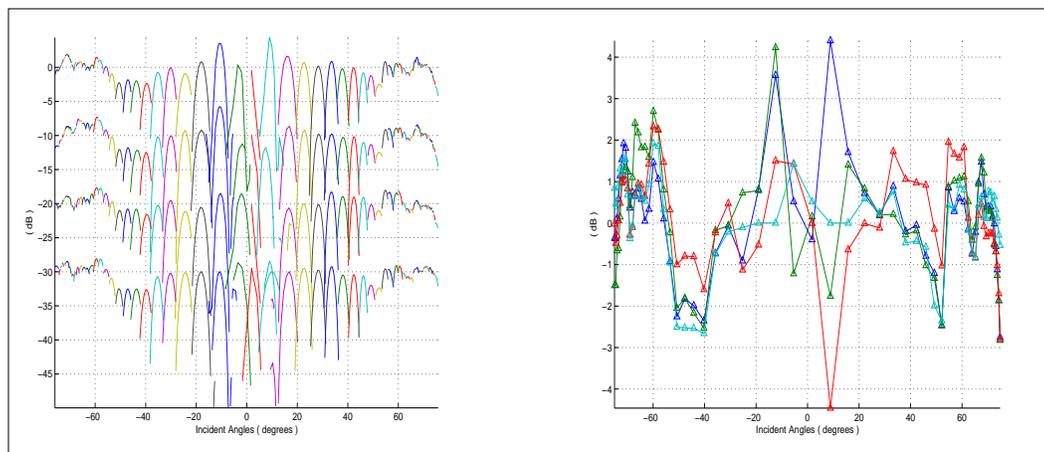


FIG. A.6 – .

### A.2.3 Conclusion

Dans cette partie, la méthode de correction heuristique a été examinée selon différents axes :

- ★ stabilité sur des passes d'un même fond très peu distantes ;
- ★ dépendance au sens de passage ;
- ★ stabilité en fonction du type de fond.

Dans ces trois points, la méthode montre d'excellentes garanties de stabilité hormis pour un secteur compris entre  $-20^\circ$  et  $20^\circ$ . Cette méthode étant ainsi validée, l'exploitation qualitative de l'indice de rétrodiffusion peut être réalisée.



## Annexe B

# Lois Statistiques

Cette partie décrit les lois utilisées dans ce mémoire. Le choix des variables  $I$  ou  $A$  (sauf mention contraire) montre à quel type de données, la loi peut s'appliquer.

### B.1 La loi de Rayleigh

La loi de Rayleigh est la loi de l'amplitude du chatolement gaussien dont la densité de probabilité et la fonction de répartition sont :

$$f_A(A) = \frac{2A}{R} \cdot e^{-\frac{A^2}{R}} \text{ avec } A \geq 0; \quad (\text{B.1})$$

$$F_A(A) = 1 - e^{-\frac{A^2}{R}} \quad (\text{B.2})$$

Le calcul de ses moments d'ordre  $m$  est analytique :

$$\forall m \in \mathbb{R}_+, \mathbb{E}[A^m] = R^{m/2} \cdot \Gamma(1 + m/2); \quad (\text{B.3})$$

$$\text{en particulier, } \mathbb{E}[A] = \sqrt{\frac{\pi R}{4}}; \quad (\text{B.4})$$

$$\text{et } \mathbb{E}[A^2] = R. \quad (\text{B.5})$$

Le coefficient de variation, rapport de l'écart type à la moyenne est donné par :

$$\gamma_A = \frac{\mathbb{E}[A^2] - \mathbb{E}[A]^2}{\mathbb{E}[A]^2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} - 1} \approx 0.5227. \quad (\text{B.6})$$

### B.2 Mélanges de loi de Rayleigh

Il s'agit d'une loi à  $2 * N$  paramètres composée d'une combinaison linéaire pondérée de  $N$  lois de Rayleigh indépendantes :

$$f_A(A) = \sum_{i=1}^N \left( \alpha_i \frac{2A}{R_i} \cdot e^{-\frac{A^2}{R_i}} \right); \quad (\text{B.7})$$

$$F_A(A) = 1 - \sum_{i=1}^N \left( \alpha_i e^{-\frac{A^2}{R_i}} \right). \quad (\text{B.8})$$

où chaque loi de Rayleigh est caractérisée par 2 paramètres ( $\alpha_i$  et  $R_i$ ).  $\alpha_i$  est un paramètre de proportion et  $R_i$  un paramètre d'échelle. Les paramètres sont estimés par un algorithme de type EM ([Abr 02]).

### B.3 La loi Exponentielle négative

La loi Exponentielle négative est la loi adaptée à l'intensité quand l'amplitude est distribuée en loi de Rayleigh :

$$f_I(I) = \frac{1}{R} e^{-\frac{I}{R}}; \quad (\text{B.9})$$

$$F_I(I) = 1 - e^{-\frac{I}{R}}. \quad (\text{B.10})$$

Ses moments et son coefficient de variation sont :

$$\forall m \in \mathbb{R}_+, \mathbb{E}[I^m] = R^m \cdot \Gamma(1 + m); \quad (\text{B.11})$$

$$\text{en particulier, } \mathbb{E}[I] = R; \quad (\text{B.12})$$

$$\text{et } \text{Var}[I] = R^2; \quad (\text{B.13})$$

$$\gamma_I = 1. \quad (\text{B.14})$$

### B.4 La loi $\Gamma$ et $\Gamma$ généralisée

La loi  $\Gamma$  généralisée pour des données  $L$ -vues en amplitude et intensité :

$$f_I(I) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{R}\right)^L e^{-\frac{LI}{R}} I^{L-1}. \quad (\text{B.15})$$

Ses moments sont donnés par :

$$\forall m \in \mathbb{R}_+, \mathbb{E}[I^m] = R^m \cdot \frac{\Gamma(L + m)}{L^m \Gamma(L)}. \quad (\text{B.16})$$

en particulier, la moyenne vaut  $\mathbb{E}[I] = R$  et  $\text{Var}[I] = R^2/L$ .

Le coefficient de variation, rapport de l'écart type à la moyenne est :

$$\gamma_I = \frac{1}{\sqrt{L}}. \quad (\text{B.17})$$

### B.5 La loi log-normale

La loi log-normale est particulièrement adaptée aux données en amplitude et pour des surfaces hétérogènes présentant de nombreux forts diffuseurs. Sa densité est donnée par :

$$f_A(A) = \frac{1}{A\sqrt{2\pi}\sigma_L} e^{-\frac{(\log(A) - m_L)^2}{2\sigma_L^2}}; \quad (\text{B.18})$$

où  $m_L$  et  $\sigma_L$  sont l'espérance et la variance de  $\log(A)$ .

Ses moments sont :

$$\forall m \in \mathbb{R}_+, \mathbb{E}[A^m] = \mathbb{E}[A]^m e^{\left[\frac{m(m-1)}{2}\sigma_L^2\right]}. \quad (\text{B.19})$$

en particulier, la moyenne vaut  $\mathbb{E}[I] = e^{[m_L + \sigma_L^2/2]}$ .

La fonction de répartition est donnée par

$$F_A(A) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\log(A) - m_L}{\sqrt{2}\sigma_L} \right) \right]; \quad (\text{B.20})$$

où  $\operatorname{erf}(\cdot)$  est la fonction d'erreur.

## B.6 La loi de Weibull

La loi de Weibull est une loi à deux paramètres adaptée aux données en amplitude et en intensité. Sa densité est donnée par :

$$f_I(I) = \left( \frac{x}{\xi} \right)^\eta \frac{\eta}{\xi} e^{-(\frac{x}{\xi})^\eta}; \quad (\text{B.21})$$

où  $m_L$  et  $\sigma_L$  sont l'espérance et la variance de  $\log(a)$ .

$$\forall m \in \mathbb{R}_+, \mathbb{E}[I^m] = \xi^m \frac{\Gamma(1 + m/\eta)}{\Gamma(1 + 1/\eta)^m}. \quad (\text{B.22})$$

en particulier, la moyenne vaut  $\mathbb{E}[I] = \xi$ .

La fonction de répartition est donnée par

$$F_I(I) = 1 - e^{-\left(\frac{I}{\xi}\right)^\eta}; \quad (\text{B.23})$$

où  $\operatorname{erf}(\cdot)$  est la fonction d'erreur.

Lorsque  $\eta=1$ , on retrouve la loi exponentielle et si  $\eta=2$ , la loi est celle de Rayleigh.

## B.7 La loi $\mathcal{K}$

La loi  $\mathcal{K}$  est souvent utilisée en imagerie haute résolution. En effet, les statistiques de l'intensité (ou de l'amplitude) rétrodiffusée par des surfaces naturelles se sont révélées décrites par des distributions en loi  $\mathcal{K}$ .

Même si des lois comme la loi de Weibull ont montré un potentiel intéressant pour décrire aussi bien ces données, la loi  $\mathcal{K}$  possède l'avantage de découler d'un processus physique.

- ★ En se basant sur le modèle des points réverbérants, la loi  $\mathcal{K}$  est obtenue en supposant un caractère aléatoire du nombre effectif de diffuseurs à l'intérieur de la cellule de résolution. Ce caractère aléatoire est souvent décrit par un processus de "naissance, mort et migration" des surfaces naturelles. Les paramètres de la loi  $\mathcal{K}$  ainsi obtenue sont alors fonctions des paramètres de la surface.
- ★ En supposant que l'interaction entre une onde et une surface naturelle peut se découper en deux échelles de grandeurs (micro et macro-relief), le modèle produit (très largement utilisé dans la littérature) permet aussi d'obtenir une loi  $\mathcal{K}$  à partir d'une variable aléatoire  $R$  grande échelle distribuée selon une loi Gamma et une v.a  $S$  micro-échelle selon une loi exponentielle négative.

**Densité de probabilité** La densité de probabilité de la loi  $\mathcal{K}$ , L-vues, pour une variable  $I$  en **intensité**, caractérisée par le paramètre d'échelle  $\mu$  et le paramètre de forme  $\nu$  est définie par :

$$f_I(I) = \frac{2}{\Gamma(L)\Gamma(\nu)} \left(\frac{L\nu}{\mu}\right)^{\frac{L+\nu}{2}} I^{\frac{L+\nu-2}{2}} K_{\nu-L} \left[2\sqrt{\frac{L\nu I}{\mu}}\right], \quad (\text{B.24})$$

où  $K_{\nu-L}$  est la fonction modifiée de Bessel d'ordre  $\nu - L$ .

La densité de l'**amplitude** ( $A = \sqrt{I}$ ) est aussi distribuée selon la loi  $\mathcal{K}$  :

$$f_A(A) = \frac{4}{\Gamma(L)\Gamma(\nu)} \left(\frac{L\nu}{\mu}\right)^{\frac{L+\nu}{2}} A^{L+\nu-1} K_{\nu-L} \left[2A\sqrt{\frac{L\nu}{\mu}}\right], \quad (\text{B.25})$$

Les **moments d'ordre  $m$**  de l'intensité sont donnés par :

$$M_m = \mathbb{E}[(I)^m] = \mu^m \frac{\Gamma(L+m)}{L^m \Gamma(L)} \frac{\Gamma(\nu+m)}{\nu^m \Gamma(\nu)}. \quad (\text{B.26})$$

Les moments de  $A$  sont obtenus en faisant le changement  $m = m/2$ .

Une approximation de la loi  $\mathcal{K}$  en intensité sous l'hypothèse d'un grand nombre de vues  $L$  est donnée par ([Oli 98]) :

$$f_I(I) = f_R(I) \cdot \left[1 + \frac{\nu}{L} \left(1 + \nu - \frac{2I(1+\nu)}{\mu} + \frac{\nu I^2}{\mu^2}\right)\right];$$

où  $f_R(I)$  est la distribution Gamma de la réflectivité de la scène.

Lien entre le paramètre d'ordre de la loi  $\mathcal{K}$  L-vues,  $\nu_L$  et le paramètre d'ordre de la loi  $\mathcal{K}$  1-vue :

$$\nu_L = \frac{L+1}{2} \nu_1.$$

**Estimation des paramètres de la loi  $\mathcal{K}$**  L'estimation de paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance est une technique classique d'estimation permettant de trouver la valeur la plus probable du paramètre d'une population donnée.

La fonction de log-vraisemblance associée à un échantillon de  $N$  variables aléatoires indépendamment distribuées selon une loi  $\mathcal{K}$  est donnée par :

$$\mathcal{L}_N = \log \left[ \prod_{i=1}^N f_{I_i}(I_i) \right]. \quad (\text{B.27})$$

Malheureusement, aucune forme analytique des dérivées partielles ne peut être obtenue. Ainsi, les estimateurs issus du maximum de vraisemblance ne peuvent être dérivés que par des méthodes itératives amenant à des temps de calculs très coûteux.

Pour pallier ce problème, une alternative est d'utiliser des calculs de moments pour dériver les paramètres de la loi  $\mathcal{K}$ . Oliver ([Oli 94]) a étudié trois estimateurs basés sur la méthode des moments et leurs précisions ont été analysées par Blacknell ([Bla 94]) et Lombardo et Oliver ([Lom 94]). Plus récemment, Iskander et Zoubir ([Isk 99]) ont proposé un estimateur basé sur les moments fractionnaires qui fournit des estimations précises pour de petits moments fractionnaires et qui repose sur une inversion numérique peu coûteuse. Enfin, Blacknell

et Tough ([Bla 01]) proposent un estimateur basé sur la statistique de la variable  $I \log(I)$ . Enfin, l'utilisation d'un algorithme stochastique "EM" a été investigué ([Rob 00]) ainsi que les réseaux de neurones ([Wac 02]). Malgré une bonne précision de l'estimation, ces dernières techniques souffrent d'un temps de calcul prohibitif.

La suite fait état des six estimateurs du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$ , issus de la méthode des moments. L'origine de leur utilisation réside dans l'analogie avec des mesures de textures associées à différentes densités ([Oli 98]). Ces différentes mesures sont regroupés dans le tableau (B.1) :

Méthode	Estimateur empirique	Moments analytiques associés
I ([Oli 94])	$\frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1$	$(1 + \frac{1}{\nu})(1 + \frac{1}{L}) - 1$
A ([Oli 94])	$\frac{\langle I \rangle}{\langle A \rangle^2} - 1$	$\frac{L\Gamma^2(L)}{\Gamma^2(L+1/2)} \frac{\nu\Gamma^2(\nu)}{\Gamma^2(\nu+1/2)} - 1$
L ([Oli 94])	$\langle \log^2(I) \rangle - \langle \log(I) \rangle^2$	$\Psi^{(1)}(\nu) + \Psi^{(1)}(L)$
U ([Oli 94])	$\langle \log(I) \rangle - \log(\langle I \rangle)$	$\psi^{(0)}(\nu) + \psi^{(0)}(L) - \log(\nu) - \log(L)$
Y ([Isk 99])	$\frac{\langle I^{1+s} \rangle}{\langle I \rangle \langle I^s \rangle}$	$(1 + \frac{s}{\nu}) (1 + \frac{s}{L})$
X ([Bla 01])	$\frac{\langle I \cdot \log(I) \rangle}{\langle I \rangle} - \langle \log(I) \rangle$	$\frac{1}{L} + \frac{1}{\nu}$

TAB. B.1 – Méthodes d'estimation du paramètre de forme de la loi  $\mathcal{K}$  ( $s$  désigne un nombre non entier pour la méthode Y ([Isk 99]),  $\langle . \rangle$  désigne la mesure empirique (i.e :  $1/N \cdot \sum_{i=1}^N$ ) et  $\Gamma$ ,  $\psi^{(0)}$ ,  $\psi^{(1)}$  sont respectivement les fonctions Gamma, Digamma et Trigamma).

Ainsi, les méthodes  $I$ ,  $Y$  et  $X$  permettent de dériver les estimateurs  $\hat{\nu}$  d'une manière numériquement triviale :

$$\hat{\nu} = \left[ \frac{L}{L+1} \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \right]^{-1}, \quad (\text{B.28})$$

$$\hat{\nu} = s \cdot \left[ \frac{L}{L+s} \frac{\langle I^{1+s} \rangle}{\langle I \rangle \langle I^s \rangle} - 1 \right]^{-1}, \quad (\text{B.29})$$

$$\hat{\nu} = \left[ \frac{\langle I \cdot \log(I) \rangle}{\langle I \rangle} - \langle \log(I) \rangle - \frac{1}{L} \right]^{-1}. \quad (\text{B.30})$$

Les autres méthodes nécessitent une inversion numérique (construction d'une base de données (Look-up table) et interpolation) à cause de la présence de la fonction gamma et de ses fonctions dérivées. L'estimation est donc complexifié numériquement.

**Performance de l'estimation** La performance d'un estimateur peut-être quantifiée sur la base de deux facteurs. Le premier est la précision de l'estimation qui est caractérisée par la distribution des estimateurs autour de la valeur réelle à estimer. La moyenne de cette

distribution donne le biais de l'estimateur alors que la variance rend l'erreur d'estimation. Le second facteur est la complexité de calcul de l'estimateur et ainsi la rapidité d'estimation. Les erreurs d'estimation peuvent être évaluées selon deux techniques différentes. Alors que la première est réalisée par simulation, Oliver ([Oli 94]) a décrit une technique analytique pour obtenir des expressions asymptotiques du second ordre des biais et variances des statistiques  $I$ ,  $A$ ,  $U$  et  $L$ . Celle-ci a été reprise par la suite par Blacknell et Tough ([Bla 01]) pour comparer l'ensemble des statistiques. La conclusion de cette étude concernant l'erreur d'estimation est que les statistiques  $I$  et  $A$  fournissent la meilleure précision d'estimation pour des valeurs de  $\nu > 10$ , la statistique  $U$  et  $X$  présentent des résultats légèrement moins bons pour cette gamme de valeurs mais un avantage certain pour les autres valeurs de  $\nu$ .

D'autre part, l'estimation basée sur la statistique  $U$  requiert une inversion numérique non-triviale amenant un coût de calcul important. De ce point de vue, l'inversion amenant à l'estimation de  $\nu$  pour la statistique  $X$  fournirait la méthode la plus efficace ([Bla 01]).

## Annexe C

# Campagne d'acquisition *Reflacou*

### C.1 Protocole d'acquisition

Les campagnes d'acquisition de données sondeurs et sonars menées à l'Ifremer par le département de géosciences marines DRO/GM<sup>1</sup> sont menées strictement dans un but de cartographie ; les données ne sont pas acquises pour des études acoustiques fines.

Une campagne spécifiquement destinée aux études géoacoustiques est apparue indispensable. En Août 2001, la campagne REFLACOU a été organisée par TMSI/AS<sup>2</sup> afin d'effectuer des acquisitions de signaux sonar sur des sites petits fonds (10 à 40 mètres), choisis à partir de la cartographie disponible, et présentant des faciès géologiques aussi variés que possible, afin de constituer :

- ★ des jeux de données-tests obtenues dans des conditions d'acquisition bien maîtrisées, destinées aux travaux de recherche technique en acoustique sédimentaire et en traitements de bathymétrie-imagerie,
- ★ des éléments de comparaison systématiques entre deux systèmes sonar de géométrie différente mais de fréquence identique.

Les sites de travail sont situés en Baie de Douarnenez ou en Rade de Brest (Fig. (C.1), sur des sites ayant déjà fait l'objet de campagnes de cartographie très détaillées. Sur cinq des six sites retenus, l'acquisition a été réalisée selon 20 profils dont l'organisation est détaillée sur la figure (C.2 *gauche*).

---

<sup>1</sup>Direction des Recherches Océaniques/Géosciences Marines.

<sup>2</sup>Technologie Marine et Systèmes d'Informations / Acoustique et Sismique.

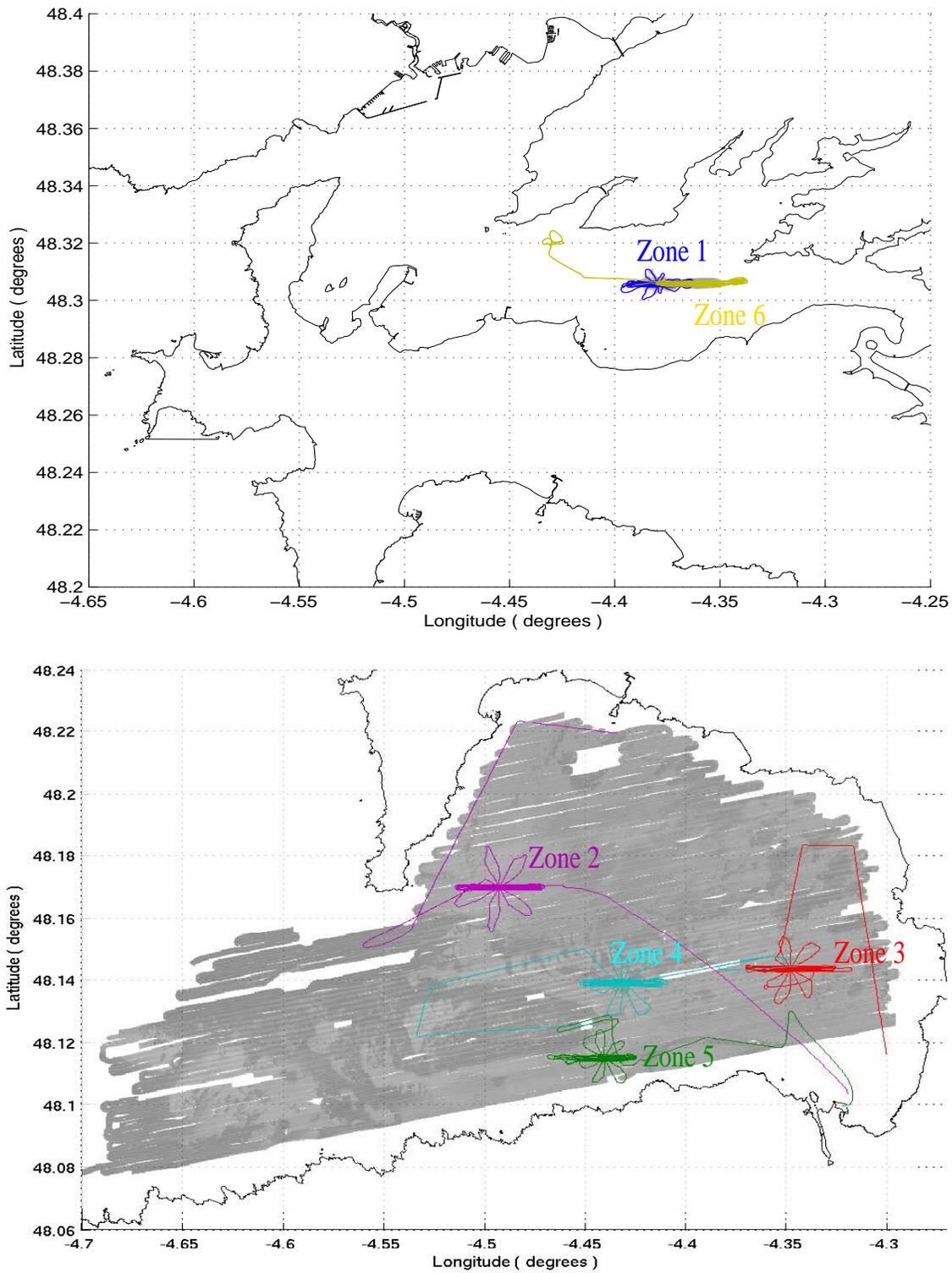


FIG. C.1 – (Haut) Rade de Brest et ses deux sites d'études. (Bas) Baie de Douarnenez et positions des quatre sites d'études. La mosaïque acoustique, présentée avec l'aimable autorisation de C. Augris (DRO/GM), est en cours de publication.

Chaque site, de faible étendue (de l'ordre de 1 km<sup>2</sup>), est repéré par un point central et la configuration d'acquisition permet d'obtenir :

- ★ le comportement de la réflectivité locale pour la gamme d'incidence complète -75° à 75° (Fig. C.2 *droite*),
- ★ des profils de sens de passages différents ; typiquement les profils de 1 à 7 sont réalisés d'Est en Ouest et d'Ouest en Est pour les profils 8 à 15 (Fig. C.2 *gauche*).
- ★ l'acquisition de cinq profils en étoile (16 à 20) bénéficiant de diverses orientations (angles d'azimut).

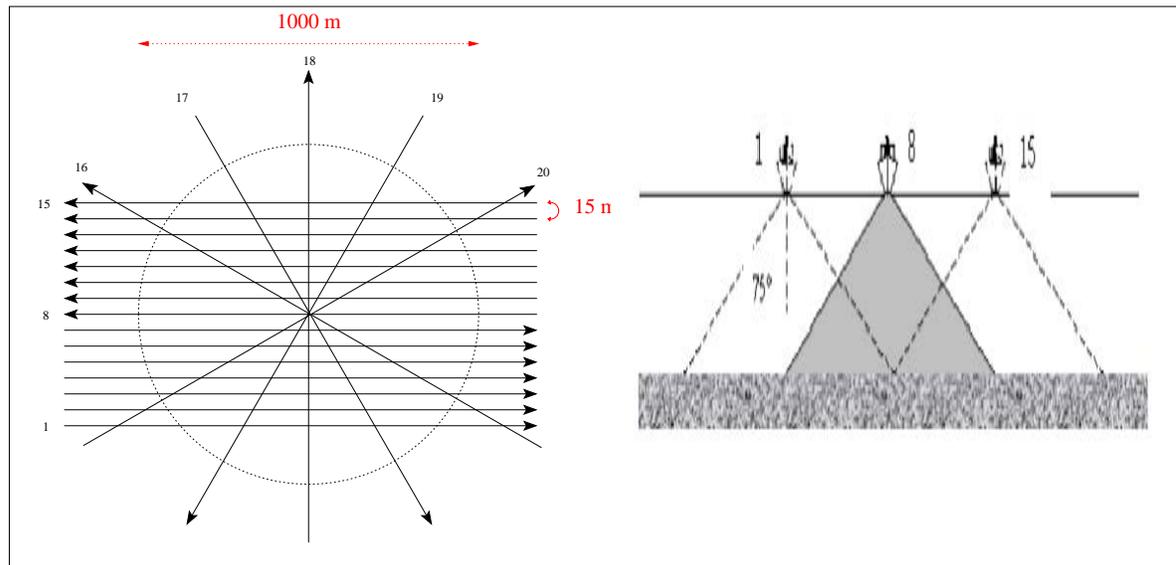


FIG. C.2 – Schéma d'acquisition d'une zone d'étude.

Les systèmes d'acquisition mis en oeuvre sont de deux types<sup>3</sup> :

- ★ le sondeur multifaisceau EM1000 de fréquence nominale 95 kHz fixé sous la coque du navire *Thalia*.
- ★ le sonar latéral Edgetech insonifiant à deux fréquences autour de 100 kHz et 400 kHz, positionné sur un poisson tracté par le bateau.

En complément des acquisitions, une journée a été consacrée à des prises de vue vidéo des sites de la Baie de Douarnenez avec le soutien d'une équipe de la DEL<sup>4</sup>.

Ses séquences permettent de :

- ★ vérifier la nature sédimentaire et l'homogénéité des zones d'étude ;
- ★ détecter la présence éventuelle de faune et de flore pouvant influencer localement sur les réponses acoustiques acquises ;
- ★ obtenir une description du relief local (présence de rides de sables, topographie de la zone).

Enfin, la nature sédimentaire a été étudiée grâce à l'analyse de nombreux prélèvements<sup>5</sup> in-situ réalisés au printemps 2000 (un an avant la campagne Refflacou).

<sup>3</sup>Le chapitre 2 présente en détail les deux systèmes.

<sup>4</sup>Direction de l'Environnement Littoral.

<sup>5</sup>Merci à C. Augris pour la mise à disposition des données.

Dans la suite, la présentation de chaque site se fera grâce à l'analyse des éléments suivants (lorsqu'ils sont disponibles) :

- ★ la mosaïque sonar du site d'étude ;
- ★ la bathymétrie correspondante ;
- ★ les prélèvements sédimentaires ;
- ★ les séquences vidéo ;
- ★ les images rectilignes sonar du sondeur multifaisceau EM1000 et du sonar latéral Edgetech.

## C.2 Site 1 et 6 : vase + crépidules

Situé en Rade de Brest (Fig. C.1), le site 1 est centré sur le point de coordonnées  $[N48^{\circ}18'50 - W4^{\circ}23'00]$ . Cette zone de vase a été choisie pour sa rugosité très forte, provoquée par la colonisation de crépidules (Fig. C.3). Ce mollusque gastéropode produit des éléments grossiers (coquilles) et fins (bio-dépôts)<sup>6</sup>. Ce site est caractérisé par deux types d'hétérogénéité :

- ★ hétérogénéité sédimentaire à cause de la variation de densité de crépidules ;
- ★ hétérogénéité bathymétrique ; la figure (C.3 *haut droit*) révèle une bathymétrie très chahutée puisque, sur un 1 km, le fond passe d'une profondeur de 40 m à quelques mètres.

Aucun enregistrement vidéo n'a été réalisé sur ce site.

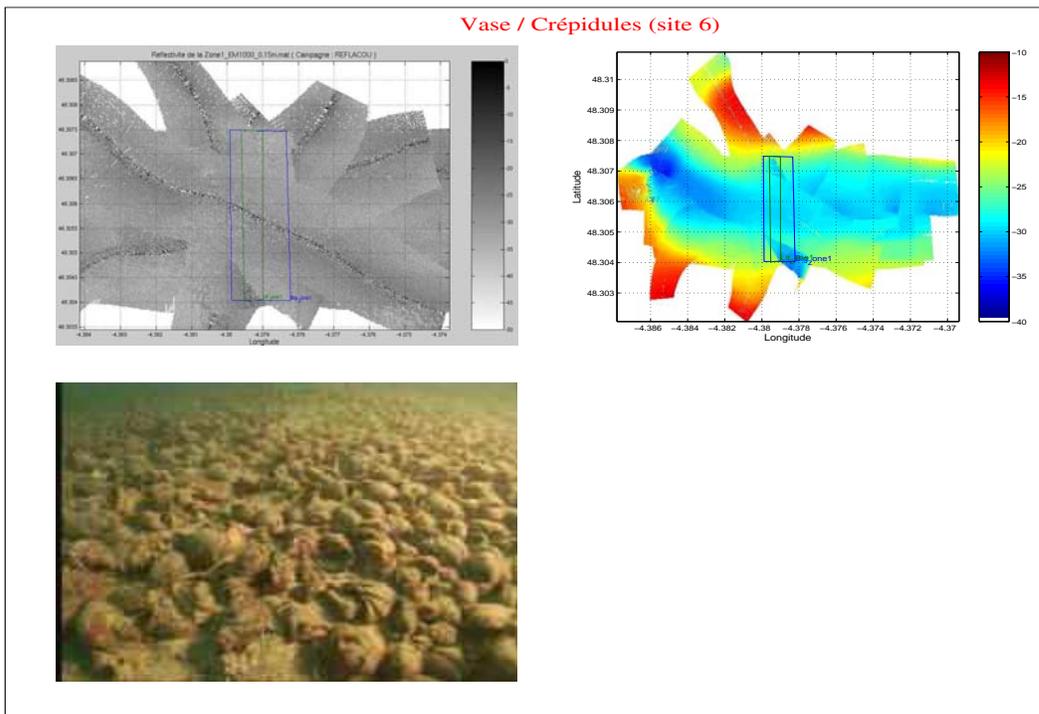


FIG. C.3 – **Site 1** : (*Haut gauche*) mosaïque, (*haut droit*) bathymétrie et (*bas gauche*) prélèvement.

<sup>6</sup>cf. <http://www.ifremer.fr/delec/bb/crepidul.htm> pour de plus amples informations.

Le site 6 est la deuxième zone d'étude de la Rade de Brest se situant légèrement à l'est du site 1 (point central [ $N48^{\circ} 18'50 - W4^{\circ} 23'00$ ]). Il s'agit d'une seconde zone peuplée de crépidules, de bathymétrie plus régulière que la zone 1 même si des amplitudes de 10 mètres peuvent être observées sur la bathymétrie (Fig. (C.4 *haut droit*)). Pour ce site, seules les passes parallèles de 1 à 15 ont été enregistrées. Comme pour le site 1, aucune séquence vidéo n'a été enregistrée.

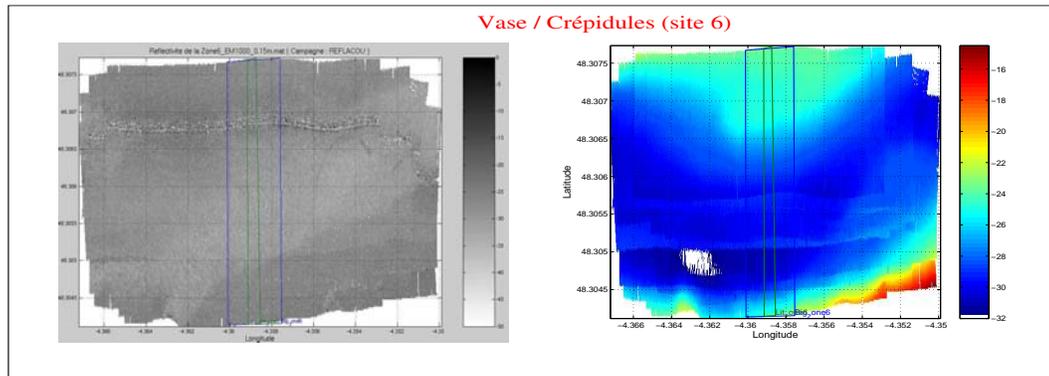


FIG. C.4 – Zone d'étude 6 : (*haut gauche*) mosaïque et (*haut droit*) bathymétrie.

### C.3 Site 2 et 5 : sable fin

Le point central de la zone 2 se situe en Baie de Douarnenez (Fig. C.1) aux coordonnées [ $N48^{\circ}10.200, W4^{\circ}29.550$ ]. Le fond est constitué de sable fin (Fig. C.5 *bas gauche*). La bathymétrie montre une légère pente descendante d'environ 0.7% orientée du Nord-Ouest au Sud-Est. Les séquences vidéo réalisées in-situ ont révélé l'existence d'un microrelief formé de rides de sable (Fig. C.5 *bas droit*). Ce microrelief ne semble pas présenter d'organisation spatiale parfaitement structurée, en particulier aucune orientation privilégiée n'a été détectée. Les longueurs d'ondes ou longueurs de corrélation des variations horizontales et verticales ont été approximativement estimées sur les images vidéo à respectivement 10 cm et 1-2 cm.

La figure (C.7) représente les images sonar rectilignes enregistrées par le sonar latéral (colonne de droite) et par le sondeur multifaisceau (colonne de gauche) pour les 7 profils d'azimuts divers. En outre, on peut y voir les surfaces d'études (délimitées par le cadre rouge) sur lesquelles ont été calculées les statistiques présentées dans cette thèse. L'examen des images sonar montre grâce aux résolutions fines du sonar latéral, des structures orientées non révélées par l'examen des séquences vidéos.

Le site 5, repéré par le point central [ $N48^{\circ} 18'50 - W4^{\circ} 23'00$ ], fait aussi partie de la Baie de Douarnenez. A l'instar de la zone 2, il s'agit d'un fond de sable fin (Fig C.6 *bas gauche*). Le relief est en légère descente (0.4%) orientée du Sud-Est au Nord-Ouest (Fig C.6 *haut droit*). Elle ne présente aucune texture apparente et est très proche en terme sédimentaire du fond du site 2. L'examen des vidéos a aussi révélé des variations verticales en forme de rides de sable ((Fig C.6 *bas droit*). Les images rectilignes du site ne révèlent pas de structure orientée. Une augmentation du niveau de la réflexion spéculaire (bande noires centrales) est clairement détectée sur les profils 17, 18 et 19 des images rectilignes du sondeur multifaisceau.

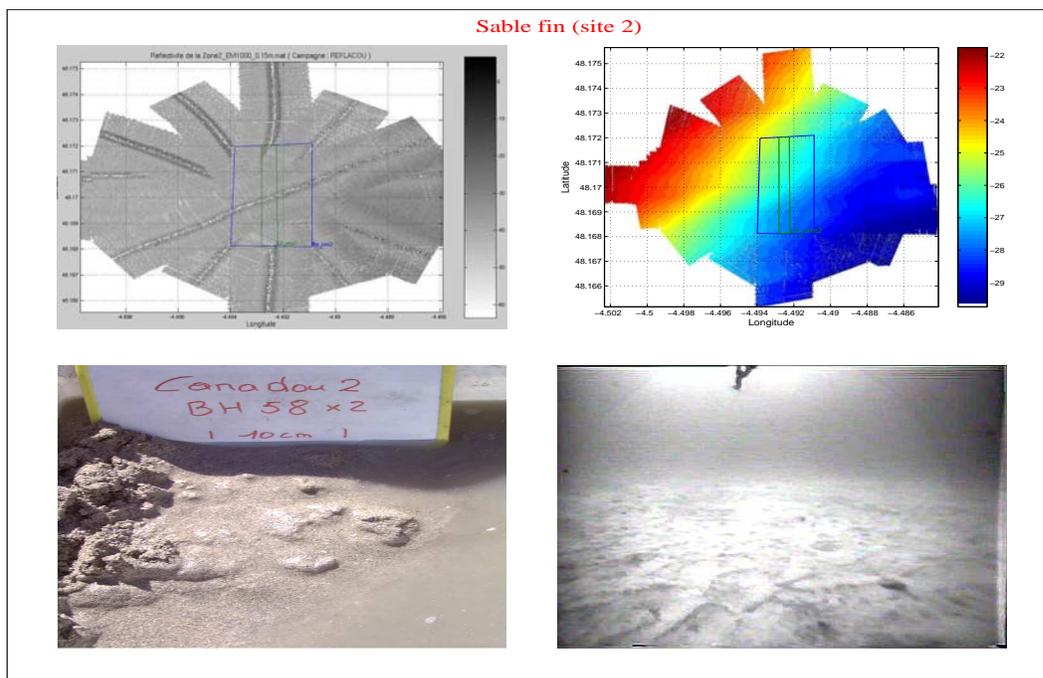


FIG. C.5 – **Site 2** : (*Haut gauche*) mosaïque, (*haut droit*) bathymétrie, (*bas gauche*) prélèvement et (*bas droit*) extrait vidéo.

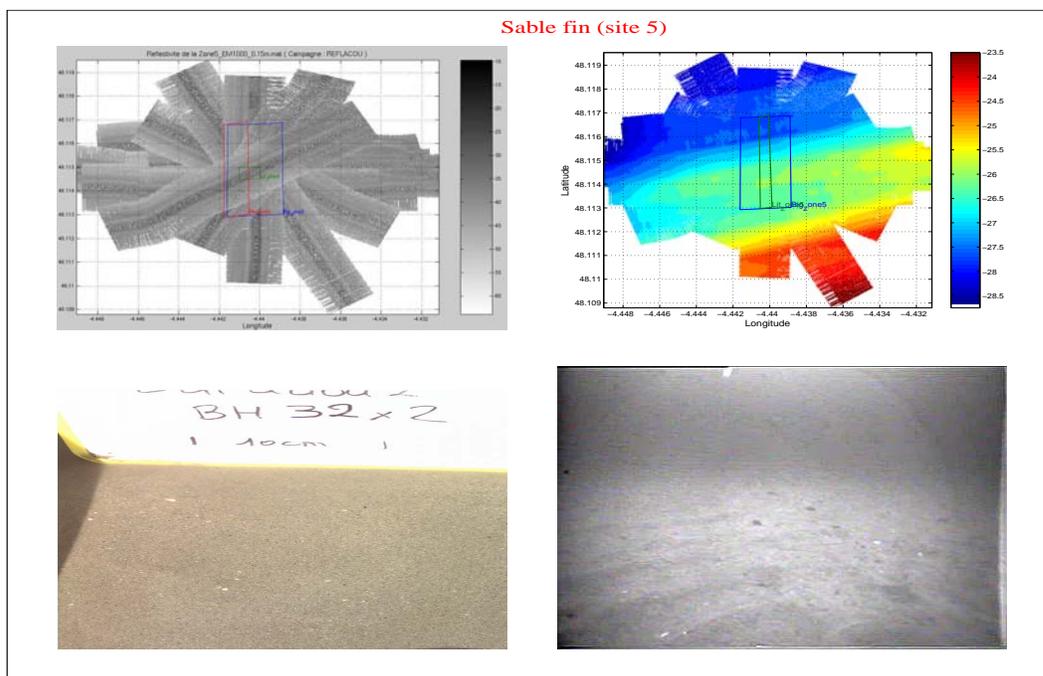


FIG. C.6 – **Site 5** : (*Haut gauche*) mosaïque, (*haut droit*) bathymétrie, (*bas gauche*) prélèvement et (*bas droit*) extrait vidéo.

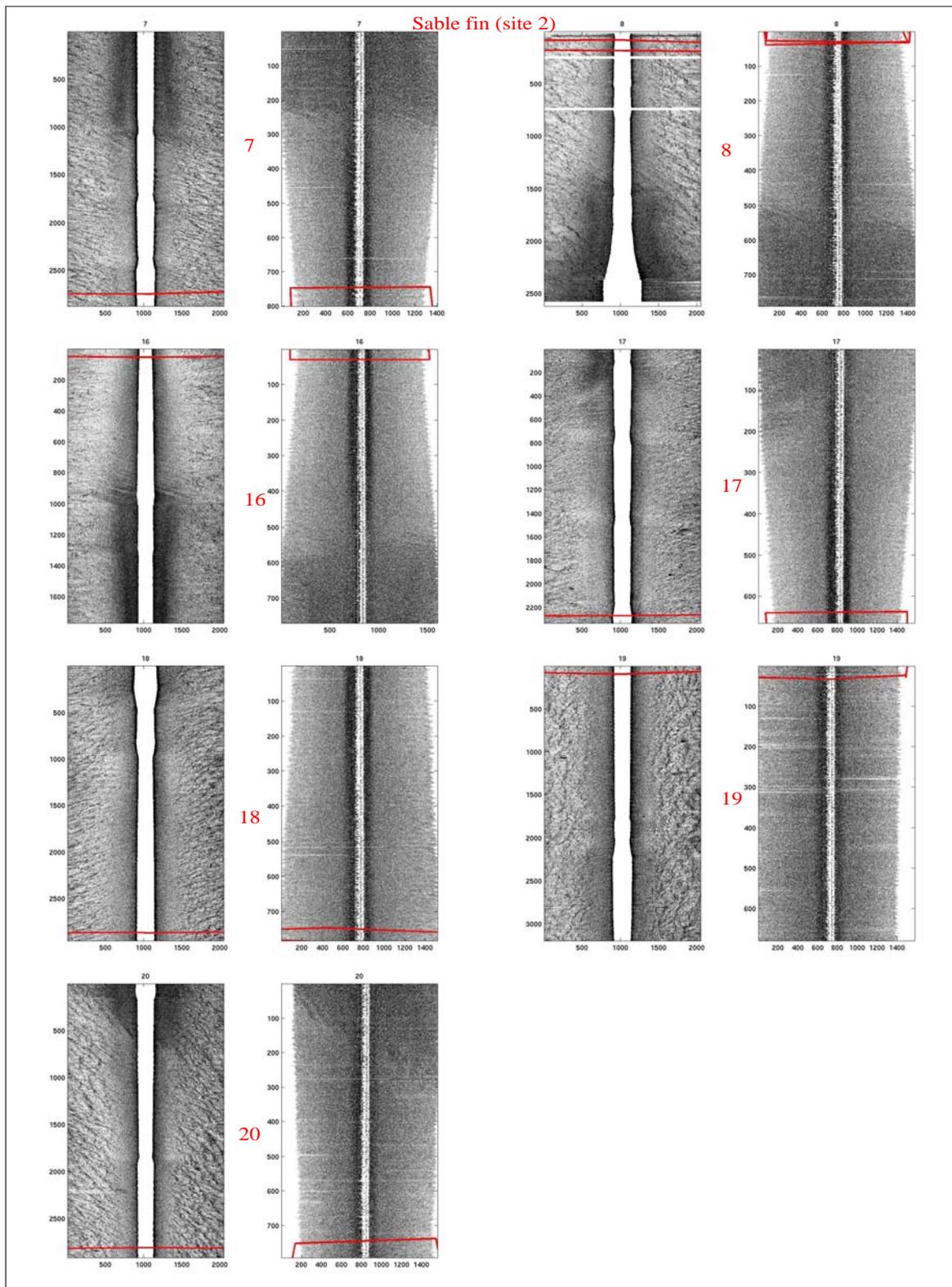


FIG. C.7 – Images sonar rectilignes du **site 2**. Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau.

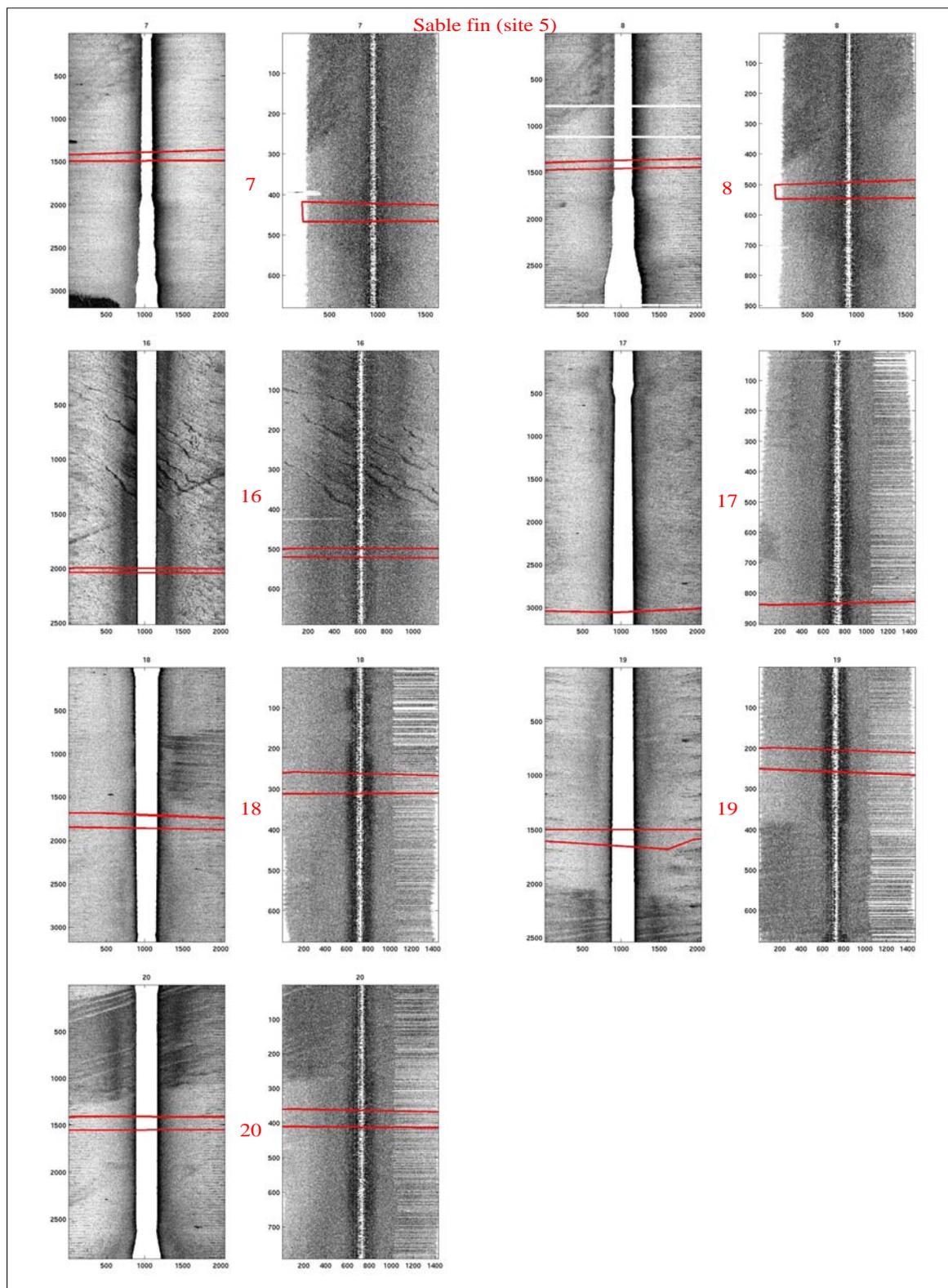


FIG. C.8 – Images sonar rectilignes du **site 5**. Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau.

## C.4 Site 3 : Vase compacte

Le site 3 constitué de sable envasé (C.9 *bas gauche*), est situé au fond de la Baie de Douarnenez (C.1). Le point central est repéré par les coordonnées  $[N48^{\circ}8'622 - W4^{\circ}20'859]$ . La bathymétrie est très plate ; un écart de 2 mètres de profondeur sur 1000 mètres de distance est visible sur la figure (C.9 *haut droit*). L'examen des séquences vidéo a une nouvelle fois révélé un microrelief structuré en forme de rides (C.9 *bas droit*) de variations verticales et de longueurs d'onde très faibles.

Les images rectilignes (C.10) présentent des structures assez complexes variables en fonction du sens de passage. Premièrement, de larges rubans très réflecteurs sont détectés quelque soit le sens de passage. Leurs formes et leurs caractères réflecteurs font penser à du maërl. En outre, les images rectilignes des profils 7 et 8 du sonar latéral montrent clairement des segments ondulants parallèles. Ces segments disparaissent lors du changement de direction d'insonification (profil 16, 17, 18, 19 et 20) pour laisser place à des rubans de forts réflecteurs.

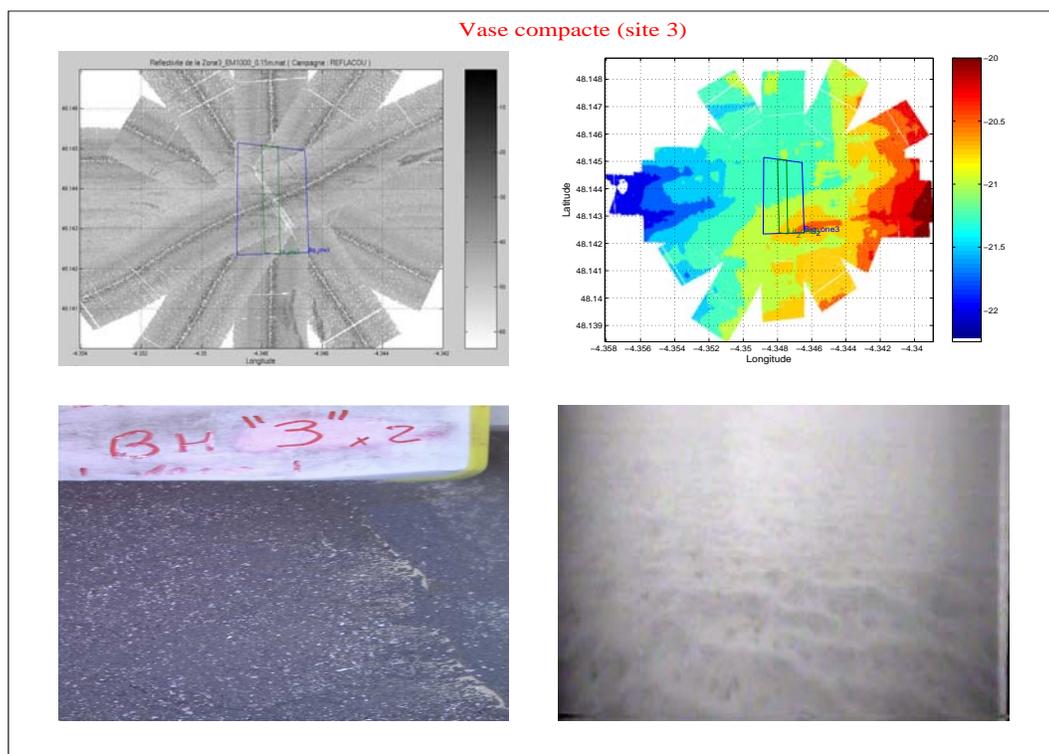


FIG. C.9 – **Site 3** : (*Haut gauche*) mosaïque, (*haut droit*) bathymétrie, (*bas gauche*) prélèvement et (*bas droit*) extrait vidéo.

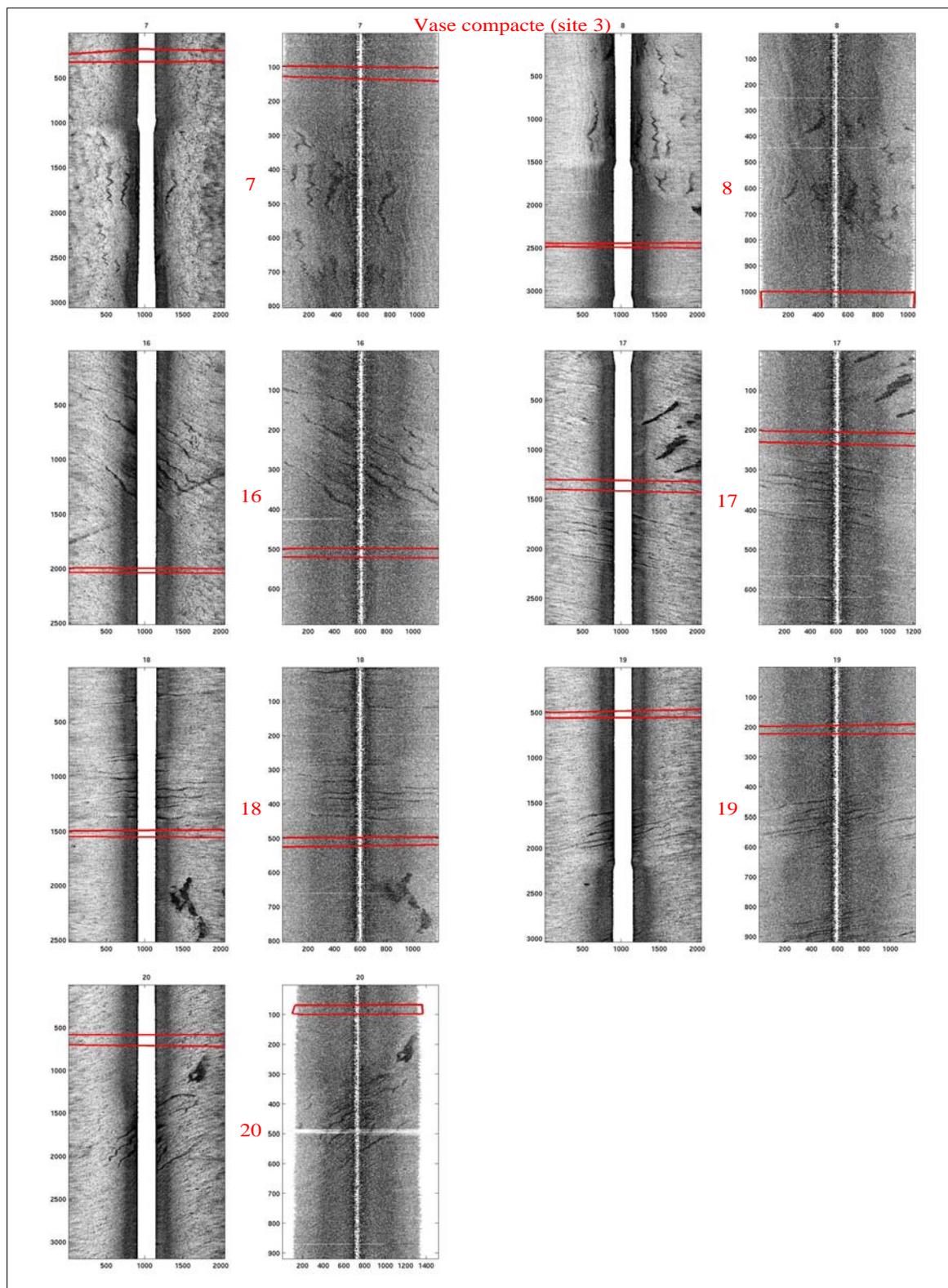


FIG. C.10 – Images sonar rectilignes du **site 3**. Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau.

## C.5 Site 4 : Sable grossier

La zone d'étude 4 se situe au milieu de la baie de Douarnenez au point central [ $N48^{\circ}8'35 - W4^{\circ}25'90$ ]. Le fond est constitué de sable grossier. A cet endroit, le courant a créé un champ de rides de sables parfaitement structurées de longueur d'onde de 1 à 2 mètres, piégeant en nombre des débris coquillés. Les lignes de crêtes sont orientées du nord au sud. Les séquences vidéos ont révélé en dehors des rides, une faune abondante (ophiures et étoiles de mer).

Les rides de sables sont progressivement détectées en changeant la direction d'insonification (Fig. C.12). Alors que les rides de sables sont bien détaillées pour le profil 18 du sonar latéral, les données du sondeur multifaisceau ne présentent pas la même qualité. Ceci illustre les conséquences des différences de caractéristiques d'acquisition entre le sonar latéral et le sondeur multifaisceau. Ce dernier fixé sous la coque du bateau, ne bénéficie pas de la rasance (et donc d'un contraste) important pour détecter précisément des rides de longueur d'onde métrique.

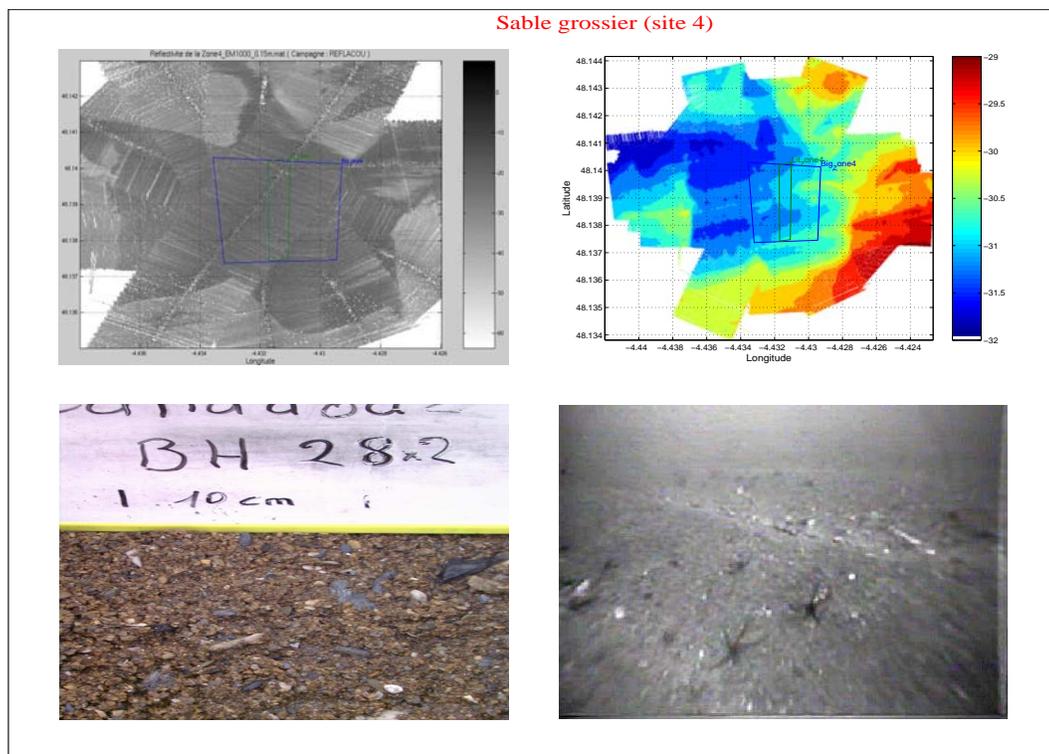


FIG. C.11 – **Site 4** : (*Haut gauche*) mosaïque, (*haut droit*) bathymétrie, (*bas gauche*) prélèvement et (*bas droit*) extrait vidéo.

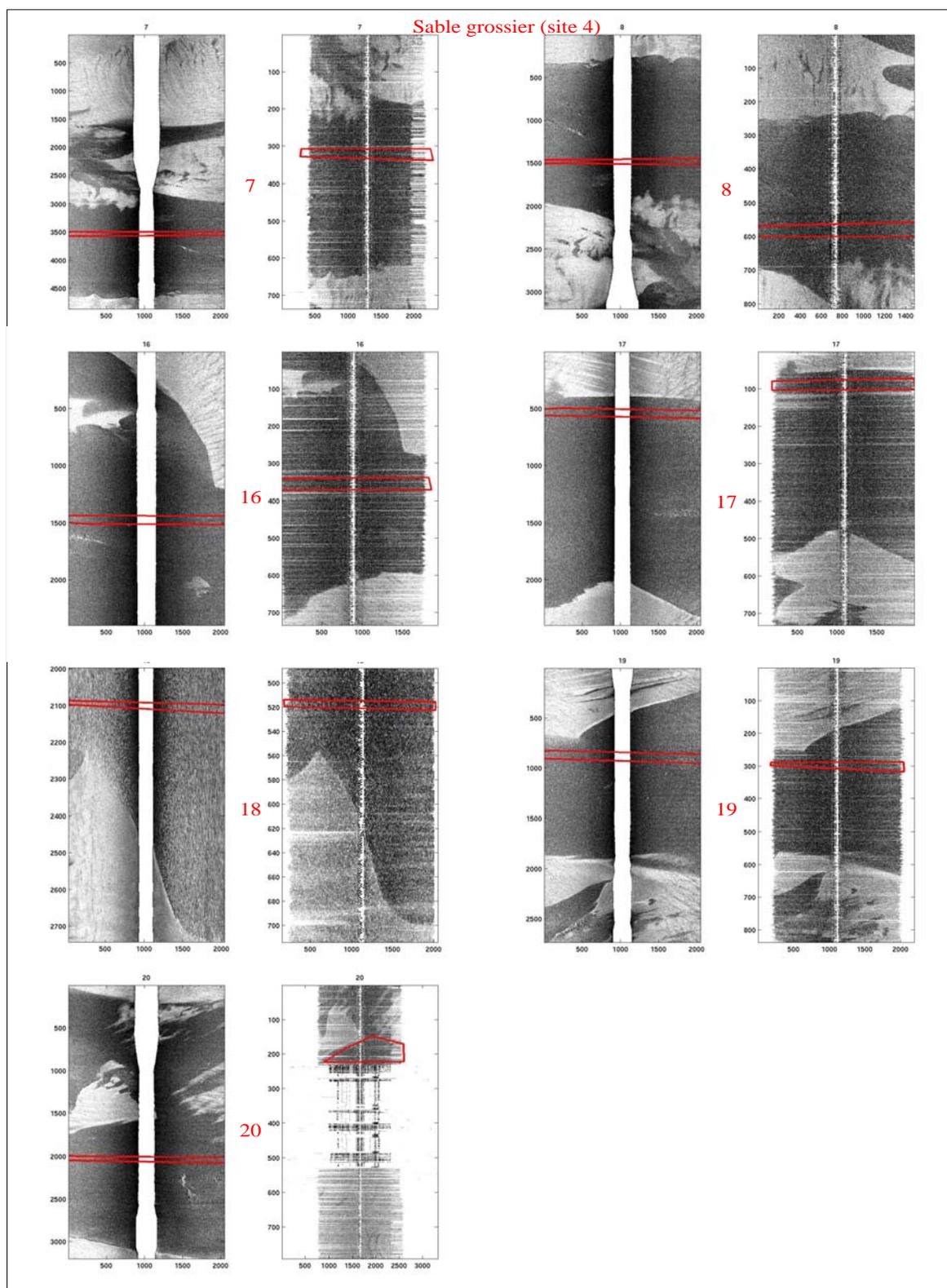


FIG. C.12 – Images sonar rectilignes du **site 4**. Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau.



# Bibliographie

- [Abr 97] D.A. Abraham, *Modeling non-rayleigh reverberation*, Tech. Report SR-266, SA-CLANT Undersea Research Center, La Spezia, Italy, June 1997.
- [Abr 02] D.A. Abraham and A.P Lyons, *Novel physical interpretations of k-distributed reverberation*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **27** (2002), no. 4, 800–813.
- [All 02] E.L. Allwein *et al.*, *Reducing multiclass to binary : A unifying approach for margin classifiers*, Journal of Machine Learning Research 1 :113–141.
- [Apl 94] D.R Jackson, *High-frequency ocean environmental acoustic models handbook*, Tech. report, Applied Physics Laboratory, Univ. of Washington, October 1994.
- [Bel 97] J.M. Bell and L.M. Linnett, *Simulation and analysis of synthetic sidescan sonar images.*, IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation **144** (1997), no. 4, 219–226.
- [Bes 74] J. Besag, *Spatial Interaction and the statistical analysis of lattice systems*, Journal of the Royal Statistical Society (series B) **36** (1974), 192–326.
- [Bes 77] J. Besag, *Statistical Analysis of non-lattice data*, The Statistician, 24 :179–195, 1977.
- [Bel 99] J.M. Bell, M.J. Chantler and T. Wittig, *Sidescan sonar : a directional filter of seabed texture ?*, IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation **146** (1999), no. 1, 65–72.
- [Bla 94] D. Blacknell, *Comparison of parameter estimators for k-distribution*, IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation **141** (1994), no. 1, 45–52.
- [Bla 95] D. Blanz, V. Vapnik and C. Burges, *Multiclass discrimination with an extended support vector machine*, Talk given at AT&T Bell Labs, 1995.
- [Bla 96] V. Blanz *et al.*, *Comparison of view-based object recognition algorithms using realistic 3D models*, Artificial Neural Networks - ICANN'96, 251–256.
- [Bla 01] D. Blacknell and R.J.A Tough, *Parameter estimation for the k-distribution based on  $[z \log(z)]$* , IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation **148** (2001), no. 6, 309–312.
- [Blo 93] P. Blondel *et al.*, *Textural Analysis and structure-tracking for geological mapping : Applications to sonar images from Endeavour Segmenta, Juan de Fuca Ridge*, Proc IEEE Oceans', **3** (1993), 208–213.
- [Bor 03] G. Canepa, L. Pautet and E. Pouliquen, *Boris-SSA : Bottom Response of inhomogeneities and Surface using Small Slope Approximation.*, Technical Report, (2003).

- [Bot 94] L. Bottou *et al.*, *Comparison of classifier methods : a case study in handwriting digit recognition.*, in *International Conference on Pattern recognition*, 77–87. IEEE computer Society Press (2001).
- [Bre 91] L.M. Brekhovskikh and Yu.P. Lysanov, *Fundamentals of ocean acoustics.*, Springer-Verlag, 1991.
- [Bri 89] K.B Briggs, *Microtopographical roughness of shallow-water continental shelves*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **14** (1989), no. 4, 360–367.
- [Bri 02] K.B Briggs, D. Tang, and K.L Williams, *Characterization of interface roughness of rippled sand off fort walton beach, florida.*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **27** (2002), no. 3, 505–514.
- [Bru 98] M. Bruneau, *Manuel d’acoustique fondamentale.*, Hermes, 1998.
- [Che 77a] C.T Chen and F.J Millero, *Speed of sound in seawater at high pressures*, Journal of the Acoustical Society of America **62** (1977), 1129–1135.
- [Cla 77b] C.S Clay and H. Medwin, *Acoustical oceanography : principles and applications*, John Wiley & Sons, 1977.
- [Cro 80] P.A Crowther, *Fluctuation statistics of sea-bed acoustical backscatter*, New York : Plenum (1980), 609–622.
- [Cra 00] K. Crammer and Y. Singer, *The learnability and design output codes for multiclass problems*, in Proceedings of the Thirteenth Annual Conference on Computational Learning Theory, 2000.
- [Del 74] V.A Del Grosso, *New equation for the speed of sound in natural waters (in comparison to other equations)*, Journal of the Acoustical Society of America **56** (1974), 1084–1091.
- [Dug 97] S. Dugelay, *Caractérisation des fonds marins à partir de données sondeur em12*, Ph.D. thesis, Université de Paris-Sud U.F.R. Scientifique d’Orsay, 1997.
- [Fra 82a] R.E Francois and G.R Garrison, *Sound absorption based on ocean measurements. part I : Pure water and magnesium sulfate contributions*, Journal of the Acoustical Society of America **72** (1982), 896–907.
- [Fra 82b] R.E Francois and G.R Garrison, *Sound absorption based on ocean measurements. part II : Boric acid contribution and equation for total absorption*, Journal of the Acoustical Society of America **72** (1982), 1879–1890.
- [Fis 63] M. Fisz, *Probability theory and mathematical statistics*, John Wiley & Sons, Inc., 1963.
- [Fjo 99] R. Fjortoft, *Segmentation d’images radar par détection de contours*, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1999.
- [Fjo 00] R. Fjortoft *et al.*, *Unsupervised Classification of Radar Images based on hidden markov models and generalised mixture estimation*, Proceedings of SAR Image Analysis, Modelling and Techniques, vol. SPIE 4173, 2000.
- [Gem 89] D. Geman *et al.*, *Locating texture and object boundaries, pattern recognition : theory and Application*, Ed. P. Devijer, NATO ASI Series, Springer-Verlag, 1986.
- [Gen 89] M. Gensane, *A statistical study of acoustic signals backscattered from the sea bottom*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **14** (1989), 84–93.

- [Goo 84] J.W Goodman, *Statistical properties of laser speckle patterns*, Springer-Verlag, 1984.
- [Gra 01] R.F Gragg, D. Wurmser, and R.C Gauss, *Small-slope scattering from rough elastic ocean floors : General theory and computational algorithm*, Journal of the Acoustical Society of America **110** (2001), no. 6, 2878–2901.
- [Gui 99] L. Guillon, *Contribution à l'interprétation géoacoustique de la rétrodiffusion des fonds marins*, Ph.D. thesis, Université du Maine, April 1999.
- [Gue 00] Y. Guermeur *et al.*, *A new multiclass svm based on a uniform convergence result*, in Proceedings of IJCNN. IEEE, 2000.
- [Gun 98] S.R. Gunn, *Support Vector Machines for Classification and Regression*, Tech. report, Faculty of Engineering, Science and Mathematics, School of Electronics and Computer Science, Univ. of Southampton, May 1998.
- [Ham 80] E.L Hamilton, *Geoacoustic modeling of the sea floor*, Journal of the Acoustical Society of America **68** (1980), no. 5, 1313–1340.
- [Ham 82] E.L Hamilton and R.T Bachman, *Sound velocity and related properties of marine sediments*, Journal of the Acoustical Society of America **68** (1982), no. 6, 1891–1905.
- [Has 98] T. Hastie and R. Tibshirani, *Classification by pairwise coupling*, in Advances in Neural Information Processing Systems, volume 10, MIT Press.
- [Hel 98] L. Hellequin, *Analyse statistique et spectrale des signaux de sondeurs multifaisceaux em950 : Application à l'identification des fonds sous marins*, Ph.D. thesis, Université de Rennes1 U.F.R. Structures et Propriétés de la Matière, December 1998.
- [Hel 03] L. Hellequin, J.M Boucher, and X.Lurton, *Processing of high frequency multibeam echosounder data for seafloor characterization*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **28** (2003), no. 1, 78–89.
- [Hin 90] P.C Hines, *Theoretical model of acoustic backscatter from a smooth seabed.*, Journal of the Acoustical Society of America **88** (1990), no. 1, 324–334.
- [Hsu 01] C.-W. Hsu and C.-J. Lin. *A comparison of methods for multi-class support vector machines*. Technical report, Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 2001.
- [Ish 78] A. Ishimaru, *Wave propagation and scattering in random media. vol.2 : Multiple scattering, turbulence, rough surfaces and remote sensing.*, Academic Press, 1978.
- [Isk 99] D.R Iskander and A.M Zoubir, *Estimation of the parameters of the k-distribution using higher order and fractional moments*, IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems **35** (1999), no. 4, 1453–1457.
- [Jac 86] D.R Jackson *et al*, *Application of the composite roughness model to high frequency bottom backscattering*, Journal of the Acoustical Society of America **79** (1986), 1410–1422.
- [Jac 96] D.R Jackson *et al*, *Tests of models for high-frequency seafloor backscatter.*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **21** (1996), no. 4, 458–470.
- [Jak 88] E. Jakeman, *Non gaussian models for the statistics of scattered waves*, Advances in Physics **37** (1988), no. 5, 471–529.

- [Jak 76] E. Jakeman and P.N Pusey, *A model for non-rayleigh sea echo*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation **24** (1976), 806–814.
- [Jak 78] E. Jakeman *et al*, *Significance of k distributions in scattering elements*, Physical Review Letters **40** (1978), no. 9, 546–550.
- [Jak 87] E. Jakeman *et al*, *Generalized k distribution in scattering experiments*, Journal of the Optical Society of America **4** (1987), no. 9, 1764–1772.
- [Kre 99] U. Kressel, *Pairwise classification and support vector machines*, in Advances in Kernel Methods - Support Vector Learning, 255–268, MIT Press.
- [Kua 87] D.T. Kuan *et al.*, *Adaptative restoration of images with speckle*, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing **35** (1987), no.3 373–383.
- [Kuo 64] E.Y.T Kuo, *Wave scattering and transmission at irregular surfaces*, Journal of the Acoustical Society of America **36** (1964), 2135–2142.
- [Leb 93] T.P. Le Bas, *TOBI sidescan processing with edge segmentation*, Proc. Institute of Acoustics, **15**, part 2, pp65–73, 1993.
- [Leg 02] Y. Le Gall, *Compte-rendu de mesures du sonar latéral edgetech df1000*, Tech. report, IFREMER, 2002.
- [Len 02] R. Lengellé *et al.*, *Décision et reconnaissance de formes en signal.*, Hermès, 2002.
- [Ler 68] C. Leroy, *Formulas for the calculation of underwater pressure in acoustics*, Journal of the Acoustical Society of America **40** (1968), no. 2, 651–653.
- [Ler 69] C. Leroy, *Development of simple equations for accurate and realistic calculations of the speed of sound in seawater*, Journal of the Acoustical Society of America **46** (1969), 216–226.
- [Lin 94] L.M. Linette *et al.*, *The analysis of sidescan soanr images for seabed types and objects*, Proc. Second European Conference on Underwater Acoustics, pp 733-738, 1994.
- [Lom 94] P. Lombardo and C.J Oliver, *Estimation of texture parameters in k-distributed clutter*, IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation **141** (1994), no. 4, 196–204.
- [Lur 97] X. Lurton *et al*, *Shallow-water seafloor characterization for high-frequency multi-beam echosounder : image segmentation using angular backscatter*, High Frequency Acoustics in Shallow Water, CP-45, SACLANTCEN, 1997, pp. 313–322.
- [Lur 00] X. Lurton, *Swath bathymetry using phase difference : theoretical analysis of acoustical measurement precision*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **25** (2000), no. 3, 351–363.
- [Lur 02] X. Lurton, *An introduction to underwater acoustics : Principles and applications*, Springer-Verlag, 2002.
- [Lyo 94] A.P Lyons, A.L Anderson, and F.S Dwan, *Acoustic scattering from the seafloor : Modeling and data comparison.*, Journal of the Acoustical Society of America **95** (1994), no. 5, 2441–2451.
- [Lyo 98] A.P Lyons, E. Pouliquen, W.L.J Fox, and P.A.G Thomson, *The impact of anisotropic roughness on acoustic interaction with the seafloor*, Journal of the Acoustical Society of America , vol. 104, 1998, p. 1812.

- [Lyo 99] A.P Lyons and D.A Abraham, *Statistical characterization of high-frequency shallow-water sea-floor backscatter*, Journal of the Acoustical Society of America **106** (1999), no. 3, 1307–1315.
- [Lyo 02] A.P Lyons, W.L.J Fox, T. Hasiotis, and E. Pouliquen, *Characterization of the two-dimensional roughness of wave-rippled sea floors using digital photogrammetry*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **27** (2002), no. 3, 515–524.
- [Maî 01] H. Maître, *Traitement des images rso*, Hermes Sciences, 2001.
- [Man 77] Mandelbrot, *Fractals*, Freeman, 1977.
- [Med 98] H. Medwin and C.S Clay, *Fundamentals of acoustical oceanography*, Academic Press, 1998.
- [Mid 99] D. Middleton, *New physical-statistical methods and models for clutter and reverberation : The ka-distribution and related probability structures*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **24** (1999), 261–284.
- [Mig 98] M. Mignotte, *Segmentation d'images sonar par approche markovienne hiérarchique non supervisée et classification d'ombres portées par modèles statistiques*, Ph.D. thesis, Université de Bretagne Occidentale U.F.R. Sciences et Techniques, 1998.
- [Mil 51] L.H. Miller, *Table of percentage points of kolmogorov statistics*, Journal of the American Statistical Association (1951), 111–121.
- [Min 86] M. Minoux, *Mathematical Programming : Theory and Algorithms*, Wiley, 1986.
- [Mou 89] P.D Mourad and D.R Jackson, *High-frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss*, IEEE Proceedings of Oceans (1989), 1168–1175.
- [Moo 02] K.D Moore and J.S Jaffe, *Time evolution of high-resolution topographic measurements of the sea floor using a 3-d laser line scan mapping system*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **27** (2002), no. 3, 525–545.
- [Mül 01] K.R. Müller *et al*, *An Introduction to Kernel-Based Learning Algorithms*, IEEE Transactions on Neural Networks **12** (2001), no. 2, 181–202.
- [Oli 84] C.J. Oliver, *A model for non-rayleigh scattering statistics*, Optica Acta **31** (1984), no. 6, 701–722.
- [Oli 85] C.J. Oliver, *Correlated K-distributed clutter models*, Optica Acta **32** (1985), no. 12, 1515–1547.
- [Oli 86a] C.J. Oliver, *The interpretation and simulation of clutter textures in coherent images*, Inverse Problems **2** (1986), 481–518.
- [Oli 86b] C.J Oliver and R.J.A Tough, *On the simulation of correlated k-distributed random clutter*, Optica Acta **33** (1986), 223–250.
- [Oli 94] C.J. Oliver, *Optimum texture estimators for sar clutter*, Journal of Physics (D), Applied Physics **26** (1994), 1824–1835.
- [Oli 98] C.J Oliver and S. Quegan, *Synthetic aperture radar images*, Artech House, 1998.
- [Pla 99] J. Platt, *Probabilistic outputs for support vector machines and comparison to regularized likelihood methods*, Advances in Large Margin Classifiers, A.J. Smola, P. Bartlett, B. Schölkopf, D. Schuurmans, eds., MIT Press, 1999.
- [Pas 02] A. Passerini, M. Pontil and P. Frasconi, *From Margins to Probabilities in Multiclass Learning Problems*, Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence, 2002.

- [Pou 92] E. Pouliquen, *Identification des fonds marins superficiels à l'aide de signaux d'écho-sondeurs.*, Ph.D. thesis, Thèse de l'Université de Paris 7, 1992.
- [Pou 98] E. Pouliquen, B. Zerr, and A. Lyons, *The influence of small-scale seafloor surface morphology on acoustic backscattering*, Journal of the Acoustical Society of America , vol. 105, 1998, pp. 1080–.
- [Pou 00] E. Pouliquen, A.P. Lyons and N.G. Pace, *Penetration of acoustic waves into rippled sandy seafloors*, Journal of the Acoustical Society of America , vol. 108, 2000, pp. 2071–2081.
- [Ric 01] M.D Richardson et al., *Effects of changing roughness on acoustic scattering : (2) anthropogenic changes*, Proceedings of the Institute of Acoustics (T.G. Leighton, G.J. Heald, G. Griffiths, and H.D Griffiths, eds.), vol. 23, 2001, pp. 343–390.
- [Rob 00] W.J.J. Roberts and S. Furui, *Maximum Likelihood Estimation of K-distribution Parameters via Expectation-Maximization Algorithm*, IEE Proceedings-F, Radar and Signal Processing **48** (2000), 3303–3306.
- [Sav 64] A. Savitzky and M.J.E. Golay, *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures*, Analytical Chemistry **36** (1964), 1627–1639.
- [Sch 02] B. Schölkopf and A.J. Smola, *Learning with kernels : Support Vector Machines, Regularization, Optimization and beyond.*, MIT Press, 2002.
- [She 54] F.P Shepard, *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*, Journal of Sedimentary Petrology **24** (1954), 151–158.
- [Sim 92] Simrad, *Simrad em1000 product description*, Tech. Report P2415E, SIMRAD, 1992.
- [Sle 84] J.F.A Sleath, *Sea bed mechanics*, Wiley, 1984.
- [Smo 97] A.J. Smola and B. Schölkopf, *On a kernel-based methods for pattern recognition, regression, approximation and operator inversion*, Algorithmica **22** (1997), 211–231.
- [Sta 92] S. Stanic and E.G Kennedy, *Fluctuations of high-frequency shallow-water sea-floor reverberation*, Journal of the Acoustical Society of America **91** (1992), no. 4, 1967–1973.
- [Ste 94] W.K Stewart et al., *Quantitative se-floor characterization using a bathymetric sidescan sonar*, IEEE Journal of Oceanic Engineering **19** (1994), 599–610.
- [Sto 63] J.H. Stockhausen, *Scattering from an inhomogeneous half-space*, Tech. Report 63/9, Naval Research Establishment (Canada), 1963.
- [Tho 98] E.I Thorsos and S.L Broschat, *The lowest-order small slope approximation for rough surfaces scattering*, these proceedings, 1998.
- [Tuc 89] M. Tucker, *Techniques in sedimentology*, Blackwell Scientific Publication, 1989.
- [Vap 95] V.N. Vapnik, *The nature of statistical learning theory*, Springer-Verlag, New-York, 1995.
- [Vap 98] V.N. Vapnik, *Statistical Learning Theory*, Wiley, New-York, 1998.
- [Vor 94] A. Voronovich, *Wave scattering from rough surfaces*, Springer-Verlag, 1994.
- [Wac 02] M.P. Wachowiak et al., *Estimation of K Distribution Parameters Using Neural Networks*, IEE Proceedings-F, Radar and Signal Processing **49** (2002), 617–620.

- [War 81] K.D Ward, *Compound representation of high resolution sea clutter*, Electronic Letters **17** (1981), 561–565.
- [Wen 78] C.K Wentworth, *A scale of grade and class for clastic sediments*, Journal of Geology **30** (1978), 377–392.
- [Wen 99] J. Weston and C. Watkins, *Multiclass support vector machines*, In M. Verleysen, editor, Proceedings ESANN, Brussels, 1999.
- [Wil 60] W.D Wilson, *Equation for the speed of sound in seawater*, Journal of the Acoustical Society of America (1960), 1357.
- [Zad 01] B. Zadrozny, *Reducing multiclass to binary by coupling probability estimates*. In NIPS, 2001.
- [Zar 87] J.H. ZAR, *Biostatistical Analysis*. EngleWoods Cliffs, NJ :Prentice Hall, 1987.

# Table des figures

1.1	Les différents éléments caractéristiques d'un profil de célérité du son dans l'eau de mer. . . . .	5
1.2	Evolution de l'absorption dans l'eau de mer en fonction de la fréquence ([Fra 82b]) pour une salinité de 35‰ et une profondeur nulle. . . . .	6
1.3	Réfraction due à un changement de célérité entre deux milieux. . . . .	7
1.4	( <i>Gauche</i> ) Discrétisation du profil de célérité. ( <i>Droite</i> ) Modification de la trajectoire des ondes acoustiques. . . . .	7
1.5	Schéma structural général des fonds océaniques. . . . .	8
1.6	Exemple d'une distribution granulométrique d'un sable mesurée par un granulomètre laser. . . . .	9
1.7	Diagramme de Shepard ([She 54]). . . . .	10
1.8	Célérité en fonction ([Ham 82]) de la porosité des fonds ( <i>gauche</i> ), de la taille des grains ( <i>milieu</i> ) et de la densité ( <i>droite</i> ). . . . .	13
1.9	Atténuation $k_p$ en fonction de la porosité ( <i>gauche</i> ) et de la taille des grains ( <i>droite</i> ). . . . .	13
1.10	Exemple de séparation du relief sédimentaire en micro et macro échelle. . . . .	14
1.11	Diffusion de surface et de volume d'une onde acoustique par un fond marin rugueux. . . . .	17
1.12	Géométrie de la diffusion par une surface S et par un volume V. . . . .	18
1.13	Comportement angulaire typique de l'indice de rétrodiffusion. . . . .	19
1.14	Géométrie utilisée pour le calcul du paramètre de Rayleigh. . . . .	21
1.15	Evolution angulaire du paramètre de Rayleigh pour une fréquence de 100 kHz et pour différentes valeurs de $\sigma_s$ . . . . .	24
1.16	Processus physique provoquant la rétrodiffusion angulaire. . . . .	25
1.17	Indices de rétrodiffusion synthétique résultant du modèle de Jackson pour une fréquence de 100 kHz. . . . .	28
2.1	( <i>Gauche</i> ) Image de lignes de pixels empilées, obtenues avec un sonar latéral sur une zone mixte (rides de sables et vase).( <i>Droite</i> ) Mosaique sonar (image géoréférencée). . . . .	30
2.2	Géométrie de base des systèmes d'imagerie . . . . .	30
2.3	Impulsion bande étroite dans le domaine temporel ( <i>gauche</i> ) et fréquentiel ( <i>droite</i> ). . . . .	32
2.4	Chirp dans le domaine temporel ( <i>gauche</i> ) et fréquentiel ( <i>droite</i> ). . . . .	32
2.5	Géométrie pour la correction des angles d'émission. . . . .	36
2.6	( <i>Haut</i> ) Configuration pour l'émission d'un sondeur multifaisceau, ( <i>bas</i> ) pour la réception. . . . .	38

2.7	( <i>Gauche</i> ) loi de TVG du sondeur multifaisceau EM1000. ( <i>Droite</i> ) loi équivalente en angle (hauteur d'eau 10 m). . . . .	40
2.8	Configuration d'acquisition pour un sonar latéral. . . . .	41
2.9	Directivité mesurée dans le plan longitudinal : ( <i>Gauche</i> ) antenne bâbord et ( <i>Droite</i> ) antenne tribord. . . . .	42
2.10	Directivité mesurée dans le plan transversal : ( <i>gauche</i> ) coordonnées cartésiennes ( <i>droite</i> ) polaires. Les courbes bleues représentent le diagramme bâbord et les rouges, la directivité tribord. . . . .	43
2.11	Sensibilité à l'émission ( <i>SV</i> à gauche) et en réception ( <i>SH</i> à droite) des antennes bâbord (bleu) et tribord (rouge). . . . .	43
2.12	( <i>Gauche</i> ) Tension (mesurée expérimentalement en bassin) et ( <i>droite</i> ) son spectre fréquentiel excitant les antennes du sonar latéral DF1000. . . . .	44
2.13	Résolution transversale (bleu : tribord et vert : bâbord) et longitudinale (rouge) du DF1000. . . . .	45
2.14	Signal de tension (en dB ref. 1V.) en fin de chaîne d'acquisition en fonction du temps et détection de hauteur. . . . .	46
2.15	Loi de Gain Variable en Temps ( <i>TVG</i> ), $40 \log(t) + K$ , traduite en dépendance angle . . . . .	46
2.16	Signal de tension corrigé de la <i>TVG</i> et des termes <i>NE</i> , <i>SH</i> et <i>GT</i> . . . . .	46
2.17	Configuration géométrique de l'antenne linéaire ( <i>gauche</i> ) pour la détermination de la distance de Fresnel ( <i>droite</i> ) pour la détermination du champ de pression. . . . .	47
2.18	Champ de pression en dB ref. 1 Pa. . . . .	49
2.19	Évolution de la pression en fonction de la distance et de la fréquence. L'approximation champ lointain est représentée en pointillés bleus. La distance de Fresnel est représentée en rouge. . . . .	49
2.20	Évolution de l'aire insonifiée en fonction de la distance et de la fréquence. L'aire insonifiée théorique (calculée avec $\Psi = 1.6^\circ$ ) est représentée en pointillés bleus. La distance de Fresnel est représentée en rouge. . . . .	50
2.21	( <i>Gauche</i> ) Évolution de l'erreur de correction en fonction de la distance source/cible. ( <i>Droite</i> ) Évolution de l'erreur de correction en fonction de l'angle d'émission pour plusieurs hauteurs sonar/fond. . . . .	50
2.22	( <i>Gauche</i> ) Exemple de mesures <i>in-situ</i> de température en fonction de la profondeur. ( <i>Milieu</i> ) Profils de célérité et ( <i>droite</i> ) d'atténuation dérivées des mesures de température (salinité = 35 p.s.u.). . . . .	51
2.23	( <i>Gauche</i> ) Diagrammes de directivité bâbord et tribord et diagrammes corrigés (pointillés). ( <i>Droite</i> ) Différence entre les diagrammes mesurés et corrigés ; bâbord (rouge) et tribord (bleu). . . . .	54
2.24	Différence entre l'indice de rétrodiffusion de Jackson calculé pour 95 kHz et 112 kHz, en fonction de l'angle d'incidence et pour différents types de fonds. . . . .	55
2.25	Diagramme de directivité mesuré et diagrammes empiriques sur trois fonds différents. . . . .	55
2.26	Comparaison entre les indices de rétrodiffusion du sondeur multifaisceau et du sonar latéral pour deux profils différents de quatre types de fonds. . . . .	57
3.1	( <i>Gauche</i> ) Configuration d'acquisition des passes parallèles et ( <i>droite</i> ) résultat de la reconstruction du <i>BS</i> local sur un <i>BS</i> global. . . . .	62

3.2	( <i>Haut</i> ) Mosaïque du site 5 et surfaces d'études : globale (bleu) et locale (rouge). ( <i>Milieu et bas</i> ) Comparaison de l'indice de rétrodiffusion global par rapport aux indices de chaque passes parallèles (1 à 15) pour les quatre fonds. . . . .	63
3.3	Indices de rétrodiffusion de six types de fonds en fonction de l'angle d'incidence ( <i>gauche</i> ) et de la tangente de l'angle d'incidence ( <i>droite</i> ). . . . .	64
3.4	Configuration d'acquisition ( <i>gauche</i> ) et méthode de représentation des données ( <i>droite</i> ) de deux passes de sens opposé. La zone d'étude est supposée composée de deux fonds : le demi-plan supérieur est sédimentairement différent du demi-plan inférieur. . . . .	67
3.5	( <i>Gauche</i> ) Associations des différents profils aux angles azimutaux. ( <i>Droite</i> ) Représentations polaires des angles d'azimut. . . . .	67
3.6	( <i>Haut gauche</i> ) Définition des angles d'azimut, ( <i>haut droite</i> ) exemple de courbes de <i>BS</i> d'un fond simulant une dépendance azimutale et représentations du <i>BS</i> en fonction de l'angle d'azimut en coordonnées cartésiennes ( <i>bas gauche</i> ) et polaires ( <i>bas droite</i> ). . . . .	69
3.7	( <i>Haut gauche</i> ) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 30$ ). ( <i>Haut droite</i> ) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. ( <i>Bas gauche</i> ) Représentation azimutale cartésienne et ( <i>bas droite</i> ) polaire. . . . .	72
3.8	( <i>Haut gauche</i> ) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 20$ ). ( <i>Haut droite</i> ) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. ( <i>Bas gauche</i> ) Représentation azimutale cartésienne et ( <i>bas droite</i> ) polaire. . . . .	73
3.9	( <i>Haut gauche</i> ) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 10$ ). ( <i>Haut droite</i> ) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. ( <i>Bas gauche</i> ) Représentation azimutale cartésienne et ( <i>bas droite</i> ) polaire. . . . .	74
3.10	( <i>Haut gauche</i> ) Variations des hauteurs du fond synthétique ( $EQM_r = 5$ ). ( <i>Haut droite</i> ) Indices de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour quatre directions d'insonification. ( <i>Bas gauche</i> ) Représentation azimutale cartésienne et ( <i>bas droite</i> ) polaire. . . . .	74
3.11	Représentation de l'indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour l'angle d'azimut $90^\circ$ et pour les quatre fonds synthétiques. . . . .	75
3.12	Fond de <b>sable fin (zone 5)</b> Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence ( <i>haut</i> ), de l'angle d'azimut en représentation cartésienne ( <i>milieu</i> ) et en représentation polaire ( <i>bas</i> ) pour le sondeur multifaisceau ( <i>gauche</i> ) et le sonar latéral ( <i>droite</i> ). . . . .	78
3.13	Fond de <b>sable fin (site 2)</b> Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence ( <i>haut</i> ), d'azimut en représentation cartésienne ( <i>milieu</i> ) et polaire ( <i>bas</i> ) pour le sondeur multifaisceau ( <i>gauche</i> ) et le sonar latéral ( <i>droite</i> ). . . . .	79
3.14	Extraits de la séquence vidéo enregistrée caractérisant les fonds de <b>sable fin</b> site 2 ( <i>gauche</i> ) et site 5 ( <i>droite</i> ). . . . .	81
3.15	Fond de <b>vase (site 3)</b> Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence ( <i>haut</i> ), d'azimut en représentation cartésienne ( <i>milieu</i> ) et polaire ( <i>bas</i> ) pour le sondeur multifaisceau ( <i>gauche</i> ) et le sonar latéral ( <i>droite</i> ). . . . .	83
3.16	Extraits de la séquence vidéo enregistrée sur le fond de <b>vase compacte</b> site 3 .	84
3.17	Extrait de la séquence vidéo enregistrée sur le fond de <b>sable grossier</b> (site 4).	85

3.18	Fond de <b>sable grossier (site 4)</b> Indice de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence ( <i>haut</i> ), d'azimut en représentation cartésienne ( <i>milieu</i> ) et polaire ( <i>bas</i> ) pour le sondeur multifaisceau ( <i>gauche</i> ) et le sonar latéral ( <i>droite</i> ). . . . .	86
3.19	Fond simulé de <b>sable grossier</b> ( $EQM_r = 20$ ). . . . .	87
3.20	Indices de rétrodiffusion simulés du sable grossier pour quatre structure d'interface différente : ( <i>haut gauche</i> ) $EQM_r = 5$ , ( <i>haut droite</i> ) $EQM_r = 10$ , ( <i>bas gauche</i> ) $EQM_r = 20$ et ( <i>bas droite</i> ) $EQM_r = 30$ . . . . .	88
4.1	P-valeurs du test de Kolmogorov-Smirnov en fonction de l'angle d'incidence pour 6 fonds différents. Chaque point de couleur indique l'acceptation de la loi candidate à décrire la distribution empirique. Les cinq distributions candidates sont les lois : exponentielle (bleue), $\mathcal{K}$ (verte), Rayleigh à deux composantes (rouge), Rayleigh à trois composantes (bleue claire) et Weibull (violet). . . . .	104
4.2	Évolution angulaire des deux paramètres de la loi $\mathcal{K}$ pour l'EM1000. Le premier paramètre est l'indice moyen de rétrodiffusion représenté en dB ( <i>haut gauche</i> ) pour des sédiments peu rugueux ( <i>haut droit</i> ) pour des fonds très rugueux. Le paramètre de forme est représenté <i>en bas à gauche</i> et <i>en bas à droite</i> pour les mêmes sédiments. . . . .	107
4.3	Évolution angulaire du paramètre de forme de la loi $\mathcal{K}$ pour le DF1000 et pour des sédiments peu rugueux ( <i>gauche</i> ) et pour des fonds très rugueux ( <i>droite</i> ). . . . .	109
4.4	Evolution angulaire de $\nu_I$ en fonction de l'aire insonifiée. . . . .	114
4.5	Évolution angulaire de $\nu_I$ pour le modèle de Oliver pour différentes valeurs de $\nu$ ( <i>gauche</i> ), de $L_{ct}$ ( <i>milieu</i> ) et de $L_{cl}$ ( <i>droite</i> ). . . . .	115
4.6	Modèle simple de $BS(\theta_{inc})$ ( $A = 0.9$ , $\alpha = 200$ et $B = 0.02$ ) et indices de rétrodiffusion modifiés par la distribution gaussienne des pentes d'écart-type $\sigma$ ( <i>haut gauche</i> ). ( <i>Haut droite</i> ) Paramètres de forme $\nu_I$ correspondants. Evolutions angulaire du modèle de Hellequin pour différentes valeurs de la longueur de corrélation longitudinale ( <i>bas gauche</i> ) et transversale ( <i>bas droite</i> ). . . . .	117
4.7	Courbes de différences entre modèles EDAK et Hellequin pour le calcul de $\nu_I$ pour différentes valeurs de $\sigma$ . . . . .	119
4.8	Ajustements pour les modèles Oliver, Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion ( <i>gauche</i> ) et du paramètre de forme $\nu_I$ ( <i>droite</i> ) pour un fond de <b>sable fin</b> homogène (site 5). . . . .	120
4.9	Ajustements pour les modèles Oliver, Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion ( <i>milieu</i> ) et du paramètre de forme $\nu_I$ bâbord ( <i>gauche</i> ) et tribord ( <i>droite</i> ) pour un fond de <b>vase/crépidules</b> (site 1). . . . .	122
4.10	Ajustements pour les modèles Oliver, Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion ( <i>milieu</i> ) et du paramètre de forme $\nu_I$ bâbord ( <i>gauche</i> ) et tribord ( <i>droite</i> ) pour un fond de <b>sable fin</b> (site 2). . . . .	122
4.11	Ajustements pour les modèles Oliver, Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion ( <i>milieu</i> ) et du paramètre de forme $\nu_I$ bâbord ( <i>gauche</i> ) et tribord ( <i>droite</i> ) pour un fond de <b>sable grossier</b> (site 4). . . . .	122
4.12	Ajustements pour les modèles Oliver, Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion ( <i>milieu</i> ) et du paramètre de forme $\nu_I$ bâbord et tribord ( <i>gauche</i> ) ( <i>droite</i> ) pour un fond de <b>sable fin</b> (site 5). . . . .	123

4.13	Ajustements pour les modèles Oliver , Hellequin et EDAK sur les estimations de l'indice de rétrodiffusion ( <i>milieu</i> ) et du paramètre de forme $\nu_I$ bâbord ( <i>gauche</i> ) et tribord ( <i>droite</i> ) pour un fond de <b>roches</b> . . . . .	123
5.1	Hyperplan optimal séparant deux classes, marge et vecteurs supports. . . . .	133
5.2	Illustration de la recherche de frontières non-linéaires. Alors que dans l'espace d'entrée, les deux classes sont séparables par une ellipsoïde non-linéaire ( <i>gauche</i> ), dans l'espace de recherche projeté, on peut trouver une solution en utilisant un hyperplan linéaire ( <i>droite</i> ). . . . .	137
5.3	Exemple d'une image rectiligne multicouche : ( <i>gauche</i> ) indice de rétrodiffusion (dB), ( <i>milieu</i> ) angles d'incidence (degrés) et ( <i>droite</i> ) nombre de moyennages. . . . .	143
5.4	Mosaïque sonar (résolution du pixel 2.5 mètres) des données EM1000 enregistrées lors de la campagne d'acquisition <i>Canadou</i> dans la Baie de Douarnez. Les cadres de couleurs constituent les sites d'apprentissage définis par un expert géologue. . . . .	144
5.5	Evolution angulaire des paramètres d'apprentissage de la loi $\mathcal{K}$ : ( <i>gauche</i> ) moyenne de l'intensité rétrodiffusée (exprimée en dB) et ( <i>droite</i> ) paramètre de forme. . . . .	146
5.6	(Haut gauche) Image de l'indice de rétrodiffusion, images segmentées selon le maximum de vraisemblance de la loi (haut droit) $\Gamma$ angulaire, (bas gauche) de la loi $\mathcal{K}$ et (bas droit) $\mathcal{K}$ angulaire. . . . .	147
5.7	(Haut gauche) Image de l'indice de rétrodiffusion, images segmentées selon le maximum de vraisemblance de la loi (haut droit) $\Gamma$ angulaire, (bas gauche) de la loi $\mathcal{K}$ et (bas droit) $\mathcal{K}$ angulaire. . . . .	148
5.8	Comparaison de résultats de segmentation ( <i>gauche</i> ) Maximum de vraisemblance de la loi $\mathcal{K}$ et ( <i>droite</i> ) SVM. . . . .	151
5.9	Résultat de segmentation de l'ensemble de la zone d'étude. . . . .	151
5.10	Segmentation markovienne basée sur un terme de rappel aux données modélisé par ( <i>gauche</i> ) la loi $\mathcal{K}$ angulaire et ( <i>droite</i> ) l'algorithme SVM probabilisé. . . . .	153
5.11	Segmentation markovienne basée sur un terme de rappel aux données modélisé par ( <i>gauche</i> ) la loi $\mathcal{K}$ angulaire et ( <i>droite</i> ) l'algorithme SVM probabilisé. . . . .	153
A.1	Extrait d'une image du sondeur EM1000 ( <i>gauche</i> , 1 pixel = 0.15 m.) et indice de rétrodiffusion moyen mesuré ( <i>droite</i> ) en fonction de l'angle d'incidence. . . . .	159
A.2	Ajustement sur un modèle simple de $BS$ ( <i>gauche</i> ) et ajustement sur le modèle d'antenne ( <i>droite</i> ). . . . .	161
A.3	( <i>Gauche</i> ) Image corrigée des artefacts ; ( <i>droite</i> ) réflectivité extraite de l'image corrigée (rouge) . . . . .	161
A.4	( <i>Haut gauche</i> ) Comparaison de l'estimation du modèle simple de rétrodiffusion sur 4 profils de nature sédimentaire identique. ( <i>Haut droit</i> ) Évolution du paramètre de gain d'antenne en fonction de l'angle des centres théoriques de faisceaux sur 4 profils d'une zone homogène de sable fin. ( <i>Bas gauche</i> ) Idem pour l'estimation du centre des faisceaux. ( <i>Bas droit</i> ) Idem pour l'estimation de l'ouverture des faisceaux. . . . .	162
A.5	( <i>Gauche</i> ) diagrammes de directivités obtenus pour deux passes de la zone homogène ; les deux courbes sont décalées de 10 dB. ( <i>Droite</i> ) représentations des deux estimateurs de gains. . . . .	164

A.6 . . . . .	165
C.1 ( <i>Haut</i> ) Rade de Brest et ses deux sites d'études. ( <i>Bas</i> ) Baie de Douarnenez et positions des quatre sites d'études. La mosaïque acoustique, présentée avec l'aimable autorisation de C. Augris (DRO/GM), est en cours de publication. . . . .	174
C.2 Schéma d'acquisition d'une zone d'étude. . . . .	175
C.3 <b>Site 1</b> : ( <i>Haut gauche</i> ) mosaïque, ( <i>haut droit</i> ) bathymétrie et ( <i>bas gauche</i> ) prélèvement. . . . .	176
C.4 Zone d'étude 6 : ( <i>haut gauche</i> ) mosaïque et ( <i>haut droit</i> ) bathymétrie. . . . .	177
C.5 <b>Site 2</b> : ( <i>Haut gauche</i> ) mosaïque, ( <i>haut droit</i> ) bathymétrie, ( <i>bas gauche</i> ) prélèvement et ( <i>bas droit</i> ) extrait vidéo. . . . .	178
C.6 <b>Site 5</b> : ( <i>Haut gauche</i> ) mosaïque, ( <i>haut droit</i> ) bathymétrie, ( <i>bas gauche</i> ) prélèvement et ( <i>bas droit</i> ) extrait vidéo. . . . .	178
C.7 Images sonar rectilignes du <b>site 2</b> . Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau. . . . .	179
C.8 Images sonar rectilignes du <b>site 5</b> . Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau. . . . .	180
C.9 <b>Site 3</b> : ( <i>Haut gauche</i> ) mosaïque, ( <i>haut droit</i> ) bathymétrie, ( <i>bas gauche</i> ) prélèvement et ( <i>bas droit</i> ) extrait vidéo. . . . .	181
C.10 Images sonar rectilignes du <b>site 3</b> . Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau. . . . .	182
C.11 <b>Site 4</b> : ( <i>Haut gauche</i> ) mosaïque, ( <i>haut droit</i> ) bathymétrie, ( <i>bas gauche</i> ) prélèvement et ( <i>bas droit</i> ) extrait vidéo. . . . .	183
C.12 Images sonar rectilignes du <b>site 4</b> . Les 7 profils d'azimuts divers sont représentés (Fig. C.2 pour la correspondance des numéros de profils). Pour chaque profil, l'image de droite correspond aux données du sonar latéral et l'image de gauche à celles du sondeur multifaisceau. . . . .	184

# Liste des tableaux

1.1	Classification granulométrique de Sleath ([Sle 84]). . . . .	11
1.2	Paramètres décrivant un fond marin dans le modèle de Jackson. La variable $\delta$ est liée à l'atténuation $\beta$ dans le sédiment (en dB/ $\lambda$ ) par $\beta = \frac{40\pi\delta}{\ln(10)}$ . . . . .	26
1.3	Paramètres d'entrée du modèle de Jackson ([Apl 94]) . . . . .	27
4.1	Pourcentage d'acceptation sur l'ensemble de la fauchée pour un ensemble de fonds insonifiés par le sondeur multifaisceau EM1000. . . . .	102
4.2	Pourcentage d'acceptation sur l'ensemble de la fauchée pour un ensemble de fonds insonifiés par le sonar latéral DF1000. . . . .	105
4.3	Résultats de l'ajustement sur l'indice de rétrodiffusion $BS$ pour le modèle Hellequin (les paramètres A et B sont exprimés en dB). . . . .	121
4.4	Résultats de l'ajustement sur l'indice de rétrodiffusion $BS$ pour le modèle EDAK (les paramètres A et B sont exprimés en dB). . . . .	121
4.5	Résultats de l'ajustement sur le paramètre de forme $\nu_I$ pour le modèle de Oliver.124	
4.6	Résultats de l'ajustement sur le paramètre de forme $\nu_I$ pour le modèle Hellequin.124	
4.7	Résultats de l'ajustement sur le paramètre de forme $\nu_I$ pour le modèle EDAK. 125	
B.1	Méthodes d'estimation du paramètre de forme de la loi $\mathcal{K}$ (s désigne un nombre non entier pour la méthode Y ([Isk 99]), $\langle . \rangle$ désigne la mesure empirique (i.e : $1/N \cdot \sum_{i=1}^N$ ) et $\Gamma$ , $\psi^{(0)}$ , $\psi^{(1)}$ sont respectivement les fonctions Gamma, Digamma et Trigamma). . . . .	171



## **An Analysis of energetical and statistical features of sonar signals for the characterization of seabeds.**

Sonar systems own the attractive ability to simultaneously provide a bathymetric map and a sonar image of large insonified seabed areas. Recorded data information, the backscattered energy is well known as an essential clue about the seabed nature and roughness. This PhD thesis lie within a seafloor characterization project using acoustical methods. The objectives are the data exploitation of two sonar systems (a multibeam echosounder and sidescan sonar) ; both operate at a high frequency ( $\sim 100$  kHz) but their survey geometry is different.

Sonar images are first analyzed and reveal artefacts due to geometry of the sonar system and array patterns, leading to difficulties in their geological interpretation. In the context of the sediment discrimination, a previous study is necessary before any feature analysis. The available sonar systems is then studied in detail to elaborate an adapted process of data correction and permit quantitative use of backscattered intensity. A new postprocessing correction method is proposed for signals recorded by the sidescan sonar, based on the reconstruction of the survey geometry.

At the conclusion of this correction stage, the study concerns two energetical and statistical features extracted from backscattered intensity. The angular backscattering strength is shown as the simplest and the most efficient feature for the seabed discrimination but its single use is not optimal.

Textures presence in sonar images allow to complete the study by a feature based on the statistical distributions shape and revealing roughness characteristics. Different statistical behaviors are highlighted depending either on seafloor properties or on the sonar system geometry. A new model is proposed to predict these behaviors.

Finally, the simultaneous use of these features improve segmentation results. In this context, the use of the "Support Vector Machines" is proposed and shows some relevant and evolutive possibilities ; the new algorithm allows to introduce various features (energetical, statistical, textural, bathymetric) and to combine with a markovian model of the image.

**Keywords** : seafloor geoacoustical and geostatistical Model, Backscattering Strength, Inverse Problem. Signal Processing, Spatial Statistics. Image segmentation, Markov Random Field, Support Vector Machines.

## Analyse de descripteurs énergétiques et statistiques de signaux sonar pour la caractérisation des fonds marins

Les systèmes sonar offrent la possibilité d'obtenir simultanément une carte bathymétrique et une image sonar de vastes surfaces insonifiées. L'information contenue dans les images sonar, l'énergie rétrodiffusée par l'interface sédimentaire, s'avère être un indice essentiel pour caractériser la nature et le relief du fond insonifié. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans un projet de caractérisation sédimentaire des fonds marins par méthodes acoustiques. Les objectifs résident dans l'extraction et l'interprétation des données de deux systèmes sonar (un sondeur multifaisceau et un sonar latéral) de même gamme de fréquence ( $\sim 100$  kHz) mais de géométrie différente.

Dans un premier temps, les images sonar sont analysées et révèlent des artefacts dus à la géométrie du système d'acquisition et aux directivités d'antenne menant à des difficultés d'interprétation géologique. Dans le contexte de reconnaissance de fond, une étude préalable s'avère nécessaire avant toute extraction de descripteurs. Les systèmes sonar disponibles ont été analysés en détail pour élaborer un processus adapté de correction des données et autoriser l'exploitation de l'intensité rétrodiffusée. Nous proposons un algorithme de correction des données du sonar latéral en post-traitement, basé sur la reconstruction de la géométrie d'acquisition.

A l'issue de cette étape de correction, l'étude a porté sur deux descripteurs énergétiques et statistiques des signaux rétrodiffusés. L'indice angulaire de rétrodiffusion se révèle le descripteur le plus simple et le plus efficace pour la discrimination des fonds marins mais ses possibilités sont incomplètes.

La présence de textures dans les images autorise de compléter l'étude par un descripteur basé sur la forme des distributions statistiques et révélateur de la rugosité. Différents comportements statistiques ont été mis en évidence en fonction du type de fond et des propriétés du système d'acquisition. Un nouveau modèle est proposé pour prédire ces comportements ; il est validé sur des données expérimentales de types de fonds variés.

Enfin, l'utilisation conjointe de ces deux descripteurs améliore les résultats de segmentation des images sonar. Dans ce contexte, l'utilisation des "Support Vector Machines" est proposée et s'est révélée pertinente et évolutive ; le nouvel algorithme permet l'introduction de descripteurs variés (énergie, statistique, bathymétrie, texture) et la combinaison avec une modélisation markovienne de l'image.

**Mot-clés :** Modélisation géoacoustique et géostatistique des fonds marins, Rétrodiffusion, Problèmes inverses. Traitement du signal, Statistiques spatiales. Segmentations d'images sonar, Champs de Markov, méthodes SVM.