

VOINESON Guillaume
Promo 2008,
Option hydrographie-cartographie

Rapport de Projet de fin d'étude

**Caractérisation du sédiment de surface par sondeur acoustique S-ALTUS.
- Etude des potentialités du S-ALTUS. -**

PFE effectué au Laboratoire DYNECO/PHYSED du centre IFREMER BREST,
du 1^{er} Avril 2008 au 22 Août 2008.



Encadrants : Mr Romaric VERNEY et Mr Hervé JESTIN.

- REMERCIEMENTS -

Je tiens à remercier toute l'équipe du laboratoire d'hydrodynamique sédimentaire DYNECO/PHYSED pour leur accueil au sein de leur établissement. En particulier, je remercie Messieurs Romaric VERNEY, Hervé JESTIN, Philippe CANN, Philippe BASSOULLET et Youen KERVELLA, pour l'encadrement et les conditions de travail qu'ils m'ont fournis tout au long de ce stage.

Un grand merci également aux acousticiens Xavier LURTON et Yves LE GALL, qui m'ont apporté une aide précieuse et motivante au bon moment.

Enfin, je remercie chaleureusement mes camarades Marion, Laurent et Mathieu qui ont partagé avec moi ce séjour à l'IFREMER de Brest et ses moments de détente.

Sommaire

INTRODUCTION	5
I. Le contexte scientifique / État de l'art	7
I.1 Généralités	
I.2 Le système RoxAnn	
I.3 Le système QTC-View	
I.4 Remarques générales	
II. Caractérisation technique de l'altimètre S-ALTUS	10
II.1 Présentation générale	
II.2 Caractéristiques techniques du sondeur	
III. Approche théorique	18
III.1 Théorie de la réflexion et de la rétrodiffusion	
III.2 Discussion sur la validité de la théorie	
IV. Approche empirique du problème	24
IV.1 Le Banc expérimental	
IV.2 La chaîne de traitement	
IV.3 Caractérisation des sédiments utilisés	
V. Capacité de l'ALTUS à détecter des interfaces	32
V.1 La démarche utilisée	
V.2 Les résultats	
VI. Capacité de l'ALTUS à classifier les fonds marins	39
VI.1 Etude préliminaire d'un écho	
VI.2 Principe de l'analyse en composantes principales	
VI.3 Résultats de l'Analyse en composantes principales	
VII. Discussion générale	45
VII.1 Sur l'altimétrie et la détection d'interface	
VII.2 Sur la classification des fonds marins.	
VII.3 Les perspectives d'évolution.	
CONCLUSION GÉNÉRALE	49
RÉFÉRENCES.....	51
ANNEXES	

INTRODUCTION

Comment observer et bien décrire la dynamique complexe d'une zone sédimentaire littorale? En effet, celle-ci dépend non seulement de la bathymétrie et des courants de marée mais aussi de l'action des vagues et surtout des propriétés intrinsèques du sédiment qui conditionnent sa remise en suspension, son transport et son dépôt. La concentration du sol, l'érodabilité du sédiment, la taille des grains ou encore leur vitesse de chute sont autant de paramètres qui visent à caractériser au mieux le comportement général du matériel sédimentaire. Cependant, ces informations nécessitent systématiquement un prélèvement *in situ* et sont donc échantillonnées à une fréquence faible (mensuelle ou bi-mensuelle) qui ne permet malheureusement pas de décrire tous les phénomènes haute fréquence, comme par exemple à échelle tidale.

L'Ifremer, en collaboration avec NKE a développé ces dix dernières années l'altimètre S-ALTUS (pour « ALTImètre à Ultrasons Submersible »), sondeur acoustique autonome dédié au suivi de l'altimétrie du sédiment de surface et donc au contrôle des processus d'érosion-dépôt. Cet instrument permet d'observer de façon quantitative et continue les épisodes d'érosion et de dépôt en corrélation avec les épisodes de tempête ou d'accalmie. En revanche, l'appareil ne fournit actuellement aucun indice sur la nature du sédiment. Malgré tout, l'augmentation rapide des tailles des mémoires embarquées laisse envisager la possibilité d'enregistrer et de stocker l'intégralité de chaque écho. La mise au point d'un algorithme d'analyse et de classification de ces échos permettrait par la suite d'obtenir une information en continu sur la nature voire l'état du sédiment de surface.

Ce Projet de Fin d'Etude (PFE) s'est déroulé au Département Dynamique de l'Environnement Côtier, au sein du laboratoire Physique Hydrodynamique et Sédiment qui met en oeuvre l'instrumentation spécifique (courantomètre, turbidimètre, érodimètre, S-ALTUS...) permettant de réaliser les mesures *in situ* nécessaires à la validation des modèles mathématiques hydrosédimentaires.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les capacités du S-ALTUS à caractériser et différencier le sédiment de surface à partir de la forme et des propriétés du signal acoustique réfléchi.

Ce rapport se compose de sept parties. Il dresse tout d'abord, un rapide aperçu des principales techniques acoustiques utilisées dans le monde industriel. Ensuite, on se replace dans le contexte précis de l'étude avec un descriptif des caractéristiques techniques du S-ALTUS qui ont été mesurées en bassin acoustique. S'en suivra une ébauche d'approche théorique du problème destinée à éclairer l'approche empirique qui suit ainsi que ses résultats. Sont présentés dans un premier temps les résultats sur la capacité à détecter une interface entre deux couches de sédiments voire à en quantifier leur épaisseur, puis celles concernant la possibilité d'identifier la nature du sédiment de surface. Pour conclure, une discussion générale sur l'ensemble de la démarche adoptée et de mes résultats mènera à proposer de nouvelles approches sur le problème étudié.

I. Le contexte scientifique / État de l'art

I.1 Généralités

Plusieurs Systèmes de Acoustiques de Classification Automatique des natures de Fonds (SACLAF) ont été mis au point. Les plus connus et utilisés dans le monde industriel sont les systèmes RoxAnn et QTC-View. Pour autant, aucun ne prétend offrir une description des faciès sédimentaires fiable à 100%. Dans la majorité des cas, les informations fournies sont à recouper avec des prélèvements par benne ou avec des données vidéo *in situ*.

La plupart de ces systèmes sont montés sur des sondeurs d'ouverture angulaire entre 5 et 55° insonifiant ainsi une surface variant de quelques m² à une centaine de m², en fonction de la profondeur.

Le choix de la fréquence d'émission, entre 30kHz et 200kHz, est fondamental car il va déterminer non seulement la résolution, meilleure pour des hautes fréquences, mais aussi le degré de pénétration des ondes acoustiques dans le sédiment, ce qui affecte considérablement la forme de l'écho. A hautes fréquences (200 kHz), la pénétration de l'onde dans le sédiment est de quelques centimètres voire décimètres tandis qu'elle peut atteindre plusieurs mètres à basses fréquences (50 kHz) dans des sédiments meubles comme de la vase (*Ehrhold, 2003*). Certains systèmes utilisent ainsi des sondeurs bi-fréquences permettant ainsi de recroiser les informations des deux signaux et obtenir plus d'indices sur la nature du sédiment.

En fonction de la directivité du transducteur, le signal émis se propage en première approximation sous forme d'un cône plus ou moins étroit. Les ondes au centre du cône retournent le plus vite au transducteur et sont utilisées pour calculer la profondeur. Les ondes aux extrémités du cône reviennent avec moins d'énergie mais renferment cependant des informations utiles sur l'aspect et les propriétés acoustiques du sédiment de surface. En effet, la différenciation des fonds est théoriquement plus aisée pour des angles d'incidence supérieurs à 20° comme le montre les différences de variation de réflectivité pour différents sédiments (Fig I.1). En particulier, un sédiment rugueux comme le gravier ou la roche rétrodiffuse dans toute les directions donc également pour des fortes incidences.

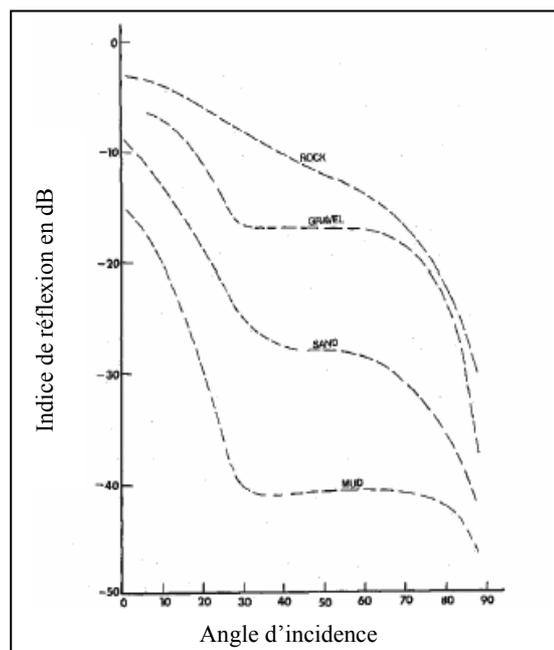


Fig I.1 Influence de l'angle d'incidence sur l'indice de réflexion en dB sur différents fonds de référence.

L'intensité et la forme de l'écho va alors être interprétée en terme de dureté (coefficient de réflexion acoustique) et de rugosité (coefficient de diffusion). Ainsi, un fond dur et lisse produira un écho fort et bref tandis qu'un fond meuble et rugueux produira un écho faible et étalé dans le temps.

Pour limiter le bruit acoustique engendré par les mouvements du capteur et de la variabilité naturelle des échos, on moyenne généralement 5 à 10 pings avant d'effectuer l'analyse du signal. Les données ponctuelles sont ensuite interpolées spatialement par krigeage (méthode d'analyse statistique qui minimise l'erreur entre la variance spatiale des valeurs interpolées et celle estimée par les mesures) ou simplement par une méthode de moyenne pondérée par l'inverse de la distance.

En fonction de la complexité du fond (figures sédimentaires, couverture biologique) et de la présence de réflecteurs en surface ou dans le sédiment, les réflexions peuvent être très variables, ce qui rend l'utilisation des systèmes de classification parfois très ambiguë. Dès lors, il est important de définir un protocole de calibration strict et propre à chaque zone. L'utilisation de ses systèmes de classification n'exclue de ce fait pas l'échantillonnage systématique de chaque type de fond identifié. Bien souvent, deux prélèvements par type de fond reconnu sont effectués afin d'augmenter le niveau de confiance de la mesure.

I.2 Le système RoxAnn

Le Système RoxAnn mis au point par la société anglaise « Marine Micro System Ltd, Aberdeen », est probablement le système de classification le plus distribué (plus de 700 unités) et le plus employé depuis 13 ans.

Sa classification des fonds repose sur la mesure de deux indices : E1 défini comme la rugosité et E2 défini comme la dureté du sédiment de surface (Kvitek, 1999).

- E1 correspond à l'intégrale de la terminaison du premier écho dont le pic sert à mesurer la profondeur (Fig I.2a).
- E2 correspond quant à lui à l'intégrale du premier écho multiple résultant de la réflexion double des ondes sur le fond et une fois sur la surface (Fig I.2a). Étant beaucoup plus faible que E1, cet écho doit être fortement amplifié.

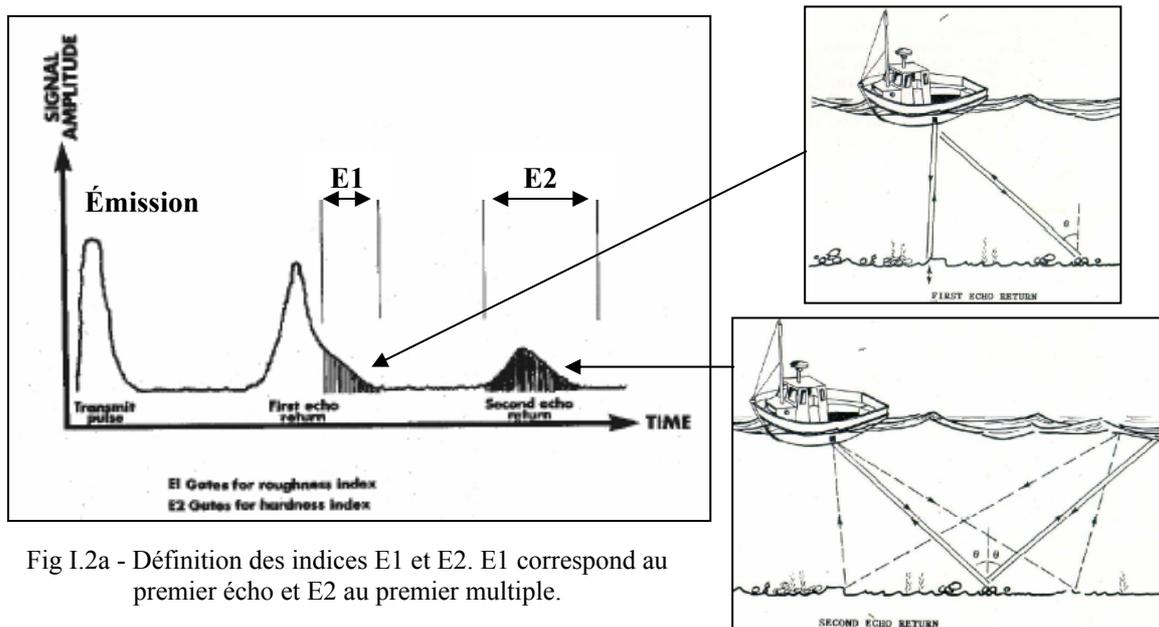


Fig I.2a - Définition des indices E1 et E2. E1 correspond au premier écho et E2 au premier multiple.

Les deux variables sont enfin combinées dans un diagramme cartésien XY afin d'identifier les différents types de fonds rencontrés (Fig I.2b). Il existe en effet une relation entre l'intensité des indices et le type de fond : De fait, un fond vaseux, lisse et meuble, sera caractérisé par de faibles valeurs de E1 et E2, à l'inverse d'un fond rocheux plutôt rugueux et dur.

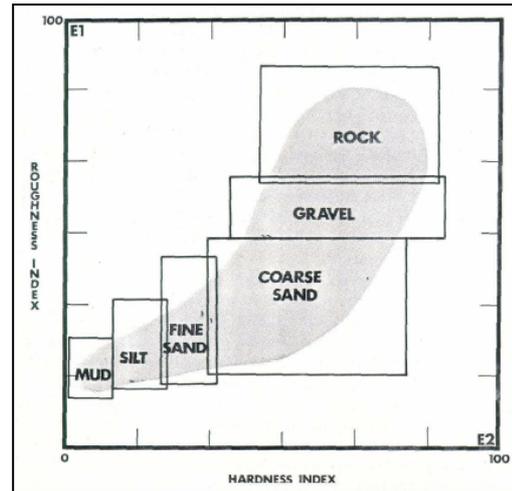


Fig I.2b - Relation de principe entre la rugosité E1 et la dureté E2.

I.3 Le système QTC-View

QTC-View est un système mis au point par la société canadienne Quester Tangent Corporation of Sidney, BC. Contrairement au système RoxAnn, QTC-View néglige les réflexions doubles et ne s'intéresse qu'au premier écho. Après avoir moyenné cinq signaux consécutifs afin de minimiser le bruit généré par le mouvement du bateau et la variabilité naturelle des échos, il calcule 166 paramètres à partir de la forme et du spectre fréquentiel de l'écho moyenné (Elligsten K. E. et al., 2002). Pour des raisons commerciales, ces 166 paramètres sont inconnus de l'utilisateur.

Au moyen d'une analyse en composantes principales (ACP ou *Principal Component Analysis*), seules les trois combinaisons de paramètres les plus représentatives (i.e. qui maximise la variance des valeurs) seront conservées. Ces trois facteurs appelés Q1, Q2 et Q3 vont permettre ainsi de représenter l'ensemble des échos enregistrés dans un espace 3D et faciliter le regroupement en différentes classes. Ce regroupement est généralement automatisé à l'aide d'une méthode statistique par *clusters* qui minimise la variance à l'intérieure d'une même classe. Afin de les associer à un type de fond, les différentes classes ainsi définies sont identifiées à des classes de référence prédéfinies lors de la calibration.

I.4 Remarques générales

RoxAnn et QTC-View donnent des résultats satisfaisants et en accord avec nos objectifs. Reprendre la même démarche d'analyse et de déduction pourrait donc nous aider dans notre étude. Pourtant, il faut garder à l'esprit que ces méthodes ont été validées uniquement pour des signaux ne dépassant pas 500 kHz et pour des surfaces insonifiées de l'ordre de la centaine de m² tandis que le S-ALTUS fonctionne à 2MHz et n'insonifie guère plus de 50cm². De plus la forte directivité de l'ALTUS (voir chap. II.2.2) induit une importante variation du niveau d'énergie en fonction de l'angle d'incidence et donc du microrelief, ce qui rend difficile l'exploitation des quantités d'énergie E1 et E2 utilisées par RoxAnn. Ces variations du niveau d'énergie sont d'autant plus problématiques qu'aucun moyennage spatial des échos ne peut être effectué. Les paramètres de RoxAnn étant tributaires du faciès local insonifié, l'approche à privilégier sera donc plutôt celle de QTC-View i.e. s'appuyer sur des paramètres descriptifs et intrinsèques du signal.

En revanche le S-ALTUS offre l'avantage de ne pas être soumis à des mouvements de plateforme et de garder une incidence fixe (tout au moins tant que le fond reste invariant...)

II. Caractérisation technique de l'altimètre S-ALTUS

Avant toute démarche expérimentale, il convient de bien connaître et caractériser le sondeur utilisé.

II.1 Présentation générale

Le S-ALTUS est un ALTimètre à Ultrasons Submersible développé par NKE-MICREL en partenariat avec l'IFREMER (voir Annexes). Son objectif principal est la mesure quantitative de l'érosion-dépôt sur estran et dans les domaines littoraux fortement soumis à l'action des vagues et des courants de marée.

L'ALTUS est composé de deux parties :

- un transducteur acoustique orienté vers le bas et relié par un câble au module principal.
- Un module principal contenant un capteur de pression, les batteries et l'électronique de contrôle.



Fig II.1 - Le S-ALTUS sur son support

Le transducteur acoustique est monté sur un support solidement ancré au sol et ne perturbant pas l'écoulement de l'eau au dessus de la zone ciblée (Fig II.1). La mesure régulière de la distance transducteur-fond fournit alors une connaissance précise des épaisseurs de sédiments localement déposées ou érodées (Bassoullet Ph., 2000).

En extrapolant, on peut dès lors estimer les quantités déplacées sur la zone et identifier un comportement sédimentaire (Deloffre J., 2007).

Le capteur de pression, fiché au sol près du châssis, nous renseigne sur la hauteur de la colonne d'eau et sur l'amplitude des vagues au dessus de la cible ce qui permet par la suite de remonter à la tension de cisaillement au niveau du fond (Verney R. et al., 2007).

Grâce à cet appareil totalement autonome, le laboratoire dispose ainsi d'une observation en continu et sur de longues durées du comportement sédimentaire local. Ce dernier peut alors être mis en corrélation avec la hauteur de vague sur zone et également avec la courantométrie locale liées à la marée.

II.2 Caractéristiques techniques du sondeur

II.2.1 Caractéristiques annoncées par le constructeur

- température d'utilisation : -5°C à +35°C
- transducteur acoustique :

$$f = 2\text{MHz et donc } \lambda = 750 \mu\text{m}$$

Tableau II.a

Élévation min/max (mm)	Précision (cm)	Résolution (mm)	Ouverture
200 - 700	+/-2	0,41	3,6° à -3dB

- mode de détection

Par souci d'autonomie et de coût, le signal retour n'est pas stocké mais on enregistre 4 temps de retour caractéristiques. Chacun d'eux représente le dépassement d'une valeur seuil fixée au préalable par l'utilisateur (Fig II.2.1).

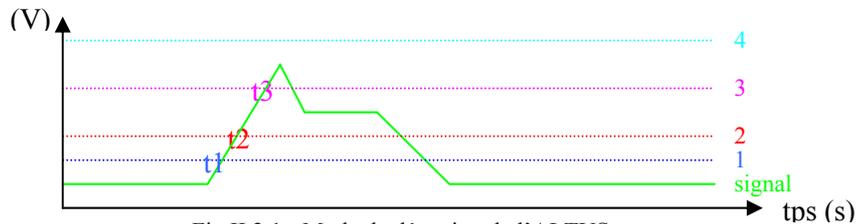


Fig II.2.1 - Mode de détection de l'ALTUS

II.2.2 Caractéristiques mesurées en laboratoire

Au vu des nouvelles capacités de mémoire embarquée, une amélioration de l'ALTUS pourrait être d'acquérir l'intégralité du signal retour et d'effectuer un traitement sur l'enveloppe de celui-ci, soit en automatique, soit en post-traitement.

Une analyse de l'écho demande avant tout une connaissance la plus fine possible du signal émis dans l'eau et donc l'utilisation d'un bassin acoustique avec un hydrophone adéquat.

En effet, le signal recueilli par l'oscilloscope, branché au niveau du transducteur au moment de l'émission, est une superposition du signal électrique généré par la carte électronique et du courant électrique rétro-induit par la résonance du transducteur. Celui-ci diffère de manière significative avec non seulement le signal délivré par la carte électronique seule mais surtout avec le signal réellement transmis sous l'eau. La figure II.2.2a fournit une comparaison qualitative de ces 3 signaux différents pourtant issus du même Altus n°18004 :

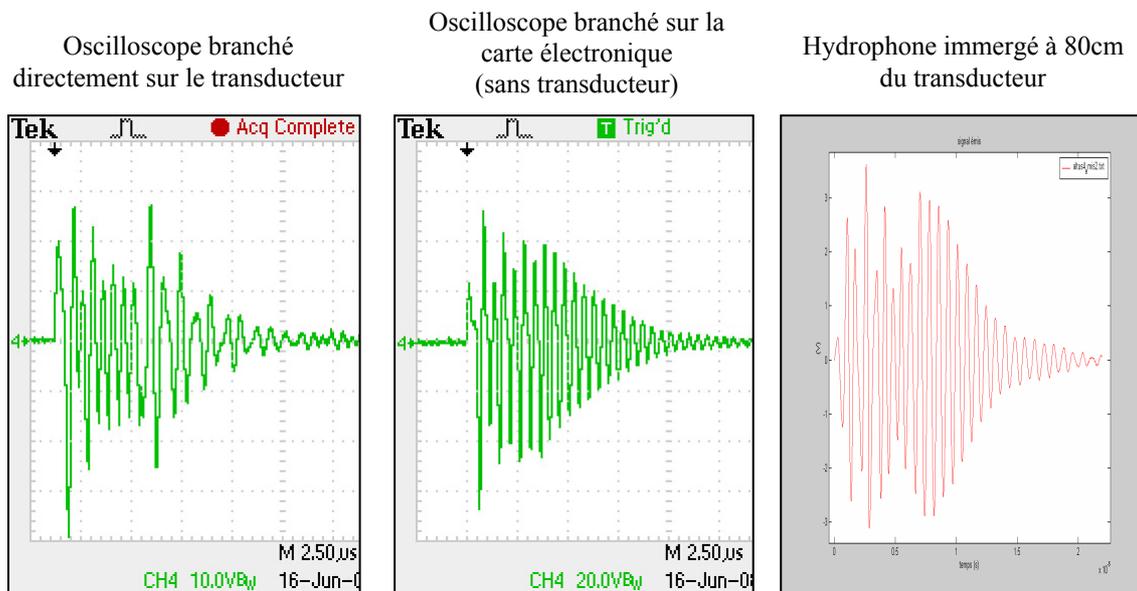


Fig II.2.2a - Comparaison de 3 signaux issus d'un même ALTUS. Seul celui de droite correspond au signal réellement transmis dans l'eau.

Avec l'aide de l'acousticien Mr Yves LE GALL, nous avons pu utiliser le bassin acoustique situé au département Acoustique et Sismique de l'Ifremer (Fig II.2.2b).

Ce bassin de dimensions 4m de long, 2,5m de large et 2m de profondeur, ainsi que son banc de mesure permettent la caractérisation en fréquence et niveau d'énergie du signal émis par un sondeur tout comme la mesure de sa directivité.

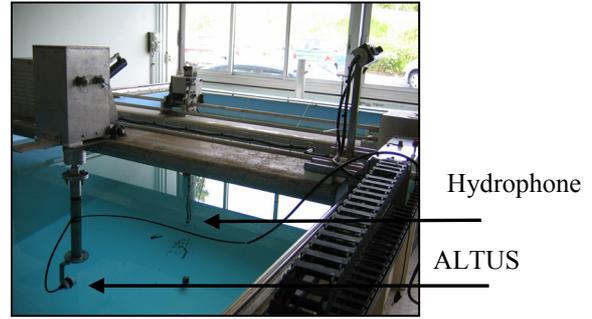


Fig II.2.2b -Le bassin acoustique du laboratoire

▪ **Forme et fréquence du signal émis**

La fréquence des sondeurs testés habituellement est comprise entre 7kHz et 1MHz. Le laboratoire ne disposait donc pas d'hydrophones travaillant dans la plage de fréquence de l'ALTUS (i.e. autour de 2MHz).

Nous avons tout de même utilisé l'hydrophone TC4035 de chez RESON (Fig II.2.2c et Annexes), pouvant être utilisé à des fréquences approchant 1MHz. Ne connaissant pas le gain de l'hydrophone à la fréquence donnée, nous ne disposerons que de la forme et de la fréquence du signal sans connaître exactement le niveau d'énergie émis (Fig II.2.2d et Fig II.2.2e).



Fig II.2.2c -Hydrophone 1MHz

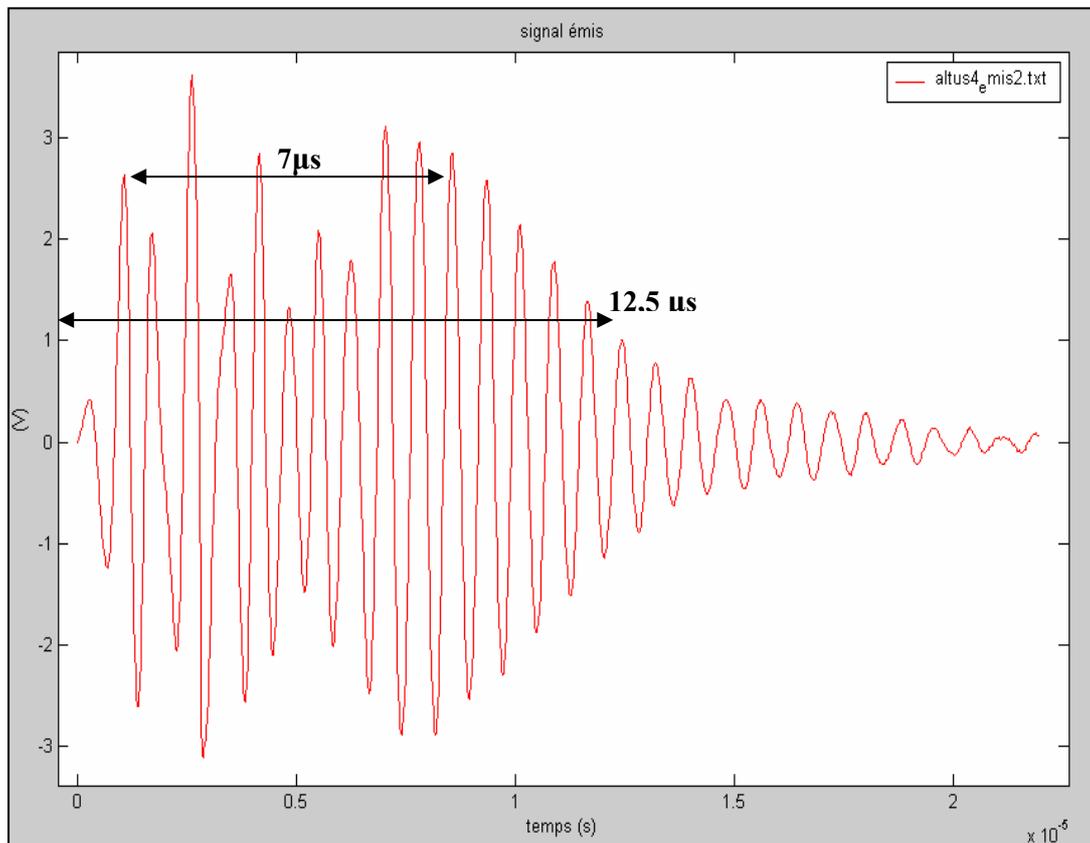


Fig II.2.2d - Signal émis par l'ALTUS 4 et enregistré par hydrophone immergé à 80 cm du transducteur

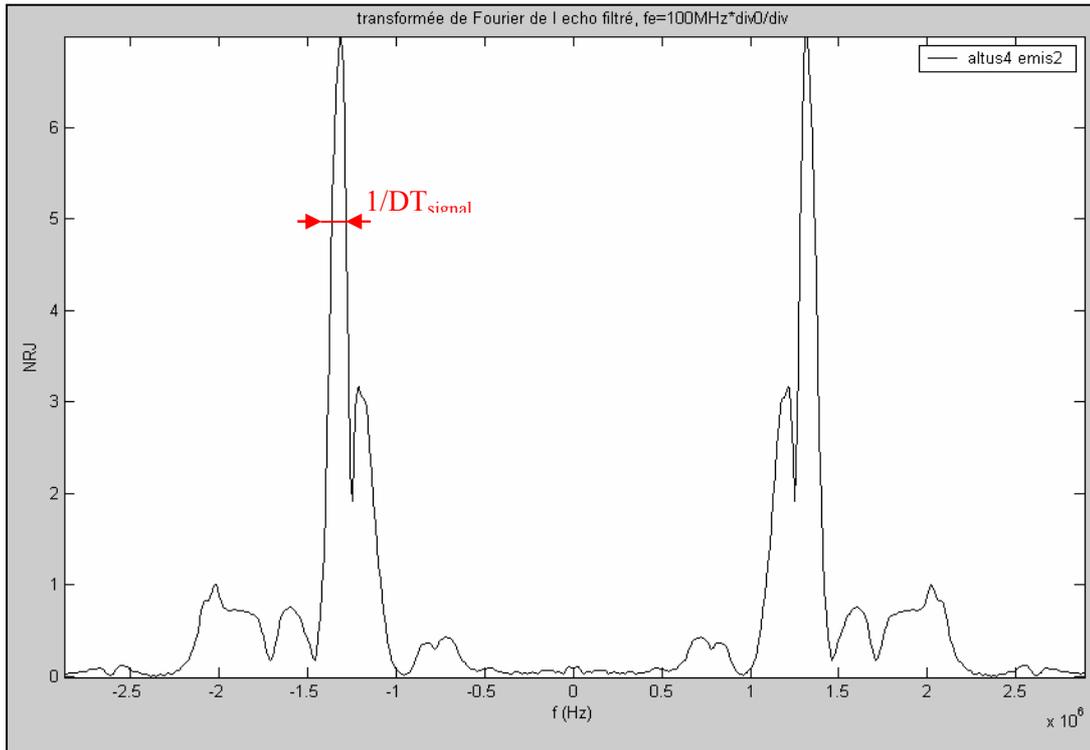


Fig II.2.2e - Transformée de Fourier Rapide (FFT) du signal émis. L'énergie est principalement centrée sur la fréquence 1,3MHz au lieu des 2MHz annoncés

Commentaire – Une analyse rapide du signal nous fournit deux informations :

- la durée du signal est de l'ordre de $7 \mu\text{s}$ pour sa partie principale. Puis, on observe une longue « queue » résultant de l'amortissement progressif des oscillations du transducteur. L'ensemble du signal dure environ $12,5 \mu\text{s}$ comme le confirme la largeur à -3dB du pic à 1,3MHz.

On remarque de plus que l'aspect global du signal émis est assez peu régulier, en partie à cause du nombre réduit de période (< 15 périodes).

- La fréquence du signal : Contrairement à la valeur annoncée par le constructeur, le signal transmis dans l'eau affiche une fréquence plus proche de 1,31MHz ($\sim 1,3\text{MHz}$) que des 2MHz annoncés. Le fait est que le signal issu de la carte électronique est confirmé à 2MHz mais le transducteur résonne à une fréquence différente. En effet, le signal d'émission est tellement bref ($7\mu\text{s}$ contre quelques ms pour les sondeurs classiques) qu'il se rapproche quasiment d'un Dirac et fait résonner le transducteur à sa fréquence propre (à priori 1,3MHz)

▪ **La directivité**

La méconnaissance des niveaux d'énergie ne nous gêne pas non plus pour mesurer et tracer en relatif le diagramme de directivité (Fig II.2.2f) puis déterminer l'ouverture angulaire réelle du sondeur.

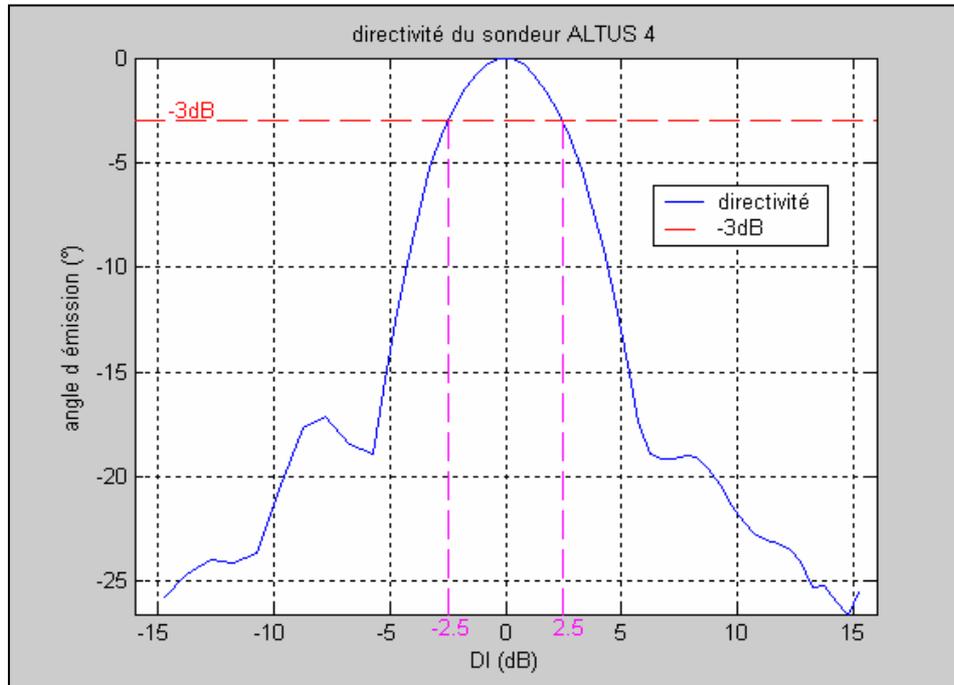


Fig II.2.2f - Diagramme de directivité en dB. La limite à -3dB détermine une ouverture angulaire de 5°.

Commentaire - La lecture du diagramme nous donne l'ouverture angulaire à -3dB à savoir le cône dans lequel l'atténuation du signal est inférieure à -3dB. On lit une ouverture angulaire $2\theta_{-3dB} = 5^\circ$ qui ne correspond pas aux $3,6^\circ$ annoncés par le constructeur.

Remarque - Ce biais peut être imputé à l'imprécision sur la fréquence d'émission. En effet, pour un transducteur à géométrie circulaire et pour une longueur d'onde petite devant le diamètre on a la formule suivante (Lurton X., 2005b) :

$$2\theta_{-3dB} = 58,9 * \lambda / D = 58,9 * c / (f * D) \text{ d'où } 2\theta_{-3dB\text{théorie}} / 2\theta_{-3dB\text{mesure}} = f_{\text{mesure}} / f_{\text{théorie}}$$

Et en effet on calcule $3,6/5 = 0,72 \sim 0,65 = 1,3/2$

Par la suite on peut estimer le diamètre du transducteur (non renseigné dans la brochure NKE) : $D = 58,9 * \lambda / (2\theta_{-3dB}) = 1,36 \text{ cm}$ avec les valeurs mesurées.
 $= 1,23 \text{ cm}$ avec les valeurs du constructeur.

▪ **Résumé des caractéristiques mesurées de l'Altus**

Tableau II.b

Durée d'impulsion	fréquence	Ouverture angulaire	Diamètre
7 à 12,5 μs	1,3 MHz	5° à -3dB	1,36 cm

II.2.3 Comparaisons des signaux entre plusieurs ALTUS

▪ Comparaison des signaux générés par la carte électronique

Devant l'incertitude autour des caractéristiques annoncées par le constructeur, nous avons décidé de comparer les signaux de 3 ALTUS à savoir les numéros 4,1 et 14.

Nous avons abouti à plusieurs conclusions :

- les signaux émis sont différents entre chaque instrument
- Cette différence ne vient pas des transducteurs
- Cette différence est visible en sortie des cartes électroniques.

En effet, on constate rapidement que le signal émis enregistré par l'oscilloscope (branché entre le module et le transducteur) est différent suivant les ALTUS.

On remarque également que le signal enregistré sur un ALTUS reste inchangé malgré une permutation des transducteurs. Dès lors, la différence entre les signaux ne peut venir des transducteurs.

En revanche, si on débranche le transducteur du module et qu'on enregistre alors le signal tel qu'il est généré par la carte électronique, on observe toujours d'importantes différences (Fig II.2.3a) :

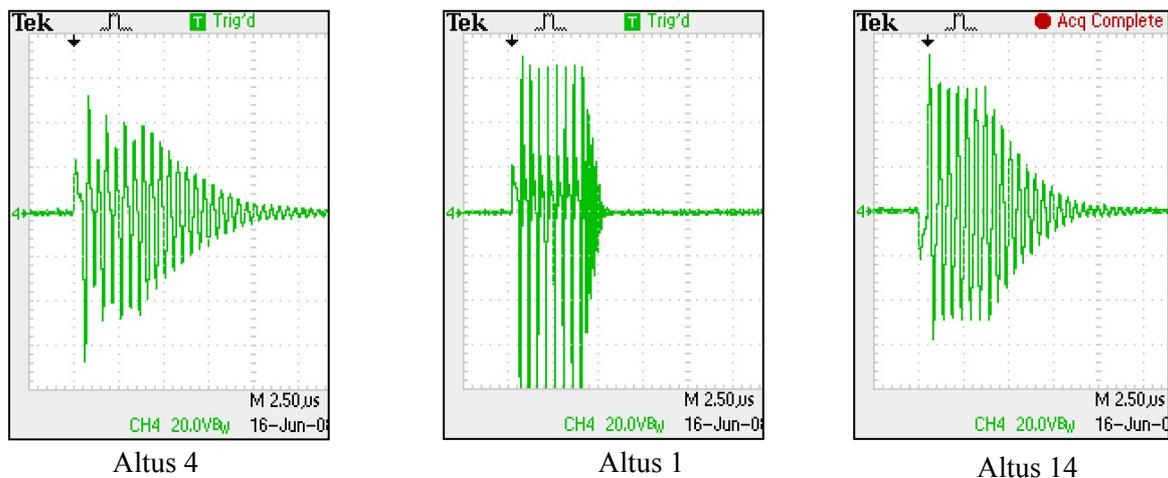


Fig II.2.3a - Enregistrement des signaux générés par la carte électronique de 3 ALTUS différents. On remarque d'importantes différences et de fortes dissymétries dans la forme des signaux.

Commentaire – Il apparaît donc que d'importantes différences s'observent dès la génération des signaux par la carte électronique des ALTUS. Ces différences se retrouvent dans les signaux transmis dans l'eau et peuvent gêner considérablement l'interprétation de résultats issus de deux ALTUS différents.

De plus, on constate également d'importantes dissymétries dans la forme des signaux, comme celui de l'Altus 1 qui, malgré un contour assez net présente une amplitude déséquilibrée vers les valeurs négatives. Enfin, les signaux du 4 et du 14 présente une longue queue due au lent amortissement des oscillations et une amplitude pas exactement régulière (particulièrement le 4).

Malgré tout, dans tous les cas, on retrouve bien un signal forcé sur 7 us suivi d'une « queue d'amortissement ».

Enfin, bien que le signal de l'ALTUS 1 semblait le plus « régulier », ce dernier étant indisponible pendant la suite du stage, c'est avec l'ALTUS 4 que la suite des travaux fut essentiellement effectuée. L'ALTUS 1 fut utilisé en parallèle mais il s'avéra par la suite qu'il présentait de moins bons résultats que l'ALTUS 4, notamment sur la détection d'interface.

- **Comparaison des signaux transmis dans l'eau (forme et directivité)**

Les mesures effectuées en bassin acoustique (forme du signal, fréquence et directivité) ont été également réalisées pour l'ALTUS 1. Nous pouvons dès lors comparer ces quelques caractéristiques, leurs différences et similitudes (Fig II.2.3b) :

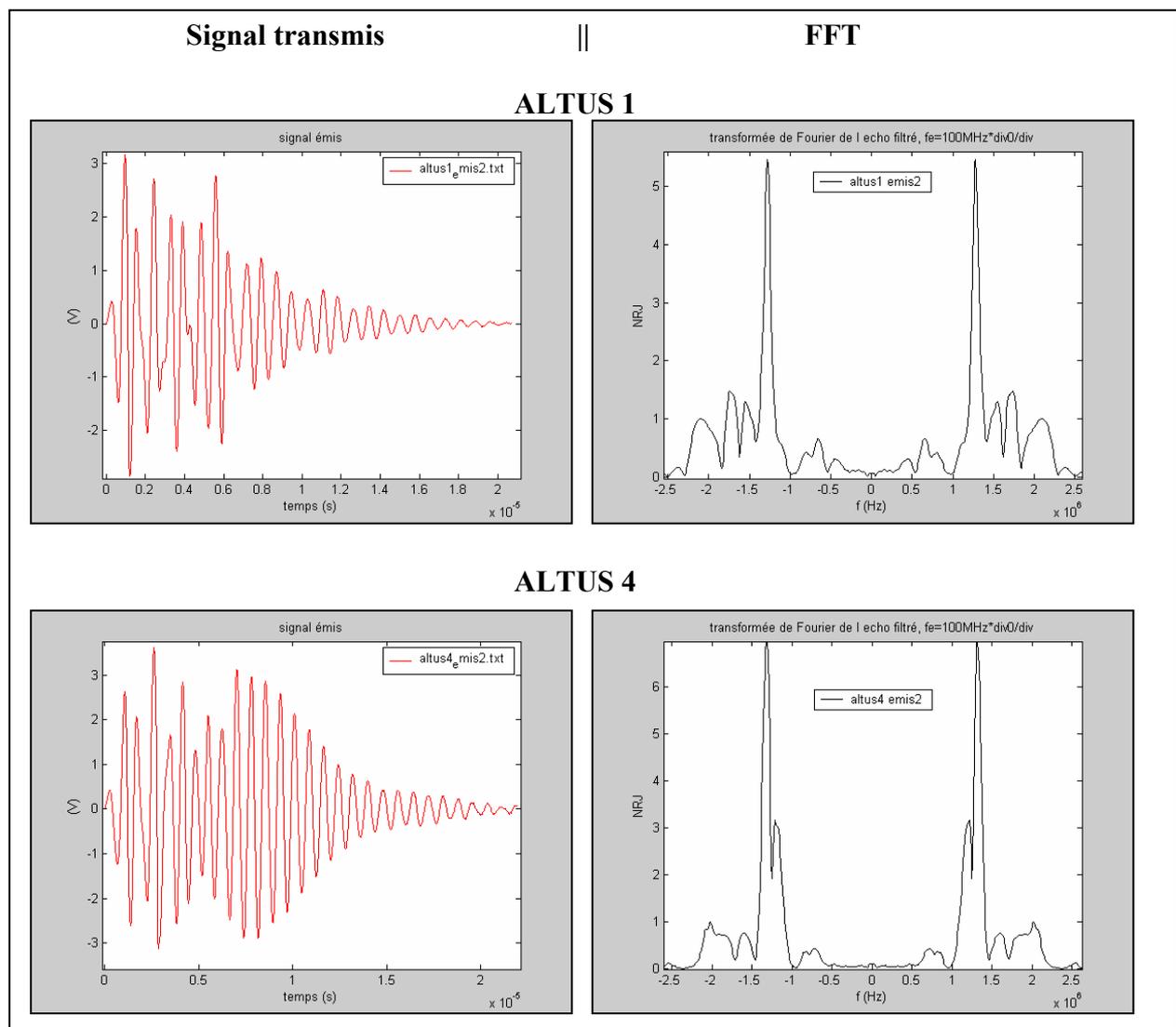


Fig II.2.3b - Comparaison de la forme et de la fréquence des signaux transmis dans l'eau par deux ALTUS différents (ALTUS 1 et 4). Ces données ont été acquises en bassin acoustique.

Commentaire – Comme précédemment, on remarque des différences dans la forme du signal : On retrouve notamment la « queue d'amortissement » plus longue chez l'ALTUS 4 d'où un signal émis un peu plus long dans sa globalité. En revanche le signal de l'ALTUS 1 a perdu sa dissymétrie mais également sa régularité sur l'amplitude.

Concernant la fréquence on mesure un pic à 1,31MHz pour l'ALTUS 4 et 1,28MHz pour l'ALTUS 1, ce qui confirme un signal transmis à la fréquence 1,3MHz.

- comparaison des directivités :

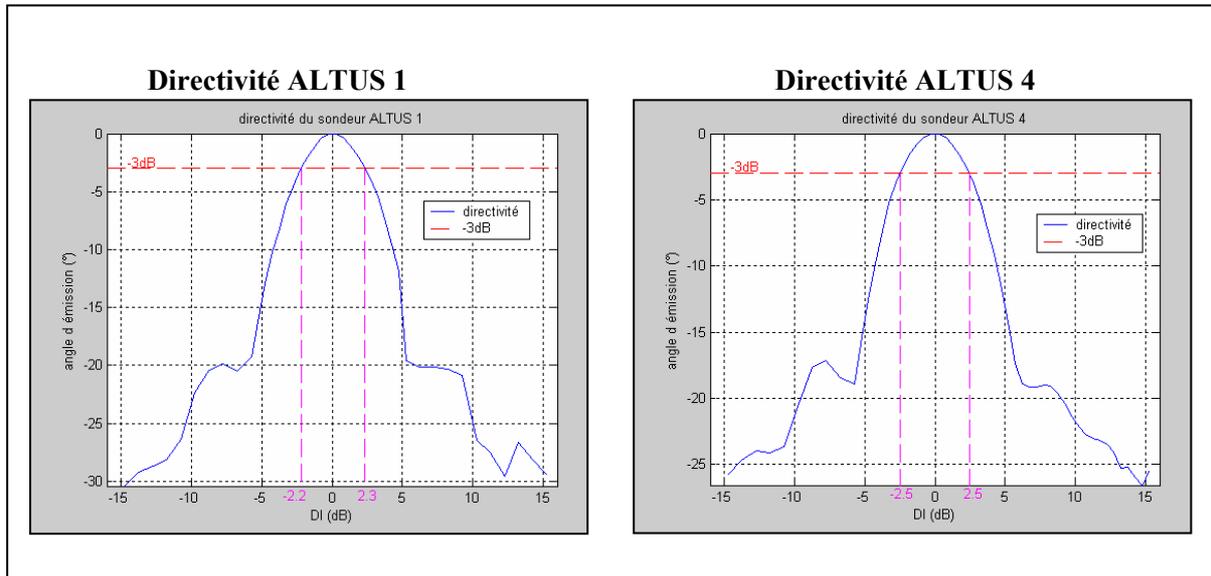


Fig II.2.3c - Comparaison de la directivité de deux ALTUS différents (ALTUS 1 et 4). Ces données ont été acquises en bassin acoustique.

Commentaire – Après affichage des directivités, on lit une ouverture à -3dB de $4,6^\circ$ pour l'ALTUS 1, ce qui avoisine bien les 5° d'ouverture trouvés pour l'ALTUS 4 (Fig II.2.3c). La directivité semble donc être conservée d'un ALTUS à l'autre. En revanche, l'expérience a montré, dans certains cas, que la symétrie circulaire découlant de celle du transducteur, ne semblait pas forcément être vérifiée.

III. Approche théorique

En partant du postulat qu'il existe une relation entre la forme du signal et la nature du sédiment de surface, plusieurs modèles permettent de modéliser différentes allures de signaux en fonction des types de sédiments et du micro relief.

III.1 Théorie de la réflexion et de la rétrodiffusion

III.1.1 L'équation du sonar

Chaque type de fond possède son indice de réflexivité propre ou indice de cible (IC) qui influence le niveau d'énergie reçu par le transducteur selon l'équation du sonar en dB (*Lurton X., 2005a*) :

$$\text{Énergie reçue} \rightarrow ER = NE - 2PT + \underbrace{IF + 10 \log A}_{IC}$$

Niveau émis
Perte par absorption

L'indice de cible IC se compose de deux parties :

➤ **IF**, l'indice de cible pour une surface insonifiée de 1m² qui dépend des caractéristiques du fond, de l'angle d'incidence et de la fréquence.

➤ **10logA**, où A représente l'aire de la surface insonifiée en m² et dépend donc de l'ouverture du sonar, de l'angle d'incidence et de la profondeur.

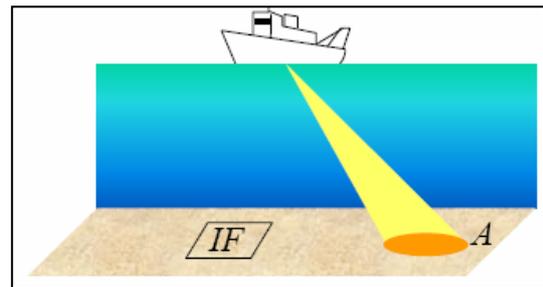


Fig III.1.1 - Illustration de l'indice de cible

III.1.2 La réflexion

La réflexion, comme la réfraction, d'une onde acoustique sur le fond se conforme à la théorie des rayons et à la formule de Snell-Descartes (Fig III.1.2) :

$$\Theta_{\text{incident}} = \Theta_{\text{réflexion}}$$

$$\frac{\sin(\Theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\Theta_2)}{c_2}$$

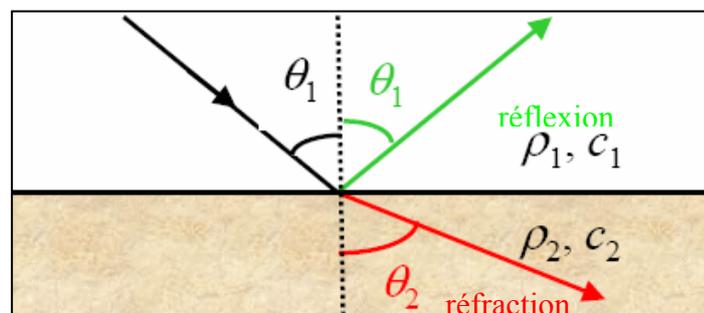


Fig III.1.2 - Illustration de la loi de Snell-Descartes

Le niveau de réflexion se quantifie par le coefficient de réflexion \mathbf{Tr} qui dépend principalement de la différence d'impédance entre les deux milieux selon la formule suivante :

$$\mathbf{Tr} = \frac{(\rho_2 c_2 \cos(\Theta_1) - \rho_1 c_1 \cos(\Theta_2))}{(\rho_2 c_2 \cos(\Theta_1) + \rho_1 c_1 \cos(\Theta_2))}$$

A noter le coefficient de transmission \mathbf{Tt} qui quantifie l'énergie transmise dans le sédiment :

$$\mathbf{Tt} = 1 + \mathbf{Tr} = \frac{2 * \rho_2 c_2 \cos(\Theta_1)}{(\rho_2 c_2 \cos(\Theta_1) + \rho_1 c_1 \cos(\Theta_2))}$$

III.1.3 La rétrodiffusion

Le paramètre de Rayleigh défini par $\mathbf{P} = 2k\sigma \cos(\Theta_i) \sim 2k\sigma$ rend compte du rapport de la rugosité σ (Fig III.1.3a), à savoir la dimension des aspérités du fond marin, et la longueur d'onde du signal émis avec $k = \frac{2\Pi}{\lambda}$.

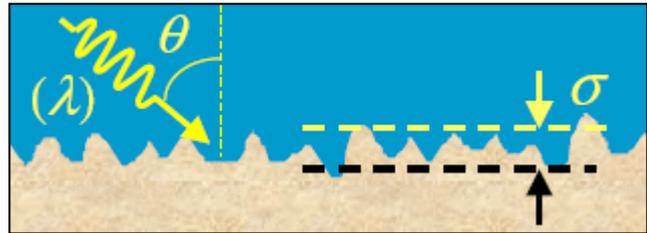


Fig III.1.3a – définition de la rugosité σ .

Si $\mathbf{P} \ll 1$, alors la longueur d'onde est grande devant les dimensions des aspérités. Le fond est considéré comme plat et le phénomène est dominé par la réflexion.

Si $\mathbf{P} \gg 1$, alors la longueur d'onde est petite devant les dimensions des aspérités. Ces dernières ne sont plus négligeables et vont déformer le signal. Le phénomène est alors prédominé par la diffusion.

Le phénomène de **diffusion** est la capacité d'une surface rugueuse à réfléchir l'onde de manière incohérente dans toutes les directions y compris vers la source : on parle dans ce dernier cas de **rétrodiffusion** (Fig III.1.3b).

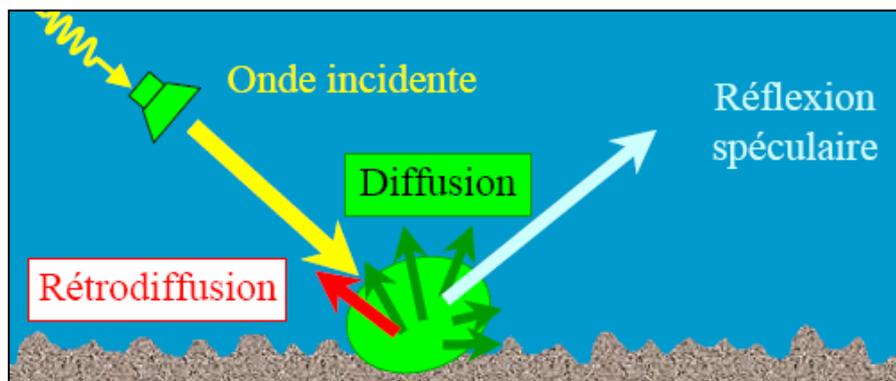


Fig III.1.3b - distinction entre réflexion, diffusion et rétrodiffusion.

Différents modèles permettent de paramétrer la rugosité du fond marin à travers les variations de l'indice de cible en fonction des caractéristiques du fond.

- **Le modèle à facettes :**

Valable pour des incidences faibles, ce modèle assimile le fond à une mosaïque de facettes. La quantité d'énergie rétrodiffusée est proportionnelle au nombre de facettes orientées dans la direction de la source. En général, on suppose une distribution gaussienne des pentes autour de 0° . Dès lors, pour des incidences faibles, les facettes horizontales étant plus nombreuses, le niveau d'énergie rétrodiffusée sera maximal tandis qu'il diminue progressivement pour des incidences de plus en plus obliques (Fig III.1.3c). L'écart type des pentes va dépendre du type de terrain : un fond lisse aura très peu de pentes loin de 0° donc répondra quasiment exclusivement aux faibles incidences à l'inverse d'un fond considéré comme rugueux.

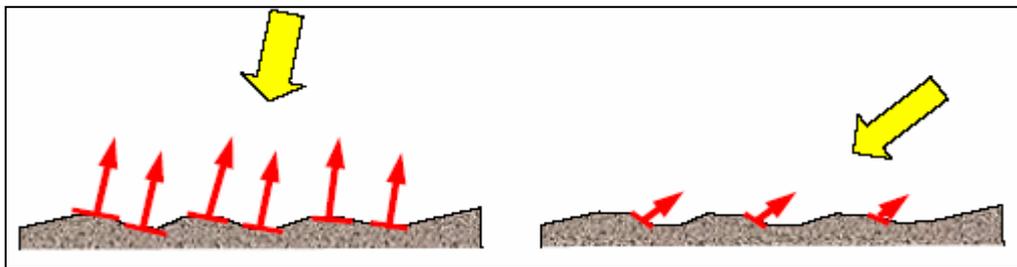


Fig III.1.3c - Paramétrisation de la rugosité au travers du modèle à facettes : Une distribution gaussienne des pentes garantit un nombre de faces réfléchissantes plus élevé pour les incidences faibles.

Il convient cependant de préciser que cette théorie n'est valable que sous l'approximation de *Kirchhoff* dite du « plan tangent » i.e. dans les conditions de champ lointain où les ondes peuvent être considérées comme planes.

- **Le modèle de Bragg :**

Pour des fortes incidences, le modèle de Bragg postule que le signal rétrodiffusé est dominé par les contributions de diffuseurs en phase c'est-à-dire espacés d'une distance d telle que $2d \cdot \sin(\Theta) = \lambda$ (Fig III.1.3d).

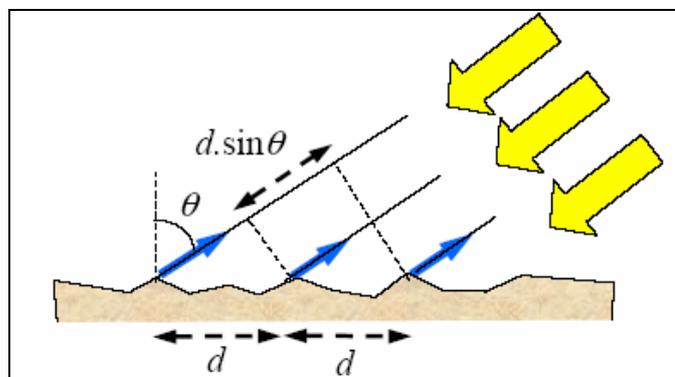


Fig III.1.3d Illustration du modèle de Bragg. La contribution principale est renvoyée par les réflecteurs en phases

En considérant le spectre spatial du fond i.e. la transformée de Fourier du profil du relief (Fig III.1.3e), la principale contribution sera la composante κ du spectre spatial telle que $\kappa \cdot d = 2\Pi$ à savoir telle que $\kappa = 2 \cdot k \cdot \sin(\Theta)$.

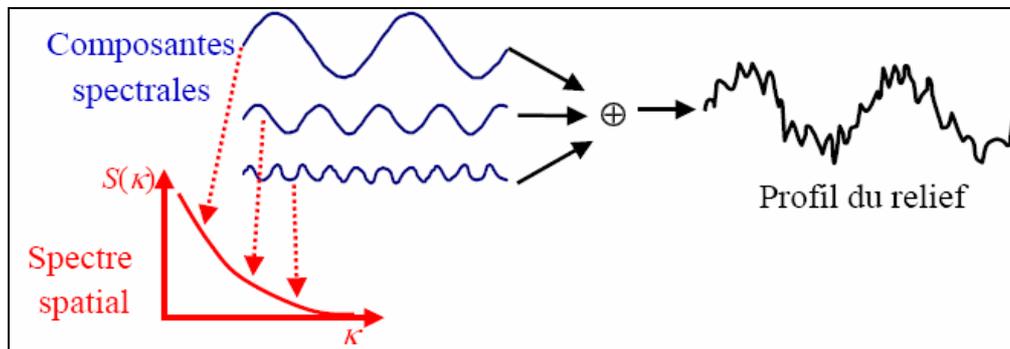


Fig III.1.3e - Illustration du spectre spatial d'un relief. Les hautes fréquences symbolisent les petites aspérités très rapprochées tandis que les basses représentent les irrégularités plus larges.

A travers la notion de rugosité, on peut donc adapter le niveau d'énergie rétrodiffusée en fonction du type de sédiment. En combinant plusieurs modèles, on peut alors tracer des profils de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence. On remarquera qu'aux faibles incidences ($\Theta < 10^\circ$), c'est le modèle à facette qui prédomine, tandis qu'aux fortes incidences, les valeurs suivent principalement la dynamique du modèle de Bragg se rapprochant de « l'Oblique de Lambert » en $\cos^2(\Theta)$ (Fig III.1.3f).

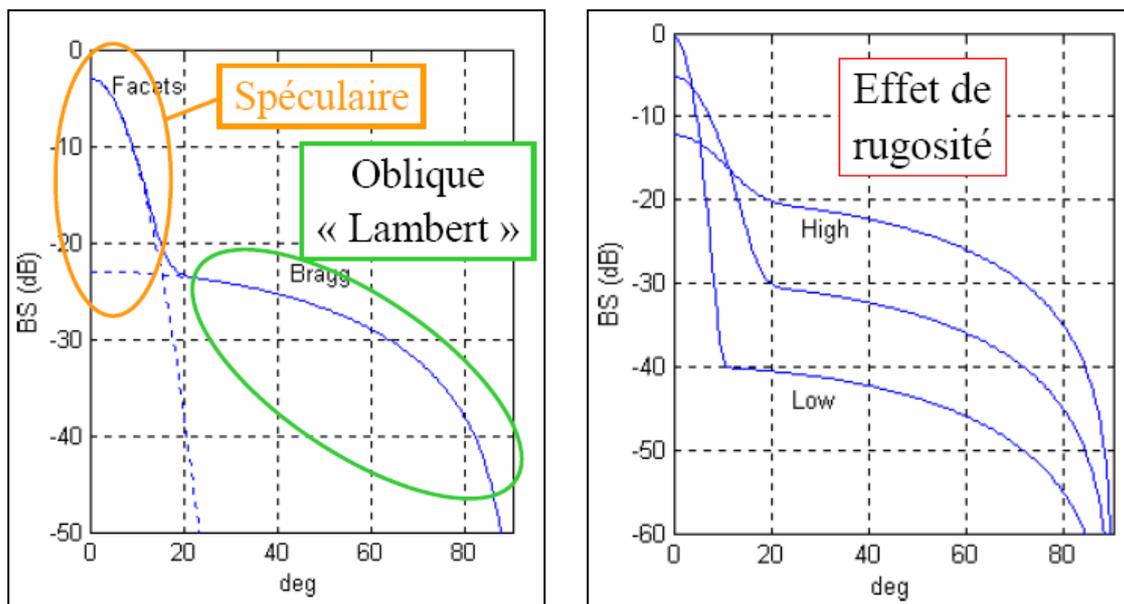


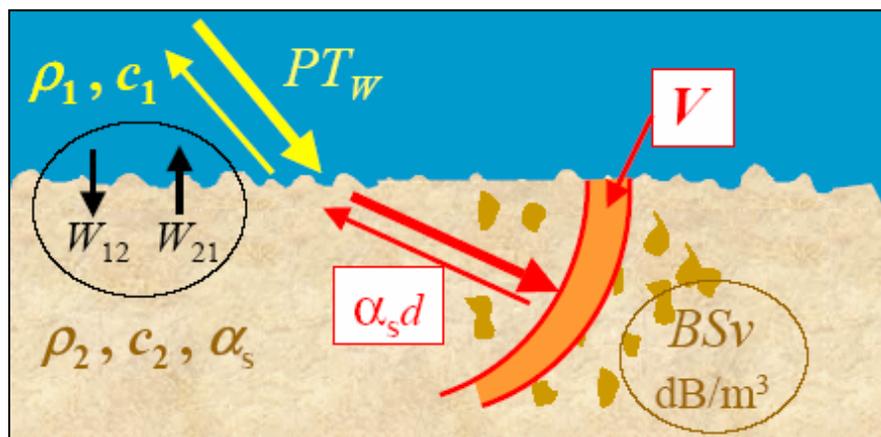
Fig III.1.3f - combinaison du modèle à facettes et du modèle de Bragg. On remarque bien l'influence de la rugosité sur le profil de rétrodiffusion : un pic étroit pour les terrain lisse et plus étalé pour les terrains rugueux.

En différenciant les profils selon le niveau de rugosité et donc du type de sédiment, on peut répercuter ces différences sur l'enveloppe générale de l'écho rétrodiffusé. Ainsi, pour de grandes ouvertures, tous les angles d'incidence étant concernés, on observera un écho moins intense mais plus étalé dans le temps pour un fond rugueux que pour un fond lisse.

III.1.4 La rétrodiffusion de volume

Fonction de la pénétration du signal acoustique dans le sol, la rétrodiffusion de volume apporte une contribution non-négligeable dans le cas de sédiments meubles comme la vase. Sa modélisation passe par l'estimation d'un indice de réflexion volumique IV équivalent au terme surfacique IC , mais également par celle du facteur d'atténuation α (Fig III.1.4). Ce dernier facteur dépend à la fois du type de sédiment et de la fréquence du signal émis. La loi de *Hamilton E.L. (1980)* prédit, en première approximation, une augmentation en f^1 . Cependant, selon *Kibblewhite A.C. (1989)* le facteur d'atténuation dépendrait aussi en grande partie de la porosité : Les sables assez peu poreux suivraient toujours une évolution en f^1 tandis que les sédiments vaseux, chargés en eau suivraient une loi en f^2 pour les basses fréquences et en $f^{1/2}$ pour les hautes fréquences ($f > 500\text{kHz}$).

Les coefficients de transmissions W_{12} et W_{21} sont également estimés à partir des impédances théoriques des deux milieux 1 et 2.



$$ER = NE + 2PT_W + W_{12} + W_{21} + 2\alpha_s d + 10 \log V + IV$$

↑ Energie reçue ↑ Energie émise ↑ Absorption dans l'eau ↑ Coefficient de transmission 1 vers 2 ↑ Coefficient de transmission 2 vers 1 ↑ Absorption dans le sédiment ↑ Indice de rétrodiffusion volumique

Fig III.1.4 - Équation du sonar adaptée à la rétrodiffusion volumique.

L'indice de rétrodiffusion est difficile à évaluer car il dépend à la fois des inclusions de débris de coquillages, de l'activité biologique, des bulles de gaz, de la stratification et des inhomogénéités du sédiment.

III.2 Discussion sur la validité de la théorie

L'ensemble de ces modèles de rétrodiffusion surfacique (modèle à facettes et de Bragg) et volumiques peuvent être superposables et donner ainsi des résultats suffisamment satisfaisants comme le modèle de *Jackson D.R. (1986)* communément utilisé pour des fréquences entre 10 et 100 kHz.

Lurton X. et Pouliquen E. (1994a et 1994b) s'appuient également sur cette théorie pour modéliser différentes enveloppes d'énergie en fonction de la rugosité et du relief du terrain. En comparant l'énergie cumulée de l'écho rétrodiffusé avec la courbe prédite, ils parviennent

à identifier le fond à l'une des sept classes de fonds prédéfinies à savoir vase molle, vase, vase-sable, sable très fin, sable, gravier ou roche. Les résultats individuels sont assez fluctuants, mais en moyennant les analyses de plusieurs échos d'une même zone, de très bons résultats sont obtenus.

En revanche, il semble qu'aucune de ces théories n'ait été validée pour les ordres de grandeurs considérés pour notre étude. Même si le paramètre de Rayleigh nous autorise à utiliser le modèle à facettes, la condition de champ lointain n'est quant à elle, pas remplie.

- **Paramètre de Rayleigh :**

- $P=2k\sigma\cos(\varphi_i) \sim 2k\sigma$
- $f=2\text{MHz} \Rightarrow T=0,5\mu\text{s}$
- $\lambda=cT=750\mu\text{m} \Rightarrow k=2\pi/\lambda=8377,6\text{m}^{-1}$

D'où si $\sigma \gg 1/(2k) = 60\mu\text{m}$, alors $P \gg 1$ et la diffusion sera prédominante sur la réflexion spéculaire. C'est le cas pour $\lambda < \sigma < 100\lambda$ i.e. $0,75\text{mm} < \sigma < 7,5\text{cm}$. Ainsi, les rugosités de l'ordre du millimètre, et en particulier les sables très grossiers, vont diffuser les ondes acoustiques dans toutes les directions conformément aux modèles évoqués précédemment.

- **Condition de champ lointain :**

La condition de champ lointain est conditionnée par les zones de Fresnel et de Fraunhofer. En dessous d'une distance $\frac{D^2}{(2\lambda)}$ de la source, on parle de champ proche, zone où l'onde n'est pas encore bien formée. Entre $\frac{D^2}{(2\lambda)}$ et $\frac{D^2}{\lambda}$, c'est la zone de Fresnel : l'onde peut être considérée comme sphérique tandis qu'au-delà de $\frac{D^2}{\lambda}$, dans la zone dite de Fraunhofer, elle peut être assimilée à une onde plane.

Or, à une distance de 30cm du transducteur, on est en deçà de la première distance $\frac{D^2}{(2\lambda)} = 40\text{cm}$, ce qui nous place en champ proche et rends très difficile l'approximation faite dans les modèles théoriques exposés précédemment.

Enfin, la principale difficulté pour adapter la théorie vient du fait qu'aucune validation ne fut effectuée à des fréquences approchant le MHz, mais plutôt aux alentours de la centaine de kHz. Dès lors, la littérature manque cruellement de données sur l'absorption et la réflectivité dans la gamme de fréquence considérée dans notre étude.

De même, les sonars sur lesquels les théories ont été validées étaient principalement caractérisés par un large faisceaux d'ouverture ($\sim 15^\circ$) et travaillant à des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres, ce qui leur offraient une large pastille d'insonification avoisinant la centaine de m^2 . A l'inverse, une faible ouverture angulaire (5° à -3dB) combinée à une faible profondeur (30cm) ne nous offre qu'une surface insonifiée très réduite, de l'ordre de 5cm^2 . Aussi, cette surface semble peu adaptée à la théorie, et dans tous les cas sera soumis à une variabilité naturelle beaucoup plus forte due au caractère très local de l'écho et à l'absence d'un moyennage spatial.

Dès lors, devant le manque de références bibliographiques et compte tenu de la géométrie très particulière du problème, une approche empirique paraît plus envisageable qu'une adaptation peu rigoureuse des théories proposées.

IV. Approche empirique du problème

Nous venons de voir que plusieurs théories ont permis de modéliser correctement les phénomènes de réflexion et de rétrodiffusion (*Rayleigh, Kirchhoff, Bragg et al.*). Cependant, la plupart d'entre elles s'appliquent en champ lointain, or nous travaillons à $30\text{cm} < D^2/(2\lambda) = 40\text{cm}$, et pour des fréquences uniquement de l'ordre de la centaine de kHz. Même si les grands principes sur la rugosité et les microreliefs sont toujours applicables, nous manquons de données expérimentales (atténuation dans le sédiment, célérité, coefficient de réflexion,...) à des fréquences au-delà de 1MHz. N'ayant pas le temps ni les moyens de mettre en place une théorie pour cette gamme de fréquence, seule une approche empirique passant par l'acquisition d'un maximum de signaux et pour un large panel de sédiments différents, fut envisagée au cours de l'étude.

IV.1 Le Banc expérimental

IV.1.1 Instrumentation

Le banc d'expérimentation (Fig IV.1.1) est constitué d'une colonne de sédimentation, dans laquelle on dépose la carotte de sédiment (préparée en laboratoire ou prélevée sur le terrain) avant de la remplir progressivement d'eau douce de façon à limiter la perturbation du faciès de la carotte. Une potence maintient le transducteur de l'ALTUS à une altitude fixe et selon une orientation la plus proche de la verticale possible.

Le transducteur est ainsi placé à 37,6 cm du fond de la colonne de sédimentation soit à 26,6 cm du dessus des carottes dont la hauteur est de 11cm.

Un thermomètre numérique plongé dans la colonne d'eau nous donne accès à la température de l'eau et ainsi à la célérité de l'onde acoustique pour une mesure d'altimétrie la plus fine possible. Pour la conversion, on utilise l'équation de *Chen et Millero (1977)* aussi connue comme l'équation UNESCO. L'altitude obtenue est à comparer à celle relevée manuellement à l'aide d'une règle graduée.

L'écho de retour est échantillonné puis enregistré au moyen d'un oscilloscope numérique afin de permettre ensuite un post-traitement et une analyse du signal sous Matlab.

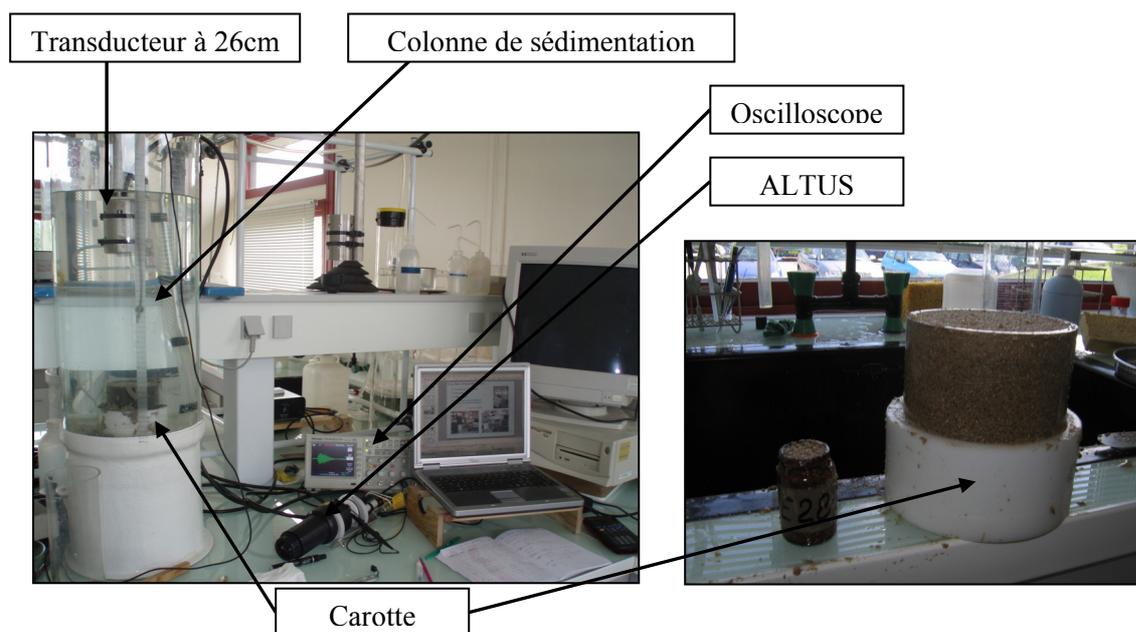


Fig IV.1.1 - Description du banc d'expérimentation

- Instrumentation

- La numérisation des signaux, a été effectuée par un **oscilloscope numérique Tektronix TDS 2014B**.

Cet oscilloscope possède une bande passante de 100MHz. Il échantillonne 2500 points par image affichée et pour cela peut monter à 1Giga d'échantillon par seconde.

On veut échantillonner un signal de fréquence 2MHz. Donc d'après le critère de Shannon il faut échantillonner à plus de 4MHz.

La largeur de l'écran étant de 10 div. Un affichage à 2,5 us/div et 5us/div donne respectivement un échantillonnage à 100MHz et 50MHz ce qui est suffisamment satisfaisant.

- Pour l'essentiel des essais, nous avons utilisé l'ALTUS 4 :

Constructeur :

nke electronics

Rue Gutenberg

Z.I. Kérandré

56700 HENNEBONT

France

Tel : (33) 02 97 36 10 12

Fax : (33) 02 97 36 55 17

www.nke.fr

E-mail : info@nke.fr

Références :

Type : S-ALTUS 2MHz

Code : 60.07.024.004

SN : 18004



IV.2 La chaîne de traitement

Après avoir numérisé le signal, il reste à développer une chaîne de traitement permettant l'analyse de la forme de l'écho et l'affichage des paramètres les plus caractéristiques.

Cette chaîne de traitement, réalisé sous Matlab 6.5 doit être fiable et rapide d'utilisation afin de traiter facilement de nouveaux fichiers. Le but est d'identifier les paramètres les plus pertinents et qui pourraient permettre de discriminer deux types de sédiments.

IV.2.1 filtrage du signal

Le signal brut contient du bruit haute fréquence qu'il convient d'éliminer dès le départ (Fig IV.2.1). On utilise alors un **filtre de Butterworth d'ordre 2**. (voir diagramme de Bode en Annexe I)

Un filtrage à $f_c=2\text{MHz}$ permet d'éliminer le bruit HF tout en gardant le signal, et garantit un antirepliement pour toute analyse spectrale ($f_c < f_e/2$).

De plus, le filtre de Butterworth présente un déphasage quasi linéaire et donc un temps de propagation quasi constant pour toutes les fréquences. En outre, à l'ordre 2, le temps de propagation reste négligeable pour la mesure des temps d'arrivée.

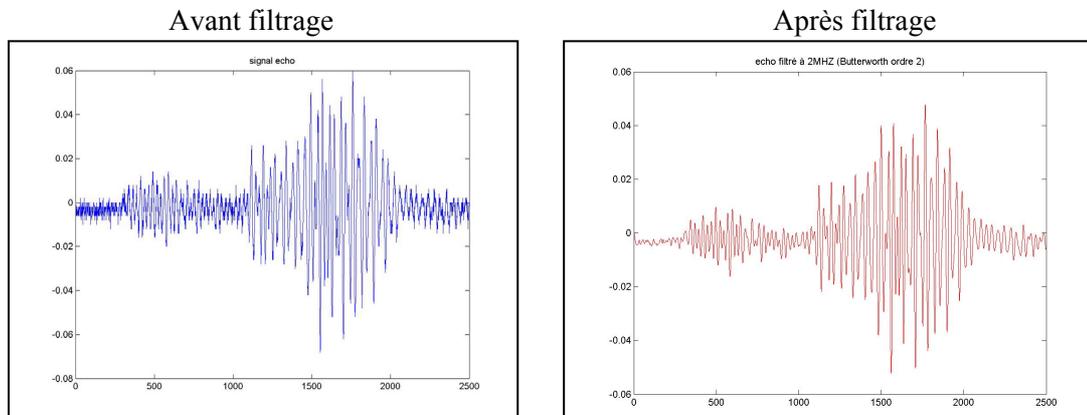


Fig IV.2.1 - Signal avant et après le filtrage

IV.2.2 Corrélation et altimétrie

L'écho, référencé dans le temps, peut nous donner une estimation précise de l'altimétrie. En effet, l'oscilloscope déclenche sur le front montant du signal émis et ainsi l'échelle de temps est exactement référencée par rapport à l'instant d'émission.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour identifier le fond sur un écho : par détection de seuil (front montant), de maximum d'énergie ou encore par détection de phase.

Nous avons choisis une méthode originale, inspirée des travaux de *Maa et al (2002)*. Cette méthode s'appuie sur l'opération de corrélation ou « cross-correlation » entre l'écho et le signal émis. En effet, une des caractéristiques de cet opérateur est d'être maximal pour deux signaux proportionnels et donc permet de quantifier le degré de similitude entre deux signaux. Il est défini par la formule suivante :

$$(f \star g)(x) \stackrel{\text{def}}{=} \int f^*(t)g(x+t) dt$$

D'où si, f est le signal émis, g le signal retrodiffusé et x le maximum de la cross-correlation, alors la fonction f décalée de x secondes est proportionnel à g , ce qui signifie qu'on a un écho x secondes après l'émission. Ce résultat nous permet donc d'identifier les échos successifs et ainsi les différentes interfaces présentes.

Cette méthode donne d'excellents résultats sur des échos brefs et puissants mais permet également d'améliorer de façon significative le rapport signal sur bruit et ainsi d'extraire un écho d'un signal fortement bruité.

Nous l'avons utilisé sur le fond de la colonne de sédimentation à savoir une plaque de plexiglas de 1cm d'épaisseur positionné à 37,65 cm du transducteur (Fig IV.2.2).

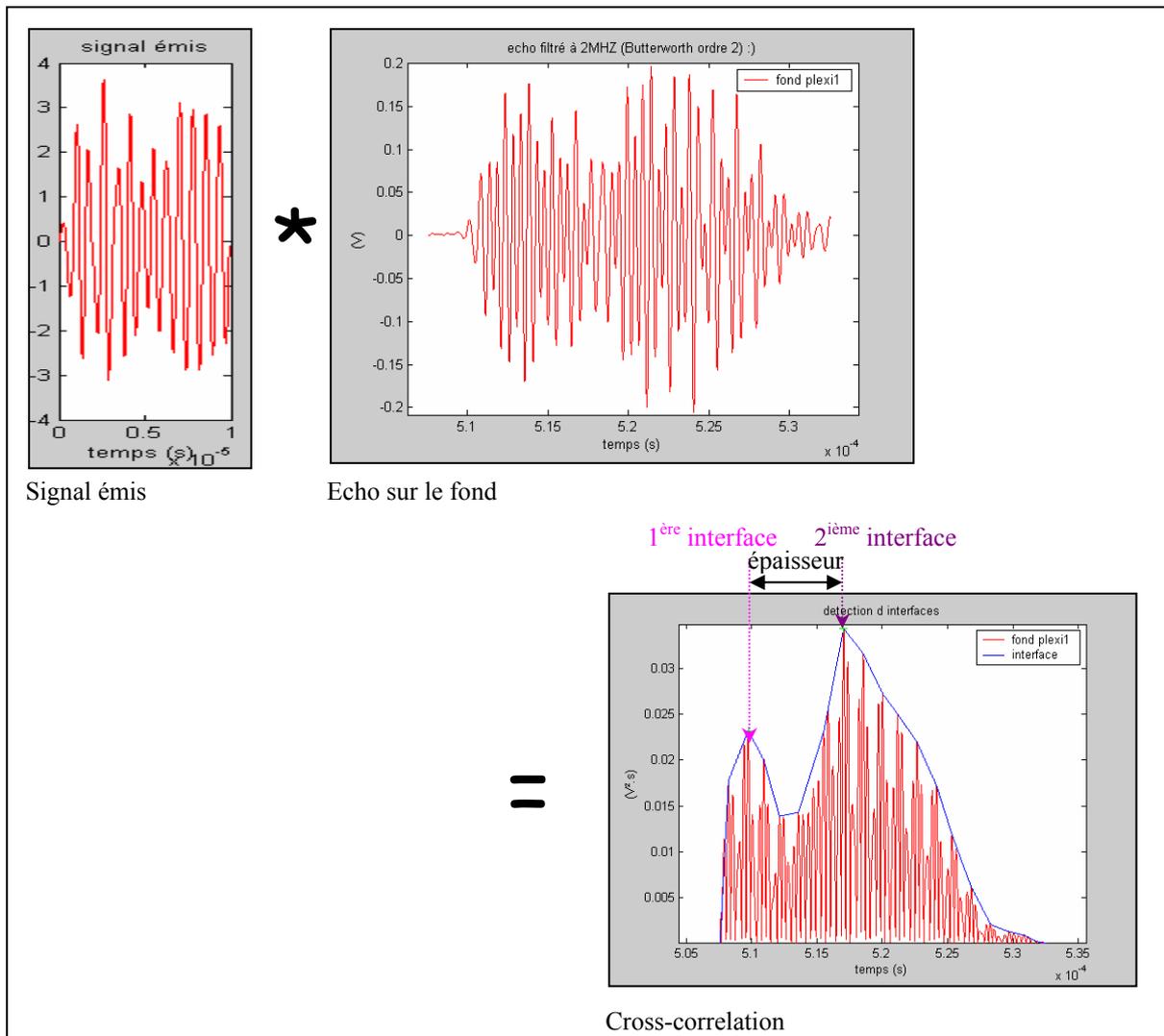


Fig IV.2.2 - exemple de détection d'interfaces par cross-correlation sur une plaque de Plexiglas de 1cm d'épaisseur.

Commentaire –

Le premier maximum de corrélation en $5,0975 \cdot 10^{-4}$ s nous donne l'interface eau/fond.

Connaissant la célérité dans l'eau, on obtient la distance transducteur-fond :

$D = 5,0975 \cdot 10^{-4} \cdot 1478 / 2 = 37,67$ cm ce qui correspond exactement à la valeur obtenue par détection du front montant et à 0,2 mm près à l'altitude lue sur la règle graduée.

Le deuxième maximum de corrélation en $5,1705 \cdot 10^{-4}$ s correspond à la fin de plaque de plexiglas. Connaissant la célérité du son dans le plexiglas (environ 2750 m/s), on a accès à l'épaisseur de la plaque :

$e = (5,1705 - 5,0975) \cdot 10^{-4} \cdot 2750 / 2 = 1,004$ cm ce qui est exactement l'épaisseur de la plaque.

Cette méthode perd de la précision sur des échos moins nets ou déformés. En particulier, on remarquera que la résolution de l'enveloppe dépend de l'écartement des pics à savoir $T/2$ et donc une détection erronée conduirait à un écart de $\lambda/2 = 375 \mu\text{m}$. Malgré tout, cette méthode garde l'avantage d'être robuste dans le cas de signaux bruités comme ça peut être le cas dans une eau turbide.

IV.2.3 l'énergie

- **Energie du signal :**

En élevant le signal au carré on obtient la puissance (Fig IV.2.3a). En intégrant la puissance sur une durée finie, on obtient l'énergie du signal. Comme pour RoxAnn, il peut être intéressant de calculer puis de comparer l'énergie totale de l'écho ou simplement contenue dans une partie spécifique de celui-ci.

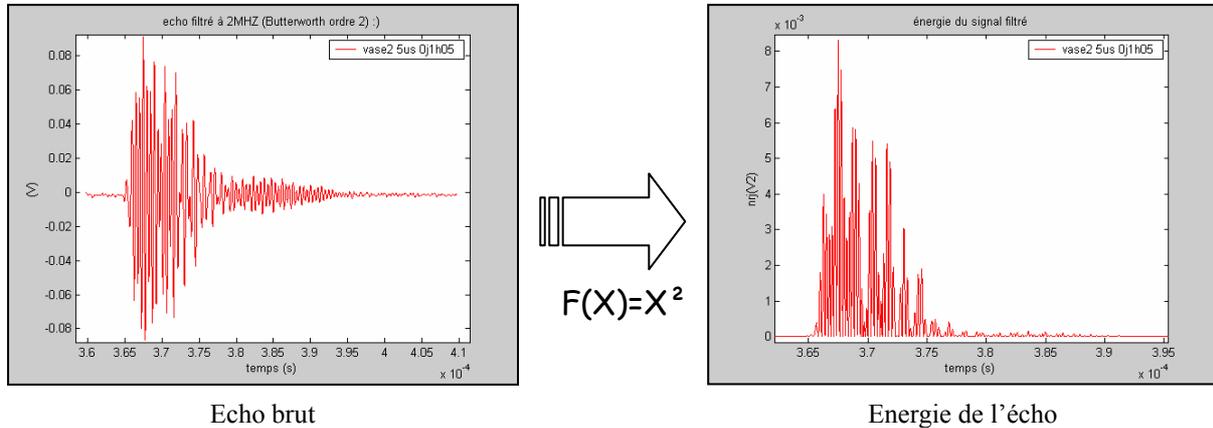


Fig IV.2.3a - Calcul de l'énergie à partir de l'écho renvoyé par un fond vaseux

Commentaire – L'avantage de travailler avec l'énergie est d'améliorer le rapport signal sur bruit et de mettre en relief les échos significatifs. En revanche, pour de forte directivité comme dans notre cas, son niveau dépend également fortement de l'angle d'incidence.

- **Etude de la somme cumulée :**

La somme cumulée de l'énergie de l'écho est une courbe caractéristique intéressante puisque non seulement elle reflète l'évolution globale de l'amplitude du signal dans le temps mais elle possède aussi l'avantage de minimiser le bruit (Fig IV.2.3b). Normalisée, elle permet également une comparaison indépendante du niveau d'énergie de plusieurs signaux différents. En particulier, les travaux de classification des fonds marins réalisés par Xavier LURTON et Eric POULIQUEN (1994) sur des sonars de pêche, reposent essentiellement sur la caractérisation et la comparaison des courbes d'énergie cumulée.

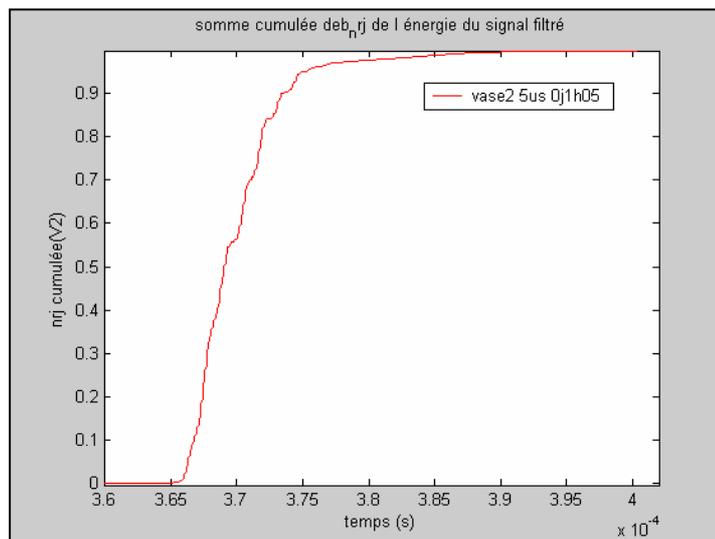


Fig IV.2.3b - Courbe d'énergie cumulée et normalisée de l'écho. Elle reflète les variations globales d'amplitude de l'écho.

- **Etude des paramètres géométriques :**

On peut également rechercher l'enveloppe de l'énergie et travailler sur les caractéristiques géométriques de celle-ci afin de différencier plusieurs types d'échos distincts.

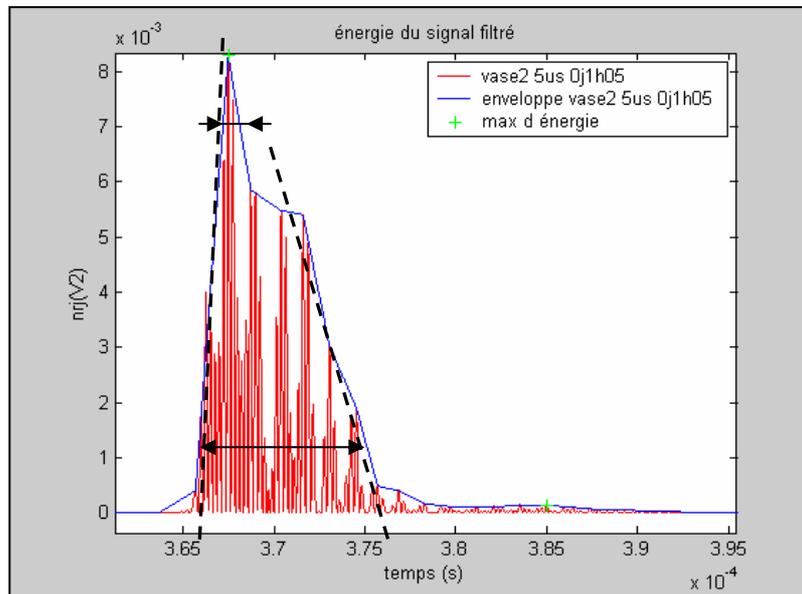


Fig IV.2.3c - Description géométrique de l'énergie de l'écho.

Nous avons retenu six paramètres géométriques caractéristiques (FigIV.2.3c) : l'étalement temporel à 10%, 50% et 90% du maximum, la position du maximum sur l'étalement à 10%, la pente de montée (de 10 à 90%) et la pente de descente (de 90 à 10%).

IV.2.4 Le spectre d'énergie

La transformée de Fourier rapide de l'écho, ou « FFT », nous donne le spectre d'énergie en fréquence entre $-f_e/2$ et $f_e/2$. Ce dernier peut renseigner sur les fréquences des harmoniques les plus énergétiques (Fig IV.2.4). De plus, la technique du zero-padding permet d'avoir une résolution aussi fine que souhaitée.

Nous avons vu précédemment (chap. II) que le transducteur émet de l'énergie à la fois en 1,3 MHz et en 2MHz. Il peut être intéressant de comparer le ratio entre les deux composantes.

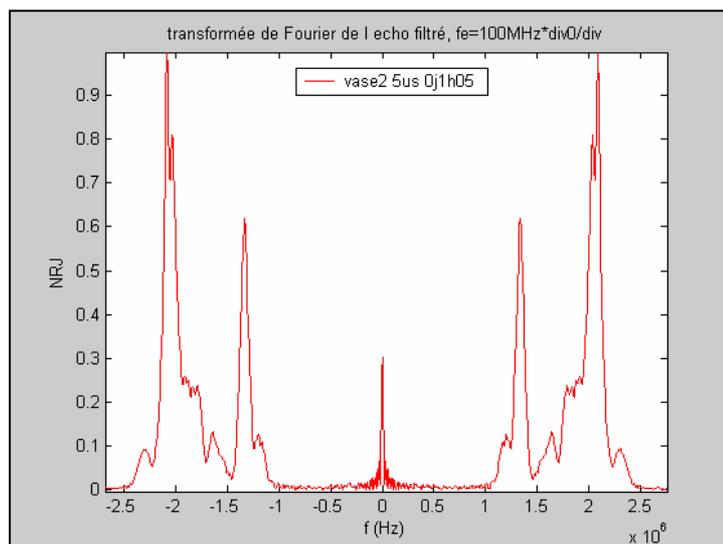


Fig IV.2.4 - Exemple de spectre d'énergie d'un écho renvoyé par un fond vaseux

IV.3 Caractérisation des sédiments utilisés

Afin d'envisager une corrélation entre l'écho et la nature du sédiment, il est indispensable de bien identifier et caractériser les sédiments utilisés.

Nous avons utilisé trois classes de sables et plusieurs types de vases naturelles, balayant ainsi une large gamme de faciès présents en milieu côtier. Chaque sédiment est caractérisé par sa teneur en eau et sa granulométrie quand sa mesure est possible.

IV.3.1 les mesures

- La teneur en eau :

La teneur en eau est mesurée à l'aide de la balance de précision du laboratoire. Juste avant l'essai, on mesure le poids du flacon vide puis rempli du sédiment humide, qu'on place ensuite à l'étuve à savoir 50°C pendant une semaine minimum. On mesure alors de nouveau le poids du flacon contenant cette fois ci le sédiment complètement sec. La différence des deux donne la masse d'eau et permet de définir alors la teneur en eau (*Le Hir P., 2006*) :

$$\begin{aligned} \text{Teneur en eau} &= \frac{(\text{masse d'eau})}{(\text{masse de sédiment sec})} \\ &= \frac{(\text{masse du flacon humide} - \text{masse du flacon sec})}{(\text{masse du flacon sec} - \text{masse du flacon vide})} \end{aligned}$$

- La granulométrie :

Après chaque essai, on récupère à l'aide d'une spatule une petite quantité du sédiment contenu dans les premiers centimètres de la carotte.

Pour une granulométrie inférieure à 2mm, cet échantillon est alors analysé au granulomètre laser « *Beckman Coulter IS 200* » (Fig IV.3.1). Cet appareil utilise la diffraction laser pour déterminer de façon précise le spectre granulométrique de l'échantillon analysé.



Fig IV.3.1 - le technicien principal Philippe Cann effectuant des mesures au granulomètre laser.

IV.3.2 Les sédiments utilisés

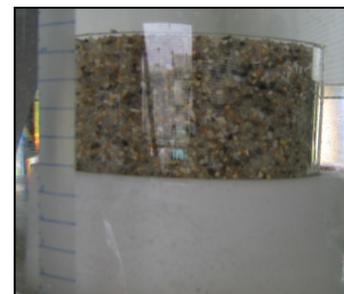
Pour le besoin des essais, 3 types de sables ont été préparés au moyen de plusieurs tamis de précision empilés les uns sur les autres, de la maille plus fine à la maille la plus grossière sur le dessus.



Sable fin
100 μm < D < 300 μm
 D_{50} = 192 μm
Teneur en eau = 0,23

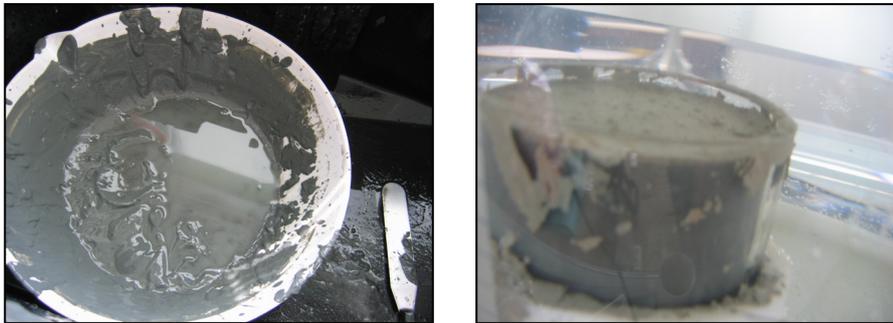


Sable grossier
300 μm < D < 750 μm
 D_{50} = 497 μm
Teneur en eau = 0,26



Sable très grossier
1,6 mm < D < 2 mm
Pas de granulométrie disponible
Teneur en eau = 0,25

Excepté les carottes de vases prélevées sur le terrain, les préparations sont issues du remaniement de la même vase dont les caractéristiques granulométriques sont exposées ci-dessous mais dont la teneur en eau variait selon la préparation. Elle correspond à une vase argileuse avec présence de Silts fins $100 \mu\text{m}$.



Vase naturelle, $2 \mu\text{m} < D < 130 \mu\text{m}$, $D_{50} = 19 \mu\text{m}$

- Graphique des Granulométries (Fig IV.3.2) : Rq : Aucune mesure n'est disponible pour le sable très grossier car le granulomètre n'accepte que les échantillons pour $D < 1,8 \text{mm}$.

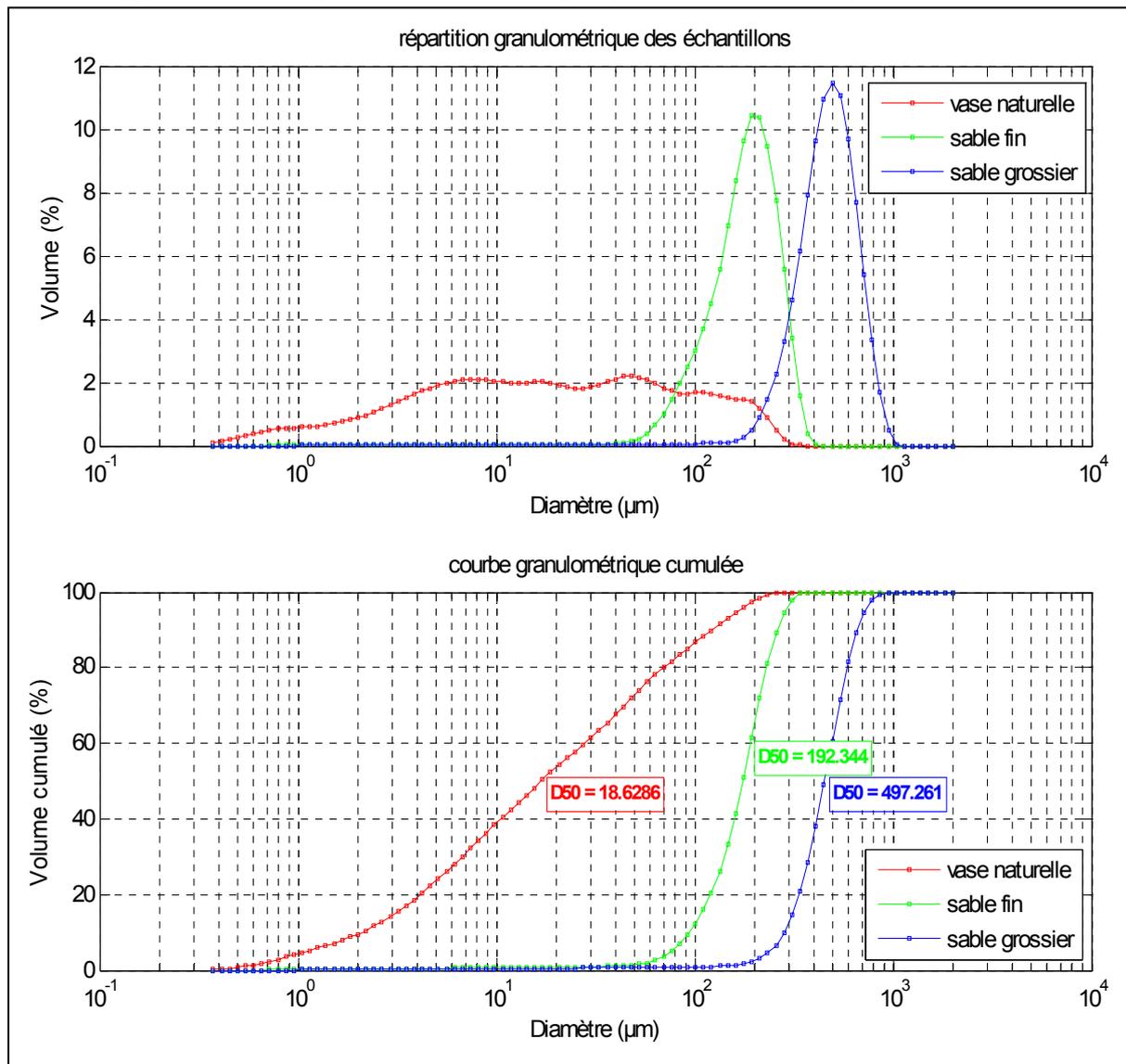


Fig IV.3.2 Granulométrie des échantillons utilisés. Dans un échantillon, il y a autant de valeurs au dessus qu'au dessous du diamètre médian noté D_{50}

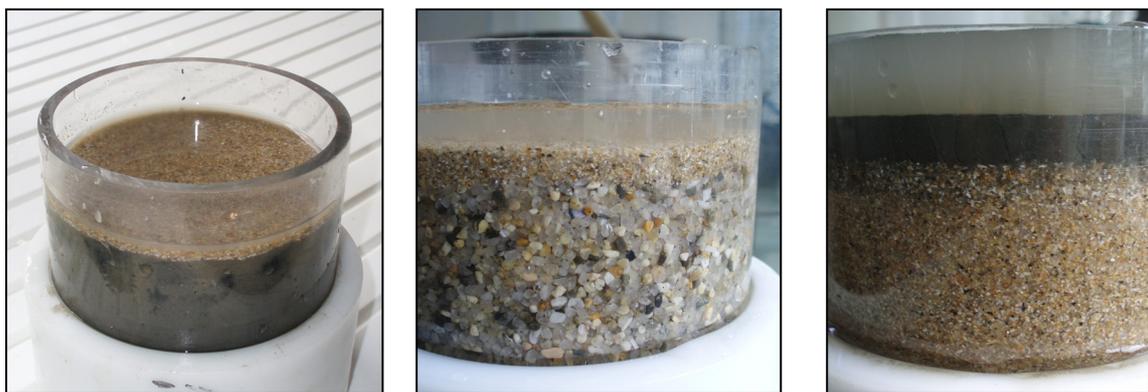
Commentaire – Il a été fait en sorte de couvrir un maximum de plages de granulométrie afin d'éventuellement déceler une influence de la granulométrie sur l'écho, notamment entre les différents sables.

V. Capacité de l'ALTUS à détecter des interfaces

V.1 La démarche utilisée

Pour évaluer la capacité de l'Altus à détecter une interface, à savoir un changement de densité sous la limite eau-sédiment, on prépare des carottes « modèle » remplies d'un premier type de sédiment et sur lequel on dépose une épaisseur déterminée d'un second type de sédiment (Fig V.1). On commence par une fine couche de quelques millimètres puis on augmente par palier d'épaisseur correspondant aux ordres de grandeur de dépôts rencontrés sur le terrain, à savoir 5mm, 10mm et enfin 20mm.

Plusieurs configurations ont été envisagées : vase fluide sur vase dure, sable sur vase dure, vase fluide sur sable et sable fin sur sable plus grossier, etc...



Sable grossier sur vase dure

Sable grossier sur sable très grossier

Vase fluide sur sable grossier

Fig V.1 - Quelques exemples d'interfaces artificielles qui furent testées en laboratoire.

Le post-traitement décrit précédemment nous permet alors de recueillir le signal et d'identifier par corrélation les différentes interfaces. Dans la grande majorité des cas, l'interface eau-sédiment, donc l'altimétrie, est mesurée avec une grande précision. La détection de la deuxième interface n'est en revanche pas systématique et bien souvent imprécise. Cette dernière va dépendre en effet de plusieurs paramètres comme la pénétration du signal dans la couche, le rapport signal sur bruit ou encore la célérité de l'onde dans le sédiment.

V.2 Les résultats

V.2.1 L'altimétrie

La technique de corrélation donne de façon générale des résultats satisfaisants comparable dans la plupart des cas à une détection sur front montant.

Sur la mesure de la première interface eau/sédiment, on observe en moyenne pour tous types de sédiment confondus une **précision de 0,8 mm**. Cependant, en majorité, la précision est même inférieure à cette valeur à l'exception des configurations où la présence d'une interface fortement marquée va masquer l'écho du fond réel. C'est le cas par exemple pour une couche de vase fluide inférieure à 5mm sur un fond de sable. Ceci explique une erreur un peu plus importante sur une interface eau/vase fluide (fig V.2.1).

La précision est sensiblement moins bonne pour un sable grossier en raison de la taille des grains (>1,6mm) qui présente dès lors de fortes aspérités et rajoute une imprécision sur la définition même de l'interface.

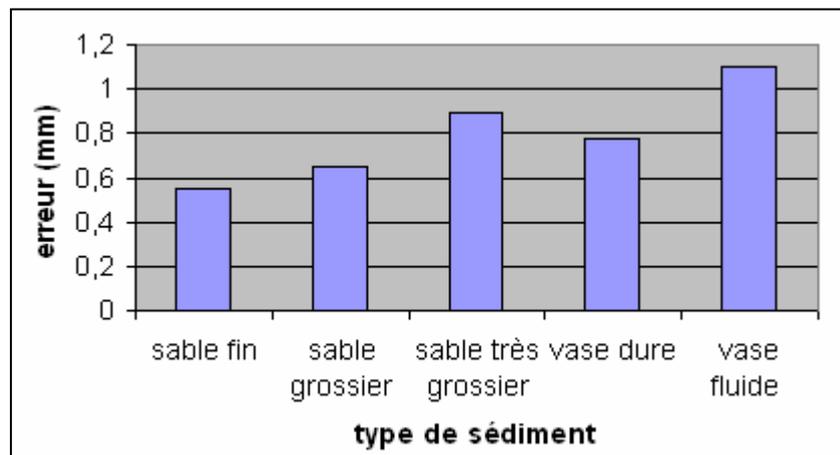


Fig V.2.1 - Erreur moyenne d'altimétrie par type de sédiment

Par ailleurs, il faut ajouter que la précision de la mesure dépend fortement de l'état de la surface à savoir qu'il est difficile de définir exactement l'altitude d'un faciès présentant un microrelief de l'ordre du millimètre. Ainsi on obtient de très bon résultats (<0,6mm) sur des vases lisses ou des sables fins et une imprécision toute relative sur les sables grossiers qui peut atteindre plus d'1mm dans les cas les plus défavorables.

De la même façon, les mesures de référence effectuées à la règle graduée à l'intérieur même de la colonne d'eau, admettent également leur marge d'erreur pouvant aller de 0,5 à 1mm.

Enfin, l'absence de capteur de température sur l'appareil peut rajouter une imprécision supplémentaire de 2mm pour une célérité estimée à 15 m/s près, ce qui ramènerait donc la précision totale *in situ* à 3mm.

V.2.2 La détection d'interfaces

Derrière le premier écho correspondant à l'interface eau-sédiment, on peut identifier d'autres artefacts pouvant révéler la présence d'une interface entre deux couches de sédiments de densités différentes. Malheureusement, cette partie du signal est également marquée par un aspect fortement chaotique notamment à cause des multiples inhomogénéités surfaciques ou volumiques qui vont déclencher de petits artefacts. Ainsi, sans pour autant être infaillible, face à la multiplicité des maxima, la détection par corrélation semble primer sur une détection par maximum. En effet, la figure V.2.2a ci-dessous montre que l'on peut avoir plusieurs maxima pour un même écho.

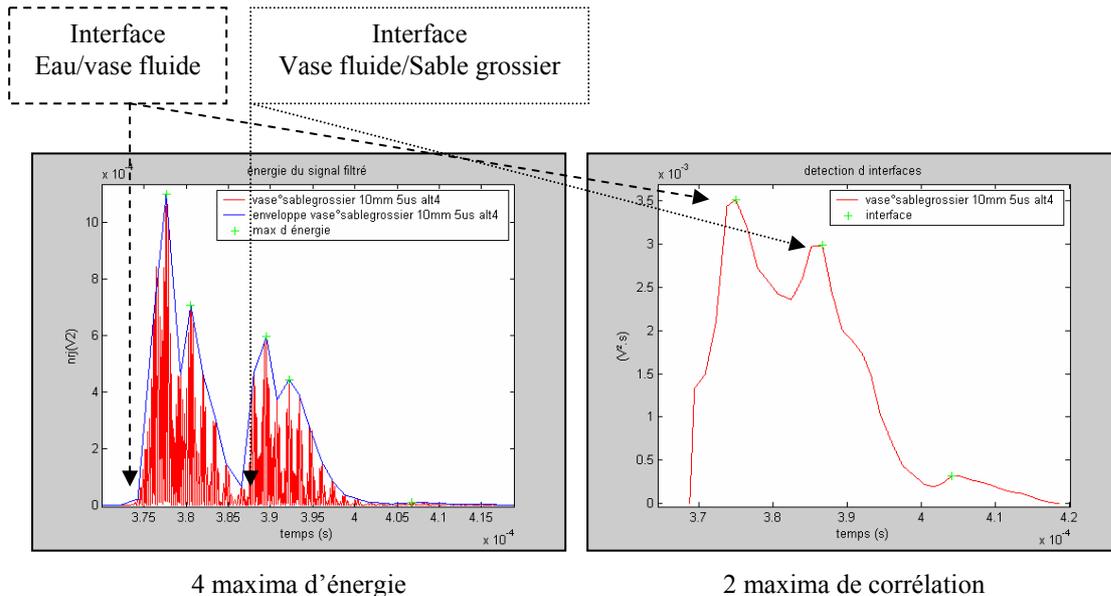


Fig V.2.2a - Cas idéal de détection d'une interface de sable grossier sous une couche de 10mm de vase fluide. Contrairement à l'énergie (gauche), on observe exactement un maximum de corrélation (droite) par interface.

On vient de voir qu'en majorité le premier maximum correspondait toujours à la détection du fond. En supposant que l'interface corresponde au deuxième maximum de corrélation le plus intense, on peut confronter cette méthode de détection à la réalité. Deux questions conditionnent l'expérience :

- l'interface est-elle visible sur l'écho *i.e.* la pénétration du signal est elle suffisante ?
- Si oui, est-elle détectée par l'algorithme mis en place et avec quelle précision ?

Dans le cas d'une détection réussie, on peut mesurer l'écart entre les deux maxima de corrélation identifiés et estimer l'épaisseur de la couche superficielle. Sans la connaissance à priori du sédiment de surface, on peut utiliser une célérité arbitraire de 1500 m/s mais qui donne une précision peu satisfaisante. En effet, aux ordres de grandeurs considérés, une erreur de 100m/s conduit à un écart d'environ 1mm. En revanche, on peut espérer se rapprocher de la réalité en utilisant différentes célérités en fonction du type de sédiment. Les valeurs adoptées furent inspirées des travaux de Mc Guinness et Officer (1978) :

- vase fluide : 1500 m/s
- sable fin : 1640 m/s
- sable grossier : 1780 m/s
- sable très grossier : 1870 m/s

Fig V.2.2b - Résultats et mesures sur la détection d'interfaces

CONFIGURATIONS (écart avec l'épaisseur théorique en mm)		
SABLE SUR VASE DURE (VASE TROGRIFFON AVAL)		
épaisseur de couche	sable très grossier sur vase dure (I)	sable grossier sur vase dure (II)
5mm	-0,1	mauvaise détection (1)
10mm	-1,7	mauvaise détection
20mm	pas assez de pénétration	pas assez de pénétration

CONFIGURATIONS (écart avec l'épaisseur théorique en mm)		
VASE FLUIDE (St Yves) SUR SABLE		
épaisseur de couche	vase fluide sur sable très grossier (IV)	vase fluide sur sable grossier (V)
2mm	mauvaise détection (3)	mauvaise détection (3)
5mm	mauvaise détection (2) [0,8]	mauvaise détection
10mm	mauvaise détection (1)	-1,24
20mm	mauvaise détection (2) [1,8]	2,4

CONFIGURATIONS (écart avec l'épaisseur théorique en mm)		
SABLE SUR SABLE		
épaisseur de couche	sable fin sur très grossier (VII)	sable fin sur grossier (VIII)
5mm	-1,1	mauvaise détection
10mm	-0,3	pas assez de pénétration (4)
20mm	-1,6	pas assez de pénétration

CONFIGURATIONS	
épaisseur de couche	VASE FLUIDE (St Yves) SUR DURE (TROGRIFFON AVAL) (X)
2mm	mauvaise détection (3)
5mm	-0,01
6mm	1,1
10mm	1,6
20mm	1,4

(1) signal trop déformé

(2) le 2^{ème} max de corrélation le + intense ne correspond pas à celui de l'interface. La valeur entre crochets est l'écart avec l'épaisseur théorique si le bon maximum avait été sélectionné.

(3) échos trop rapprochés donc difficilement différenciables

(4) écho faible et masqué par la fin du 1^{er} écho

Commentaires – Les résultats obtenus sont assez variables et dépendent en grande partie des sédiments utilisés (Fig V.2.2b).

On observe en effet **des résultats très satisfaisants pour les configurations de type vase fluide sur vase dure** avec une détection fiable pour des épaisseurs supérieures à 4mm (Fig V.2.2c). De plus la précision sur la mesure de l'épaisseur est de l'ordre du millimètre.

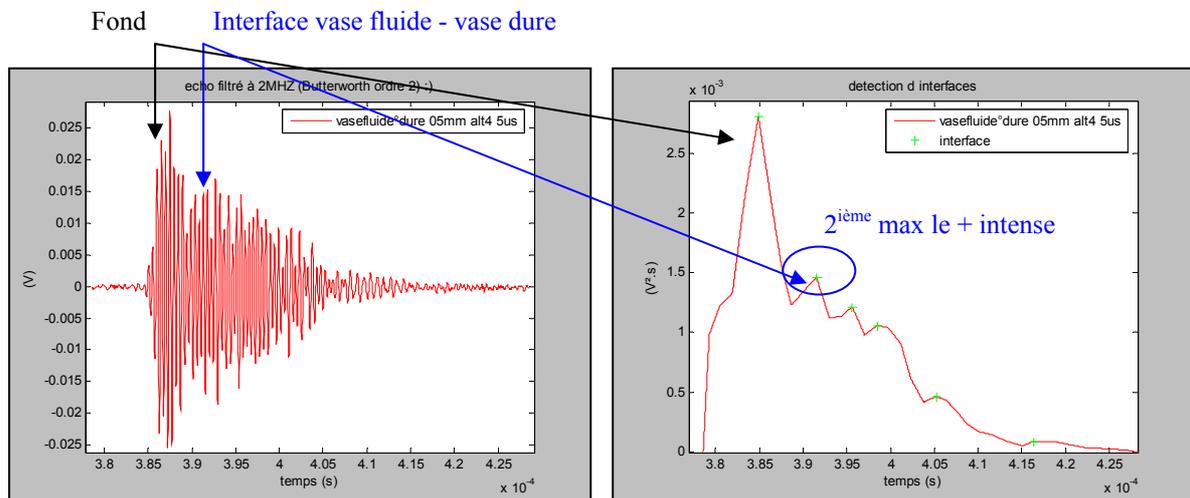


Fig V.2.2c - cas favorable de détection d'un fond de vase dure sous 5mm de vase fluide. Les flèches correspondent aux temps attendus du fond et de l'interface.

En revanche, l'utilisation du sable fournit des résultats moins constants. De fait, les sables renvoient des échos plus étalés dans le temps et masquant facilement les échos un peu plus faibles. En particulier, si la différence entre les deux sables n'est pas assez nette pour engendrer un écho suffisant, l'interface, parfois visible, est difficilement détectable de façon automatique : cas du sable fin sur grossier (VIII) et du grossier sur très grossier (IX) en opposition aux assez bons résultats du sable fin sur très grossier (VII).

De plus, l'absence d'interfaces visibles sous des couches de sable supérieures à 10mm (I, II, III, V et VI) montre que le signal pénètre beaucoup moins que dans de la vase fluide (V, VI et X). Non seulement le coefficient de transmission est plus faible (différence d'impédance plus importante) mais également les coefficients d'absorption sont différents. Selon *Mc Leroy* et *Deloach*, le coefficient d'atténuation des ondes acoustiques dans le sable varie en $0,6 \cdot \text{fréquence dB/m}$ alors que pour des vases portuaires, les travaux d'*Hamilton* mesurent une variation en $2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{fréquence dB/m}$.

Par ailleurs, l'écho correspondant à l'interface peut souvent être visible par l'observateur mais noyé parmi d'autres artefacts qui vont induire en erreur la détection automatique. C'est le cas lorsque les échos sont trop déformés soit par le microrelief (quand la surface de la carotte a été un peu chahutée lors du remplissage de la colonne d'eau), soit par des bulles ou autres inhomogénéités de la couche de surface. Le deuxième maximum de corrélation le plus intense ne correspond pas alors forcément à l'interface recherchée et seule une connaissance a priori de l'épaisseur de la couche permet d'identifier l'interface sur l'écho (Fig V.2.2d).

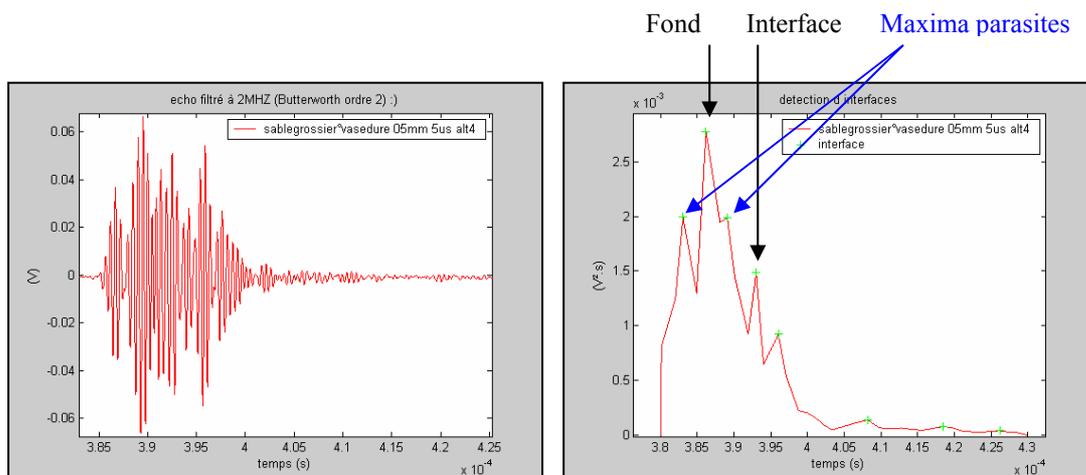


Fig V.2.2d - Cas défavorable d'un écho très déformé (cas II, 5mm). Ni le fond ni l'interface ne sont correctement détectés. Difficile, même pour un observateur averti d'identifier les échos significatifs...

La fin du premier écho, en forme de seconde bosse (voir chap VI.1), induit également des erreurs dans les détections des interfaces notamment celles à plus de 10mm. En effet, il arrive que cette bosse, difficilement différenciable d'un écho ordinaire, induise un maximum de corrélation plus intense que celui de l'interface (Fig V.2.2e). Dans les cas de chevauchement, on peut même observer des interactions destructives qui vont encore une fois déformer le signal et biaiser la détection de l'interface.

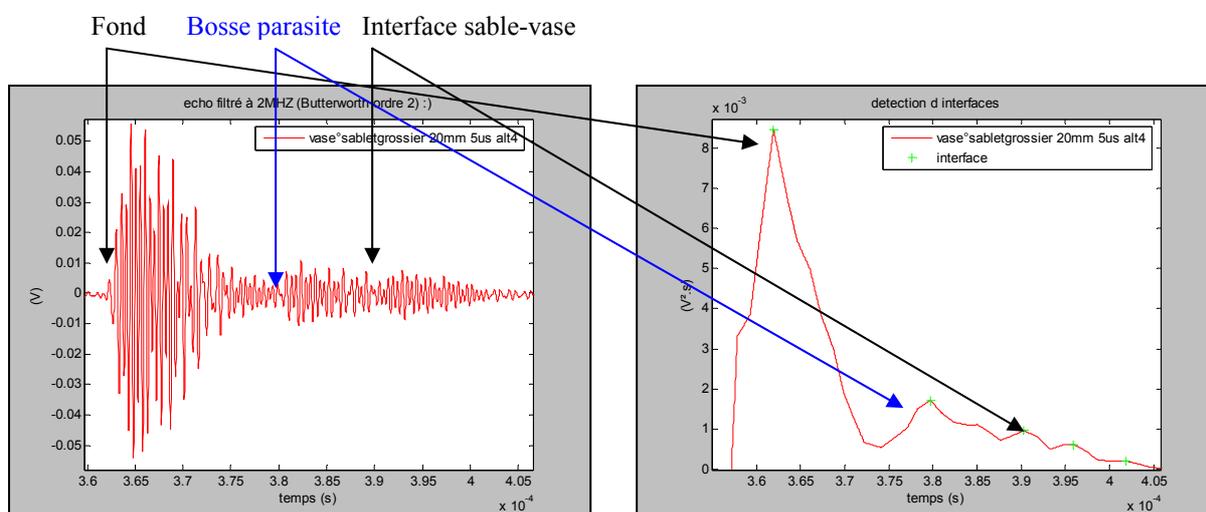


Fig V.2.2e - cas d'une détection erronée à cause de la présence d'une bosse à l'arrière du 1^{er} écho qui engendre un maximum de corrélation avant la véritable interface.

Enfin, l'algorithme mis en place admet une résolution limitant la détection de deux échos trop rapprochés qui tendent à se concaténer voire fusionner. De ce fait, une fine couche de 2mm de vase fluide peut être vue sur l'écho mais n'engendre pas de maximum de corrélation car celui-ci peut être caché par celui d'un écho voisin plus puissant (Fig V.2.2f). Le fond n'est alors pas détecté et la mesure d'altimétrie ne prendra pas en compte la couche de vase fluide mais

seulement le sédiment plus compact se trouvant en dessous. Encore une fois, tout dépend de la définition intrinsèque du fond *i.e.* une crème de vase liquide délimite-t-elle le fond réel ?

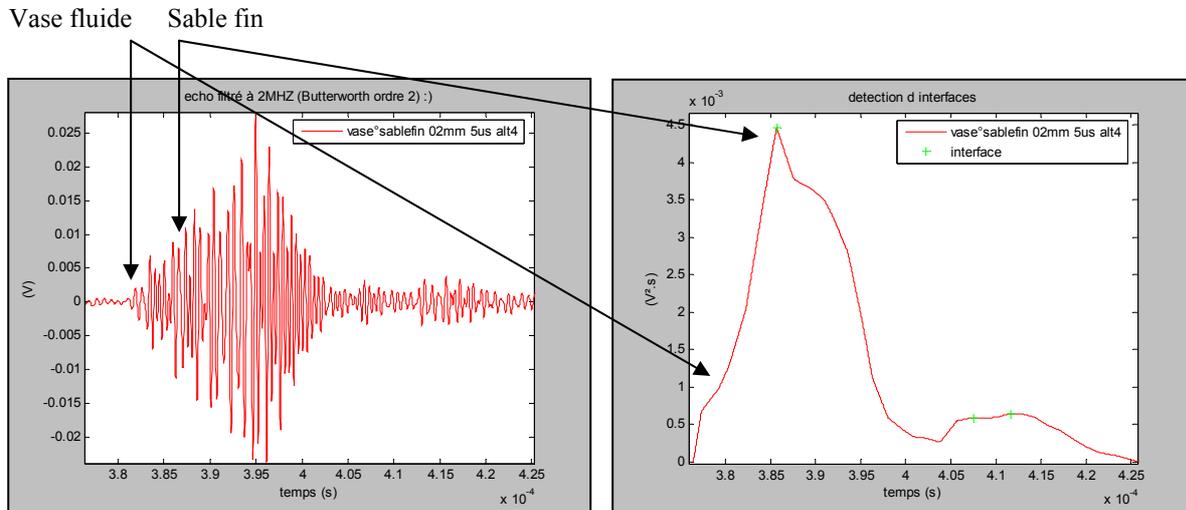


Fig V.2.2f - cas limite où l'observateur peut deviner les 2mm de crème de vase alors que l'algorithme ne détectera que le fond de sable fin.

Pour finir, il convient de souligner que la précision des épaisseurs de couche mesurées souffre aussi de la difficulté de préparer une interface la plus nette possible et d'épaisseur constante (Fig V.2.2g). En particulier, la vase fluide et le sable fin sont facilement remis en suspension lors de l'immersion de la carotte et l'épaisseur mesurée peut alors être plus faible que celle annoncée.

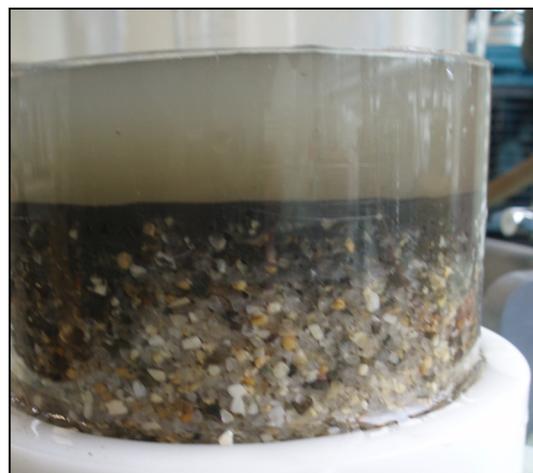


Fig V.2.2g - difficulté d'obtenir une interface nette et régulière dans le cas de vase fluide sur du sable très grossier.

VI. Capacité de l'ALTUS à classifier les fonds marins

VI.1 Etude préliminaire d'un écho

L'écho rétrodiffusé par le fond marin est la somme des contributions de chaque aspérité du terrain. Plus un terrain sera accidenté, plus l'écho sera étalé dans le temps. Pour un terrain lisse, toutes les contributions vont arriver en même temps et se sommer de façon cohérente pour donner un écho bref et puissant.

De manière générale, les échos enregistrés par l'ALTUS se composent de deux parties : l'écho principal et une queue en forme de bosse (Fig VI.1a).

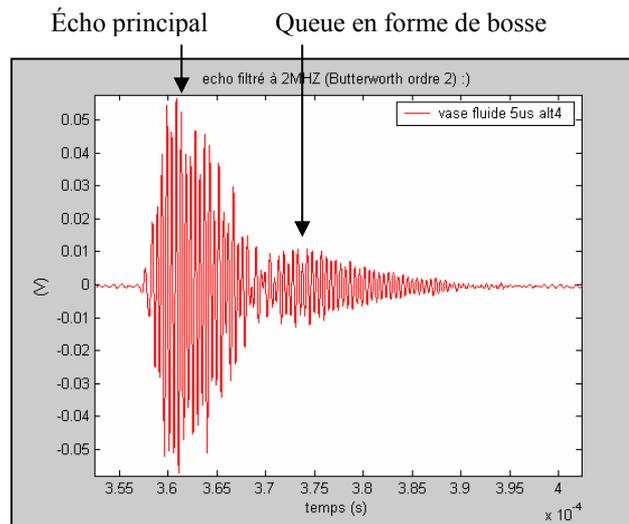


Fig VI.1a - Allure générale d'un écho enregistré par l'ALTUS. On identifie un écho principal et une queue en forme de bosse.

L'écho principal nous permet de calculer l'altimétrie voire d'identifier une interface. En revanche, la queue de l'écho en forme de bosse ne nous fournit que peu d'information et peut être interprétée à tort comme une interface sous la surface du sédiment. Cette deuxième bosse n'est pas observée sur le signal émis et donc correspondrait à un deuxième écho. Pourtant, aucune hypothèse théorique ne permet réellement d'expliquer cette bosse :

- La première hypothèse serait celle d'un lobe secondaire qui enregistrerait un écho issu d'un faisceau oblique qui, après avoir parcouru plus de chemin que l'écho spéculaire, arriverait ainsi juste derrière le premier écho. Deux expériences infirment pourtant cette hypothèse :

La bosse arrivant environ entre 12 et 13 μ s après le premier écho, à la profondeur considérée, ce retard correspond à un angle de 14 à 15° (Fig VI.1b). Or la mesure de directivité effectuée en bassin acoustique ne révèle aucune esquisse de lobe secondaire pour ces valeurs angulaires.

De plus, d'après la formule (Fig VI.1b), l'écart entre les deux échos devrait augmenter avec la profondeur. Pour un angle de 15°, un écart de 20 cm conduirait à un retard supplémentaire de 5 μ s. Or, des essais sur une fine plaque en inox immergée à différentes profondeurs ne montrent aucune dépendance à la profondeur.

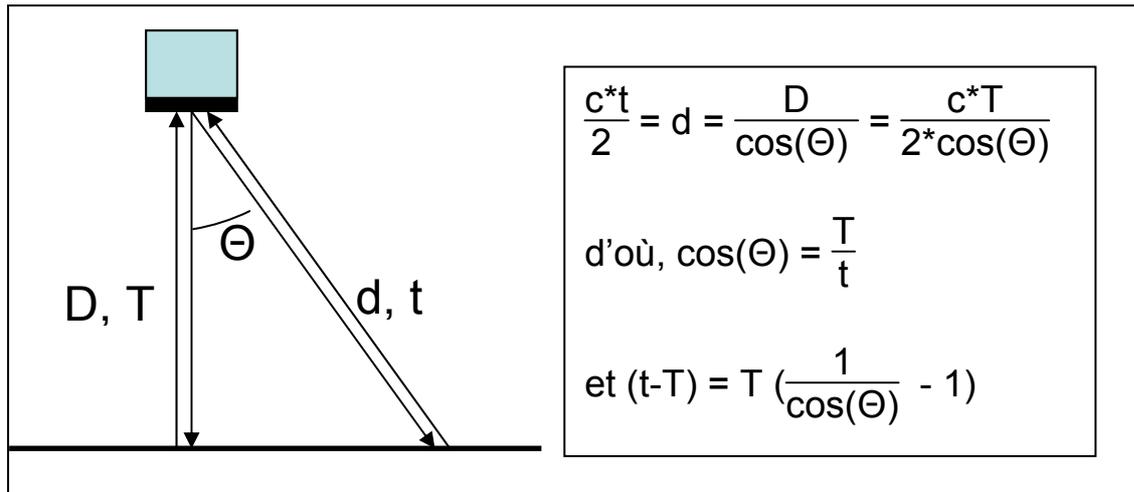


Fig VI.1b Calcul du lobe secondaire Θ en fonction des temps d'arrivée et loi d'évolution de l'écart entre les deux échos en fonction de la profondeur.

- Il pourrait également s'agir d'un écho parasite dû à une réflexion sur un bord de la carotte ou sur une paroi de la colonne. Là encore, le retard devrait être influencé par la profondeur d'immersion. Par ailleurs, on observe cette bosse même sur une simple plaque en inox immergée donc il ne peut s'agir d'un rebord de la carotte. Quant aux parois de la colonne d'eau, non seulement le transducteur n'est pas centré pour éviter justement une contribution constructive de ce genre de réflexions parasites, mais on observe également que la présence d'obstacles entre le trajet transducteur-cible et la paroi n'influe d'aucune manière sur cette bosse.

De même, on pourrait envisager l'hypothèse que ce soit une réflexion parasite contre l'interface air-eau. Mais le niveau de l'eau i.e. la distance transducteur-surface n'influe pas non plus sur la présence de cette bosse.

Après ce bref commentaire sur la forme générale de l'écho, nous allons nous intéresser à comment les différencier selon le type de fond marin.

VI.2 Principe de l'analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) ou « Principal Components Analysis » (PCA) est une méthode mathématique d'analyse de données qui vise à rechercher les directions de l'espace qui représentent au mieux un jeu de données. Elle est notamment utilisée afin de représenter de façon optimisée (au sens du maximum de la variance projetée) des données de dimension n dans un espace à trois dimensions.

En particulier, cet algorithme est utilisé par QTC-View pour identifier un fond marin à partir de sa signature acoustique. Nous nous appuyerons également sur cet algorithme afin de monter notre propre classification.

VI.2.1 l'algorithme mathématique

L'ACP est généralement appliqué sur un ensemble de n objets (les échos) décrits par p descripteurs (les mesures géométriques effectuées sur chaque écho).

On travaille donc sur une matrice M de n lignes et p colonnes :

$$M = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \dots & X_{1,p} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n,1} & \dots & X_{n,p} \end{bmatrix}$$

Pour chaque descripteur on calcul une moyenne μ_i et un écart type σ_i ($i=1..p$). Afin d'éviter un déséquilibre entre deux descripteurs de variances très différentes, les variables sont centrées réduites :

$$M = \begin{bmatrix} \frac{(X_{1,1} - \mu_1)}{\sigma_1} & \dots & \frac{(X_{1,p} - \mu_p)}{\sigma_p} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{(X_{n,1} - \mu_1)}{\sigma_1} & \dots & \frac{(X_{n,p} - \mu_p)}{\sigma_p} \end{bmatrix}$$

On définit ensuite la projection du nuage sur une direction u :

$$W_u(M) = \langle M \cdot u \rangle \text{ où } \langle \cdot \rangle \text{ est l'opérateur scalaire.}$$

On cherche alors u maximisant la variance empirique de la projection du nuage de données sur lui-même, à savoir

$$W_u(M)' \cdot 1/n \cdot W_u(M) = u' \cdot [M' \cdot 1/n \cdot M] \cdot u$$

Posons $C = M' \cdot 1/n \cdot M$ de dimension $p \times p$. On note que C est la matrice de corrélation entre les différents descripteurs. Cette matrice est carrée, symétrique et réelle donc diagonalisable dans une base orthonormée. Notons P la matrice de changement de base associé et D la matrice diagonale des valeurs propres λ_i qu'on range par ordre décroissant ($i=1..p$).

La variance de la projection s'écrit donc :

$$W_u(M)' \cdot 1/n \cdot W_u(M) = u' \cdot [P' \cdot D \cdot P] \cdot u = (P \cdot u)' \cdot D \cdot (P \cdot u)$$

Posons $v = (P \cdot u)$. On cherche donc le vecteur unitaire v qui maximise $v' \cdot D \cdot v$. On peut rapidement vérifier qu'il suffit de prendre le premier vecteur unitaire pour obtenir $v' \cdot D \cdot v = \lambda_1$, où λ_1 est la plus grande des valeurs propres. De proche en proche, les vecteurs unitaires suivants (orthogonaux deux à deux et normés) définissent à leur tour les projections les plus optimisées. Ce résultat peut être démontré plus formellement à l'aide d'un multiplicateur de Lagrange. On remonte ensuite au vecteur u par la relation $u = P' \cdot v$. P étant une matrice orthogonal et v unitaire, u est également unitaire. On peut donc écrire la relation suivante :

$$u_i' \cdot [P' \cdot D \cdot P] \cdot u_i = \lambda_i \iff [P' \cdot D \cdot P] \cdot u_i = \lambda_i \cdot u_i$$

Au final, le problème se ramène donc à calculer les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de corrélation C. Les vecteurs u_i sont les combinaisons linéaires des descripteurs qui optimisent la variance de la projection du nuage sur leurs axes.

Pour chaque point (écho) du nuage, on peut alors calculer les coordonnées selon les nouveaux axes par la relation : $A = M \cdot U$ avec $U = [u_1 ; \dots ; u_p]$.

Pour une représentation en trois dimensions, on ne garde que les trois premiers vecteurs u_1 , u_2 et u_3 . On obtient alors une visualisation du nuage de points représentant chaque écho dans l'espace (Fig VI.2). Les regroupements de points permettront d'identifier plusieurs classes d'écho. Ces classes sont ensuite associées avec les différents types de fond testés.

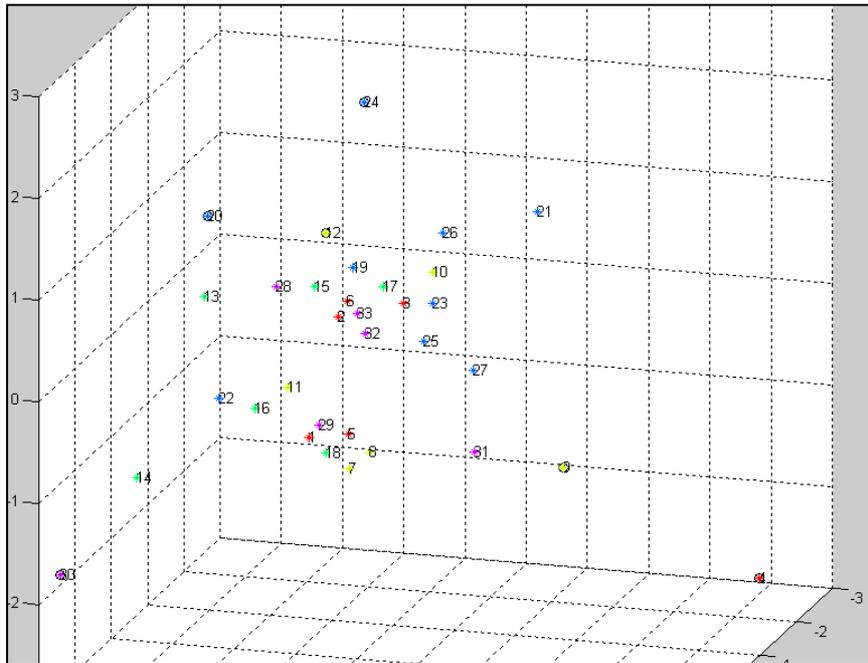


Fig VI.2 visualisation de différents échos dans un espace 3D maximisant la variance du nuage, après application d'une analyse en composantes principales.

VI.3 Résultats de l'Analyse en composantes principales

Nous venons de voir que l'analyse en composantes principales nous permet de visualiser les échos dans un espace 3D et selon des axes maximisant les variances. Dès lors, il devient plus aisé de tenter une différenciation puis une classification des échos selon dans quel secteur de l'espace ils se trouvent.

En effet, l'espace 3D dans lequel sont représentées tous les échos peut être partitionné de telle sorte qu'à chaque secteur corresponde un type de fond marin. Ces secteurs sont déterminés au cours d'une phase de calibration impliquant l'enregistrement d'un certain nombre d'écho « type » pour chacun des types de fond attendus. Après avoir appliqué l'ACP sur tous les échantillons réunis afin de calculer les trois axes principaux, on ne s'intéresse plus qu'aux échos « type » afin de calculer la position moyenne correspondant à chaque type de fond. Dans notre exemple, tous les échos, ont été effectués sur un fond connu donc ont servi à cette calibration.

Pour chaque classe prédéfinie, on effectue une moyenne et on calcule l'écart type sur chaque axe. On peut alors tracer un ellipsoïde centré sur la moyenne est de rayon, sur chaque axe, égal à un écart type.

Afin d'éviter, la prise en compte d'échos déformés ou trop singuliers, on calcule une nouvelle moyenne en négligeant tous les échos « type » se trouvant à plus de $v = 1,65$ fois l'écart type. Pour une répartition Gaussienne, cette valeur correspond à un intervalle de confiance de 95%. Disposant maintenant d'une position moyenne pour chaque classe, on peut alors calculer pour chaque écho enregistré, les distances à chacune de ces positions moyennes. L'écho est ensuite identifié à la classe dont il est le plus proche de la moyenne.

Les résultats de cet algorithme sont variables et dépendent essentiellement du nombre de classes à considérer. On peut également jouer sur le coefficient v déterminant le seuil au-delà duquel les échos « type » sont négligés lors du calcul des positions moyennes par classe.

Pour l'application de cet algorithme, 33 échos ont été enregistrés à $5\mu\text{s}/\text{div}$ dont 6 sur du sable fin, 6 sur du sable grossier, 6 sur du sable très grossier, 9 sur des vases dures (la teneur en eau pouvant varier) et 6 sur des vases molles à fluide.

Sur chaque écho, on mesure 10 paramètres descriptifs : l'étalement temporel total, les étalements temporels à 10%, 50% et 90% du maximum d'énergie, le rapport entre l'étalement à 50% sur celui à 10%, la position du maximum d'énergie sur l'étalement à 10%, les temps de montée et descente entre 10% et 90%, le rapport entre le pic à 2MHz et le pic à 1,3MHz du spectre énergétique et enfin, le pourcentage d'énergie dans les deux premières microsecondes sur l'énergie totale de l'écho.

Dans un premier temps, 5 classes ont été prédéfinies : sable fin, sable grossier, sable très grossier, vase dure et vase molle.

L'ACP permet de définir 5 secteurs différents pour chaque classe. Cependant, comme le montre les sphères se recouvrant mutuellement sur certaines parties (Fig VI.3a), il semble que les écarts type intra-classe soient trop importants et dépassent même quelques fois les distances entre les moyennes de deux classes. De ce fait, les nuages s'intersectent sur une partie non négligeable et un nombre important d'échos seront alors mal classifiés.

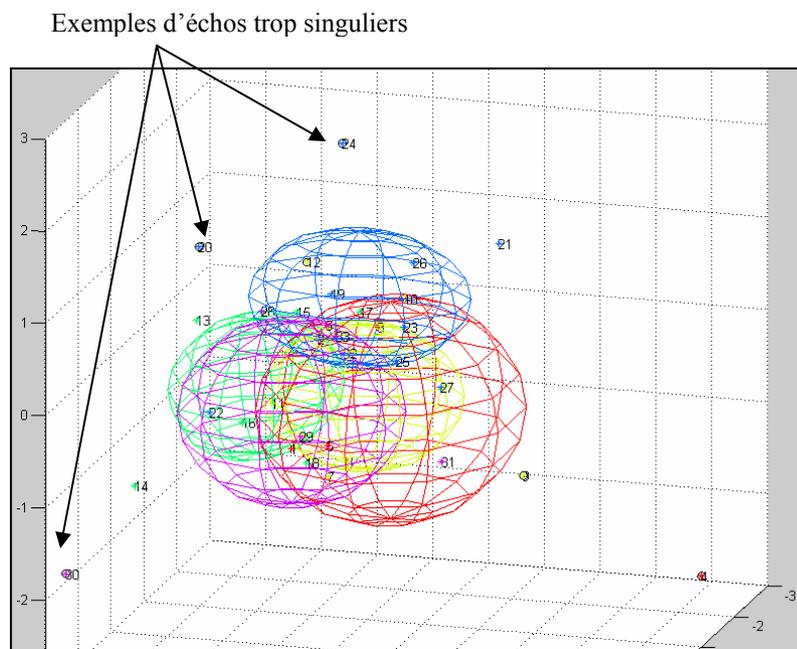


Fig VI.3a - Représentation 3D des 5 classes de fond à départager (rouge = sable fin, jaune = sable grossier, vert = sable très grossier, bleu = vase dure, violet = vase molle). Pour chaque classe un ellipsoïde, de rayon égal à 1 écart type, est centré sur la moyenne. La classification sera peu précise car les ellipsoïdes se recouvrent partiellement.

Les résultats sont évalués pour différentes valeurs du paramètre v .

Tableau VI.a

Classes prédéfinies	$v = 1$	$v = 1,65$	$v = 2$
Sable fin	2/6 (33%)	1/6 (17%)	1/6 (17%)
Sable grossier	3/6 (50%)	2/6 (33%)	0/6 (0%)
Sable très grossier	2/6 (33%)	4/6 (67%)	4/6 (67%)
Vase dure	7/9 (78%)	7/9 (78%)	4/9 (44%)
Vase molle	1/6 (17%)	0/6 (0%)	1/6 (17%)
Total	15/33 (45%)	14/33 (42%)	10/33 (30%)

Avec 5 classes prédéfinies, on avoisine au total les 40% de résultats en accord avec la réalité. Cependant, ce score n'est pas valable pour tous les types de fond. Par exemple, si de bons résultats sont obtenus pour la reconnaissance des fonds type « vase dure », ceux de la vase molle n'excèdent pas 1/6.

On note par ailleurs que les résultats sont meilleurs pour un coefficient v faible. De fait, pour $v = 2$, quasiment tous les échantillons sont utilisés pour calculer les moyennes par classes et les moyennes peuvent être biaisées par la prise en compte d'échos trop singuliers.

La fiabilité des résultats est améliorée en diminuant le nombre de classes. En particulier, on atteint les 70% de réponses favorables quant à la différenciation sable/vase :

Tableau VI.b

Classes prédéfinies	$v = 1$	$v = 1,65$	$v = 2$
Sable	13/18 (72%)	13/18 (72%)	13/18 (72%)
Vase	9/15 (60%)	10/15 (67%)	10/15 (67%)
Total	22/33 (67%)	23/33 (70%)	23/33 (70%)

En utilisant seulement deux classes : une pour le sable et une pour la vase, les nuages de points sont plus facilement individualisables et séparables l'un de l'autre (FigVI.3b).

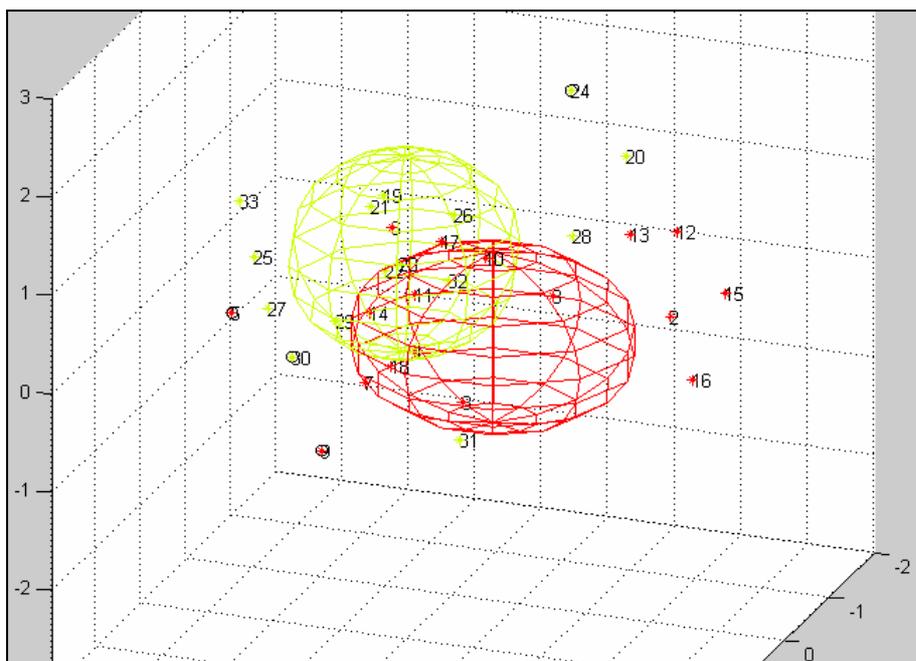


Fig VI.3b - Représentation 3D des échos en deux classes (rouge = sable, jaune = vase). Pour chaque classe, un ellipsoïde, de rayon égal à 1 écart type, est centré sur la moyenne. La classification est correcte à 70%.

Enfin, quelques soient les résultats, cet algorithme demande encore à être calibré puis validé sur un nombre plus important d'écho par classe. En effet, la moyenne empirique d'une classe n'est théoriquement valable qu'à partir d'une trentaine d'échos type. C'est par manque de temps qu'il n'a pas été possible de grossir le nombre d'enregistrements.

Remarque : En pratique, deux alternatives sont possibles pour définir les axes principaux selon lesquels les données sont représentées :

- Soit, comme il est dit dans cet exemple, les trois axes principaux sont calculés par ACP à partir de tous les échantillons (connus et inconnus mélangés) ; puis on définit les moyennes et secteurs en n'utilisant seulement les échos connus (échos « type »). Dans ce cas là, les axes principaux changent selon le set de données à classifier. La variance du nuage de points considéré est alors maximisée.

- Soit, on définit les trois axes et les moyennes par classe de façon définitive. On applique alors l'ACP uniquement sur les échantillons connus. On sauvegarde les vecteurs u_1 , u_2 et u_3 , ainsi que la position des moyennes dans leur système d'axes. La variance du nuage des échos connus est maximisée. Ensuite, pour classifier un écho inconnu, on mesure simplement la valeur de ses descripteurs géométriques et on calcule les coordonnées du point selon les trois vecteurs u_1 , u_2 et u_3 , (qui ne sont qu'une combinaison linéaire de ces descripteurs). En calculant la distance aux moyennes par classe, on associe alors l'écho à la classe dont il est le plus proche de la moyenne. Cette méthode offre l'avantage d'être plus transparente vis-à-vis de l'ACP qui définit les axes et les secteurs uniquement à partir de données connues.

VII. Discussion générale

VII.1 Sur l'altimétrie et la détection d'interface

Après une caractérisation technique détaillée du S-ALTUS, nous avons vu qu'il était possible d'obtenir une mesure d'altimétrie fiable avec moins d'1 millimètre de précision. En revanche, la détection d'interface est moins évidente. De bons résultats sont obtenus pour une couche de vase fluide de 5 à 20mm déposée sur une vase indurée. La précision sur la mesure de la couche est de l'ordre du millimètre. Les autres configurations testées donnent des résultats variables et qui témoignent notamment de la faible pénétration du signal dans les sables.

Toutefois, la précision sur l'altimétrie et la mesure des épaisseurs de couche dépend fortement de l'estimation de la célérité de l'onde pendant son trajet. Si pour l'altimétrie une mesure de la température de surface suffirait, l'évaluation des épaisseurs de couche requiert la connaissance de la nature du fond : en effet, la célérité dans les sédiments peuvent varier de 1480m/s pour une vase fluide à 1780m/s pour un sable très grossier ce qui conduit, aux profondeurs considérées, à une erreur pouvant atteindre 5cm.

Par ailleurs, la précision et la fiabilité de la méthode de détection par maximum de corrélation peuvent être augmentées en améliorant la forme et la régularité du signal. L'idéal serait un signal ne présentant qu'un seul maximum ou du moins assez régulier pour que la fonction d'autocorrélation n'admette pas de maxima secondaires (Fig VII.1). L'élimination de ce genre de maxima parasites permettrait d'améliorer la discrimination de deux échos très rapprochés et donc la détection de couches inférieures à 5mm.

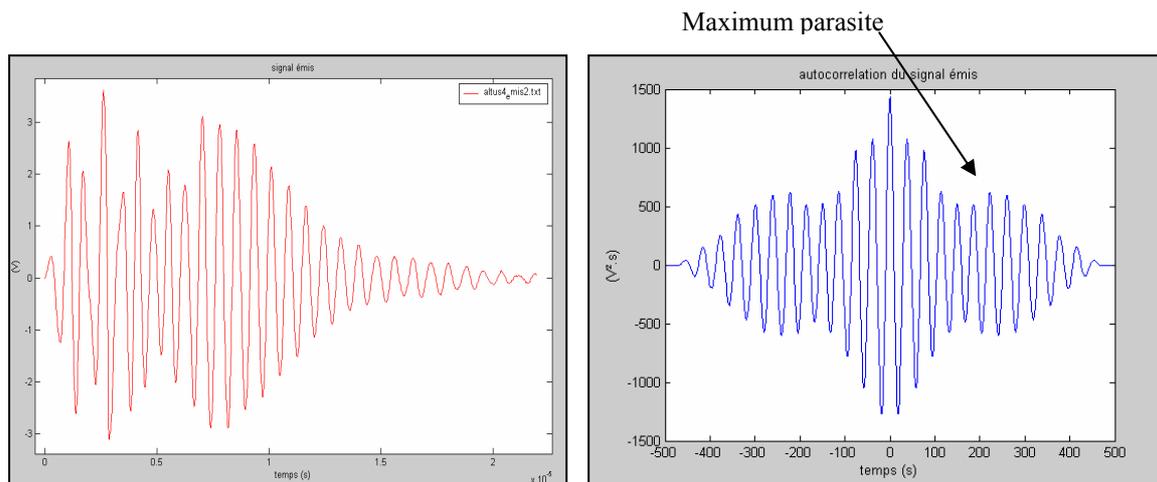


Fig VII.1 Le signal émis, à gauche (rouge), et sa fonction d'autocorrélation à droite (bleue). On remarque, dans cette 2^{ème} courbe, un maximum parasite pouvant biaiser la détection d'interfaces.

D'autre part, les mesures et comparaisons peuvent dans certains cas être biaisées à cause des conditions de préparations des carottes :

En effet, lors de l'immersion des carottes dans l'eau, la surface peut être chahutée et dans certain cas du sédiment est remis en suspension, ce qui diminue l'épaisseur de la couche par rapport à celle théoriquement préparée. C'est particulièrement le cas pour le sable fin et la vase liquide.

D'autres part, lors de la préparation, on maîtrise mal l'apparition d'interfaces ou d'inhomogénéités non voulues. La présence de bulles ou encore l'augmentation progressive de l'épaisseur de la couche supérieure par ajouts successifs, peuvent créer des réflecteurs non souhaités et induire de petits échos. Même si le rôle des ajouts successifs pouvant créer une sorte de stratification, n'est pas réellement démontré, il peut être judicieux de retirer et réhomogénéiser le sédiment avant de déposer une deuxième couche plus épaisse.

Enfin, même s'il est possible d'identifier une interface lorsqu'on sait qu'elle est présente, il reste très difficile de trouver un critère permettant de différencier un écho « avec » une interface d'un écho « sans » interface. En effet, inhomogénéités dans le sédiment, bulles de gaz ou encore débris coquilliers peuvent engendrer de multiples artefacts qui s'apparentent souvent à celui d'une interface entre deux sédiments différents. L'observateur est alors induit en erreur. A cela, il faut rajouter que cette détection est également rendue difficile par une fin de l'écho principal en forme de bosse comme nous avons pu le souligner précédemment.

VII.2 Sur la classification des fonds marins.

La reconnaissance du fond marin à partir de l'écho demande qu'on suppose une relation injective entre la nature du fond et sa signature acoustique. A savoir qu'à un type d'écho, il corresponde un et un seul type de fond. Cependant, on observe une très grande variabilité dans la forme des échos enregistrés par le S-ALTUS. En effet, pour une carotte contenant un type de sédiment, on peut enregistrer plusieurs échos foncièrement différents (Fig VII.2). L'observateur ne sélectionne que l'écho le mieux « formé » mais parmi de nombreux écho plus irréguliers, plus faibles ou plus allongés. Certains échos peuvent être considérablement déformés par des configurations particulières du micro-relief ou par interaction destructive de deux échos successifs. Il est alors bien difficile de définir une forme d'écho standard associée au sédiment considéré, qui soit, en plus, différente des autres types

de sédiment. Cette variabilité problématique est notamment illustrée dans la superposition des nuages de points même après une analyse en composantes principales (ACP).

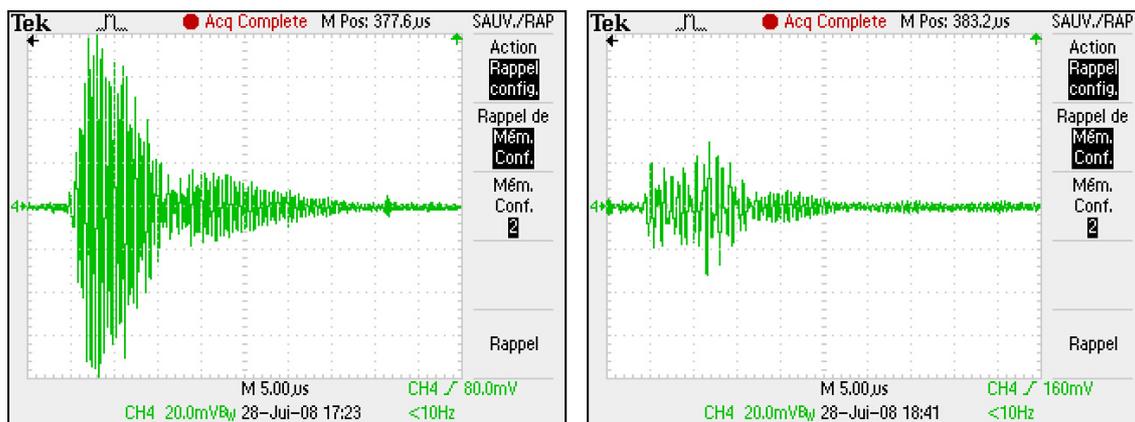


Fig VII.2 Illustration de la variabilité naturelle des échos : Ces deux enregistrements ont été effectués sur une même carotte de vase fluide et homogène à environ 1cm l'un de l'autre. Ils font donc partie de la même classe.

Il semble que l'allure de l'écho soit très dépendante de l'état de surface et du micro-relief local. On peut voir que, pour une même carotte, le niveau d'énergie enregistré varie facilement du simple au double. Vu la forte directivité du sondeur, il est possible que la pente locale influe sur la direction de l'onde spéculaire réfléchi qui atteint partiellement ou non le transducteur. Par ailleurs, aux échelles et longueurs d'onde considérées, il faut également penser que les bulles de gaz prisonnières dans le sédiment de surface peuvent perturber les niveaux d'écho de façon non négligeable. En pratique, suivant l'écho sélectionné, on peut facilement observer une réponse d'une vase molle plus énergétique que celle d'un sable. Une étude menée en Océan Indien a même montré que certains changements de réflectivité ne provenaient pas du sédiment de surface mais des processus à l'origine des dépôts (*Garlan*). Cette forte variabilité dans les niveaux d'énergie nous interdit donc une approche de type RoxAnn. C'est pourquoi notre stratégie fut plutôt de décrire chaque écho à partir de mesures totalement intrinsèques.

De manière générale, la forte variabilité des échos du S-ALTUS est d'autant plus problématique, qu'une fois sur son châssis, il nous est impossible d'effectuer une moyenne spatiale qui aurait permis de réduire la sensibilité au micro relief local. Une alternative à envisager serait alors d'augmenter l'ouverture du sondeur et donc la surface de la zone insonifiée.

La démarche adoptée pour la classification s'appuie sur dix paramètres descriptifs calculés à partir de l'écho principal. Une analyse séparée des variables fut infructueuse tandis que l'utilisation de l'algorithme d'analyse en composantes principales (ACP) a permis finalement de mettre en évidence les classes de sédiment que l'on pouvait discriminer. S'il est pour l'instant illusoire de discriminer sept classes de sédiment, l'algorithme permet de différencier un sable d'une vase avec une fiabilité de 70%. Néanmoins, Il restera toujours des cas ambigus : Par exemple, un grand étalement temporel de l'écho peut être dû à la rugosité d'un sable qui va rétrodiffuser à de fortes incidences, autant qu'à la forte pénétration dans une vase molle. Par ailleurs, cet algorithme a été testé sur 33 enregistrements et demande à être validé sur une centaine d'échantillons afin que les moyennes empiriques de chaque classe soient totalement fiables.

Enfin, au cours de l'étude, il a également été tenté de suivre le tassement d'une vase en fonction des réponses acoustiques enregistrées régulièrement sur une semaine. L'absence de

résultats de ce suivi peut s'expliquer par le fait que le tassement se manifeste d'abord par le bas de la carotte et donc n'affecte pas la signature acoustique qui ne prends en compte que les deux premiers centimètres sur les neuf que contenait la carotte. De plus, nous avons vu que la variabilité des signaux permettait difficilement de différencier une vase molle d'une vase un peu plus indurée.

VII.3 Les perspectives d'évolution.

En fonction des attentes de l'utilisateur, certaines améliorations peuvent être apportées au S-ALTUS et à son exploitation. En effet, s'il est envisageable d'enregistrer l'intégrale de l'écho alors on peut lui appliquer un traitement similaire à celle mise au point pendant notre étude.

- Il peut être notamment judicieux d'augmenter l'ouverture du sondeur afin de prendre en compte une surface la plus grande possible et masquer un tant soit peu la variabilité naturelle des échos. On peut alors réduire le diamètre du transducteur ou abaisser la fréquence. Néanmoins, ce genre de modification pourrait dégrader la précision de l'altimétrie.

- Ensuite, le rajout d'une sonde de température permettrait d'augmenter considérablement la précision de l'altimétrie et donc de la mesure des quantités érodées ou déposées.

- Enfin, en vue d'une analyse des échos, l'utilisateur a besoin d'un signal émis qui soit le plus régulier possible. En particulier, une détection par maximum de corrélation s'appliquerait mieux sur un signal dont la fonction d'autocorrélation ne possède qu'un seul maximum (en 0).

De façon plus pratique, il serait également souhaitable que, dans la mesure du possible, le signal émis soit le même d'un S-ALTUS à l'autre.

Pour finir, on peut envisager de se rapprocher d'une démarche de type RoxAnn en évaluant la rugosité à partir d'un écho à forte incidence. Un deuxième transducteur, branché sur le même module, mais formant un angle d'environ 20° avec la verticale pourrait être monté sur le châssis. Nous obtiendrions ainsi des informations supplémentaires qui permettraient à terme d'affiner notre classification du sédiment de surface.

CONCLUSION GÉNÉRALE

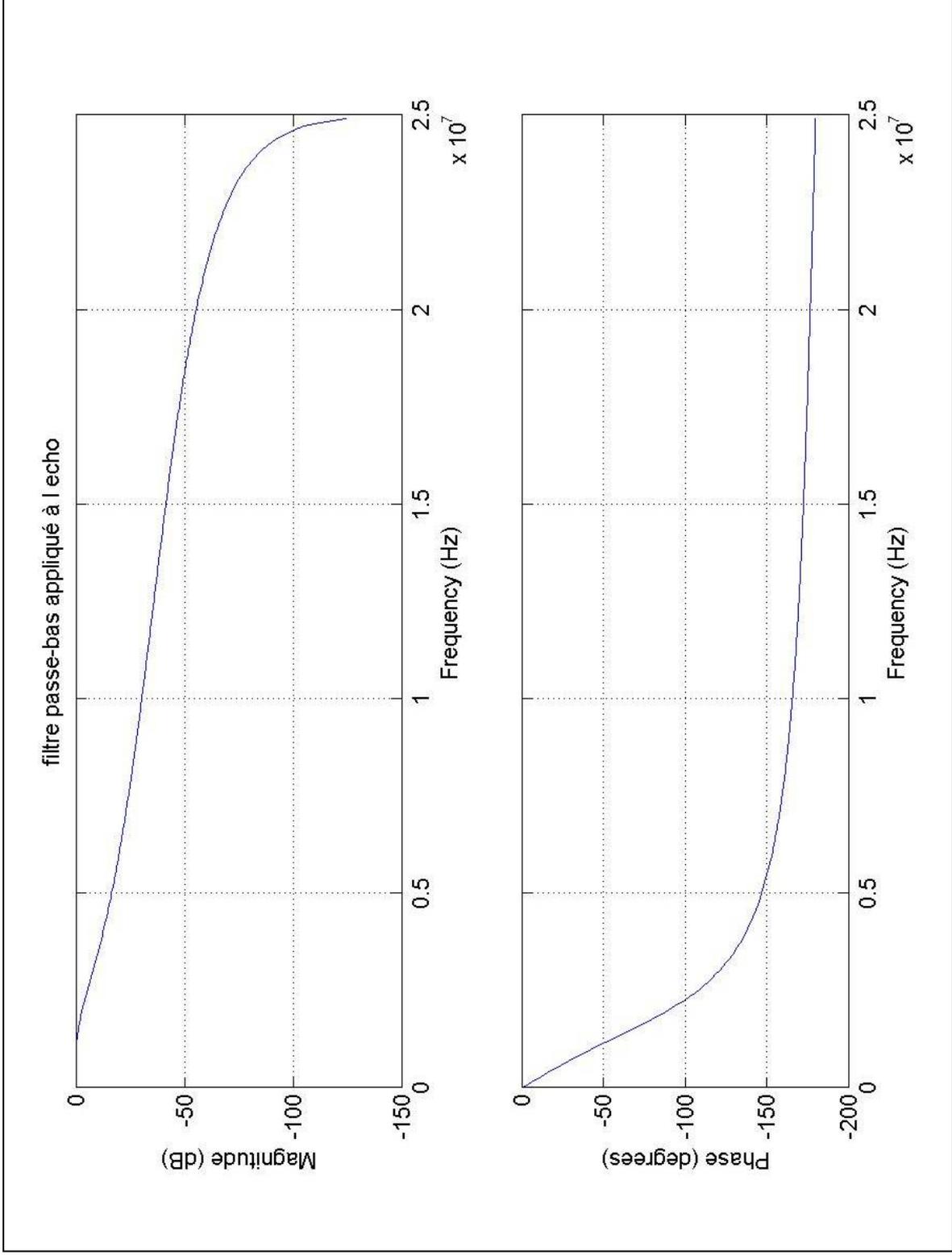
Ce travail de recherche a non seulement permis une caractérisation technique approfondie de l'altimètre acoustique S-ALTUS, mais également d'évaluer ses capacités à, d'une part, mesurer une couche de sédiment superficiel, et d'autre part, identifier le type de fond insonifié. Des écarts notables ont été observés entre les caractéristiques techniques annoncées par le constructeur et les valeurs mesurées en bassin acoustique. Une étude approfondie du signal émis a ensuite autorisé l'analyse des échos rétrodiffusés par différents types de fonds marins et différentes configurations d'interfaces (vase fluide sur vase dure, sable fin sur sable grossier, etc...). Une méthode par corrélation des deux signaux permet de mesurer l'altimétrie avec une bonne précision, et dans certains cas, l'épaisseur d'une couche superficielle. Enfin, Après calcul, sur chaque écho, de plusieurs descripteurs géométriques intrinsèques, une analyse en composantes principales (ACP) facilite la représentation des signaux dans un espace 3D et l'identification des classes pouvant être discriminées. Sur nos échantillons, seule la classification entre deux classes « sable » et « vase » s'est révélée suffisamment fiable avec un taux de réussite à 70%.

Les pistes proposées lors de cette étude ne sont pas exhaustives et l'enregistrement intégral des signaux chez une nouvelle génération de S-ALTUS, pourrait bien fournir d'autres informations. Toutefois, l'exploitation de celui-ci serait simplifiée par l'émission d'un signal plus « régulier » et identique d'un sondeur à l'autre. À terme, l'utilisation d'un algorithme de classification validés sur un grand nombre d'échantillons, pourrait apporter à l'utilisateur de précieux indices sur la nature des dépôts. Cependant, à l'instar des systèmes RoxAnn et QTC-View, les données du S-ALTUS ne sauraient être fiables à 100% et nécessiteront toujours d'être validées par des prélèvements *in situ*.

Références :

- Bassoullet Ph., Le Hir P., Gouleau D., Robert S., (2000) Sediment transport over an intertidal mudflat : field investigations and estimation of fluxes within the “Baie de Marennes-Oleron” (FRANCE)
- Deloffre J., Verney R., Lafite R., Lesueur P., Lesourd S., Cundy A.B., 2007, Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries : Sedimentation rhythms and their preservation
- Ehrhold A., 2003, L’application des Systèmes Acoustiques de Classification Automatique des natures de Fonds pour la cartographie des habitats : SACLAF
- Ellingsen K. E., Gray J.S., and Bjørnbom E., 2002, Acoustic classification of seabed habitats using the QTC-View System
- Garlan T. EPSHOM/CMO/REC, Expression acoustique des caractéristiques sédimentaires
- Hamilton E.L., 1980, Geoacoustic modelling of the sea floor, In J. Acous. Soc. Am. 68/51, 1313-1340
- Jackson D.R., Winnebrenner D.P., Ishimaru A., 1986, Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering, In J. Acous. Soc. Am., 79(5), 1410-1422
- Kibblewhite A.C., 1989, Attenuation of sound in marine sediments : a review with emphasis on new low-frequency data, In J. Acous. Soc. Am., 86(2), 716-737
- Kvitek R., Iampetro P., Sandoval E., Castleton M., Bretz Carrie, 1999, Final report – Early Implementation of Nearshore Ecosystem Database Project
- Le Hir P., 2006, Aide mémoire de Dynamique Sédimentaire
- Lurton X., 2005a, Formulaire des équations du sonar
- Lurton X., 2005b, Systèmes Sonar de Cartographie - Module Instrumentation Sous-Marine
- Maa J.P.-Y., Lee D.-Y., 2002, A Preliminary Study on Using Acoustic Waves to Measure High Resolution Marine Sediment Bed Structure, In Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment, eds: J.C. Winterwerp and C. Kranenburg, Elsevier Science
- Pouliquen E., Lurton X., 1994a, Identification de la nature des fonds marins à l’aide de signaux d’écho-sondeurs –I. Modélisation d’échos réverbérés par le fond, In Acta Acustica 2(1), 113-126
- Pouliquen E., Lurton X., 1994b, Identification de la nature des fonds marins à l’aide de signaux d’écho-sondeurs –II. Méthode d’identification et résultats expérimentaux, In Acta Acustica 2(1), 187-194
- Verney R., Deloffre J., Brun-Cottan J.-C., Lafite R., 2007, The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats : Impact of boat traffic and wind

ANNEXES



Annexe 1 : Diagramme de Bode du filtre de Butterworth d'ordre 2 ($f_c=2\text{MHz}$), utilisé pour le filtrage de l'écho

ALTUS

Silt measurement in bays and estuaries



ALTUS, an accurate submersible recording altimeter which allows:

- study of mudflats or beach level variations according to tidal currents, swell, ...
- evaluation of the sedimentation rate or the erosion rate.

Product developed in cooperation with Ifremer.

nke
INSTRUMENTATION

info.instrumentation@nke.fr



ALTUS

This device is specifically designed for shallow waters and mainly muddy environments to precisely quantify short or long term changes of a bottom elevation at a location where deposition or erosion occurs. These measurements are of great interest for hydrosedimentological studies in order to validate numerical models.

Altus can be very useful to control harbour silting up phenomenon and enables to estimate the quantity of sediments to be dredged.

Principle:

Altus is a high frequency acoustic submersible recording altimeter.

It is based on a 2 MHz echo sounder which transducer is located on a light frame at a given distance from the bed. This frame avoids any sediment scouring in the measurement area. A separate container includes altimeter electronics, data logger, pressure sensor and energy.

Main features:

- ? 4 programmable detection thresholds giving four altitude measurements at the same time, depending of the sedimentation state.
- ? Millimetric measurements of the elevation changes of the seabed.
- ? Recorded parameters : 4 distances from seabed, one « maximum echo » value to validate the data, one absolute pressure for water height.
- ? Altus is small sized and can be easily deployed by hand.
- ? A specific stand for transducer can be provided.

TECHNICAL SPECIFICATIONS	
Designation	ALTUS
Order code	60-07-024
Altitude : range	20 to 200 cm
resolution	0.6 mm
accuracy	2 mm , for range 20 to 70 cm 5 mm , for range 20 to 200 cm
acoustic frequency	2 MHz with 3.6° at -3dB beam width
Water height range :	0 to 20m (maximum submersion 30m)
accuracy	8 cm (resolution 2 cm)
Time	Internal clock with calendar
Automatic starting	On/off controlled by water pressure
Sample rate	Programmable from 1second to 99 hours
Memory Autonomy :	2 to 3 months, sampling rate 15 mn.
Energy Autonomy :	up to 4 years, sampling rate 15 mn. (Lithium batteries can be replaced by user).
Mechanical features :	
casing	Length 240mm diameter 80 mm max.
tip	Length 300mm diameter 20 mm
transducer enclosure	length 300mm diameter 58 mm
cable	length 5.5 m diameter 9mm
Total weight	2.6 kg

nke

INSTRUMENTATION

Rue Gutenberg Z.I. Kérandré
56700 HENNEBONT FRANCE
Tel: (33) 02 97 36 10 12
Fax : (33) 02 97 36 55 17
Email : info.instrumentation@nke.fr

DISTRIBUTOR



Hydrophone TC4035

Broad Band Miniature Probe Hydrophone



- Reference hydrophone for high frequencies
- Linear receiving response from 100kHz to 500kHz
- Long term stable sensitivity
- Individually calibrated
- Calibration as standard reference hydrophone traceable to national standards established at NPL

TC4035

The TC4035 is a miniature probe hydrophone specifically designed as a standard reference hydrophone for sound measurements in the frequency range 100 to 500kHz.

The hydrophone incorporates a 10dB low-noise pre-amplifier, which includes an insert calibration circuit for convenient electrical testing of the hydrophone condition. The pre-amp has a drive capability for cable length up to 25 meters.

The hydrophone offers a useable frequency range from 10 to 800kHz with good omnidirectional characteristics in the horizontal and the vertical plane.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Receiving Sensitivity Typical:	-214dB \pm 2dB re 1V/ μ Pa (at 100kHz)
Linear Frequency Range:	100kHz to 500kHz \pm 3dB
Usable Frequency Range:	10kHz to 800kHz
Horizontal Directivity:	Omnidirectional \pm 2dB (at 250kHz)
Vertical Directivity:	60° to 120° \pm 3dB (at 250kHz)
Operating Pressure:	300m
Survival Pressure	400m
Max. Sound Pressure:	-4dB distortion level 210dB re 1 μ Pa at 12V supply
Equivalent noise:	80dB re 1 μ Pa (\sqrt{H} at 1 kHz)
Weight (in air):	410 grams (LEMO receptacle incl.)
Max. Output Voltage :	1 Vrms at 12VDC 2Vrms at 24VDC
Operating Temperature Range:	-2°C to +40°C
Storage Temperature Range:	-30°C to +50°C
Supply Voltage:	10VDC to 24VDC
Preamplifier Gain:	10dB
Output Drive Capability:	25m cable at 1M Ohm input
Insert cal. attenuation:	-30dB
Quiescent Current:	15mA at 12VDC 20.5 mA at 18VDC
Housing Material:	Stainless Steel AISI 316
Cable:	Standard 10m 4 cond.+ shielded Optional cable lengths available on request
Connector:	LEMO Series E four-pole watertight





Hydrophone TC4035

Broad Band Miniature Probe Hydrophone

The sensor element is permanently encapsulated in high density polyurethane to ensure long term reliability. The strain relief and outer jacket of the cable is also made of high density polyurethane.

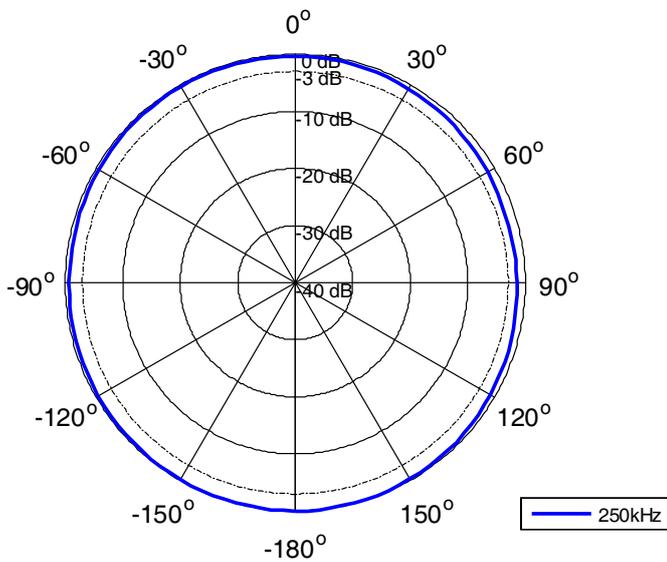
4035 can be used in sea or fresh water.

Documentation: Horizontal directivity:
At 250 kHz

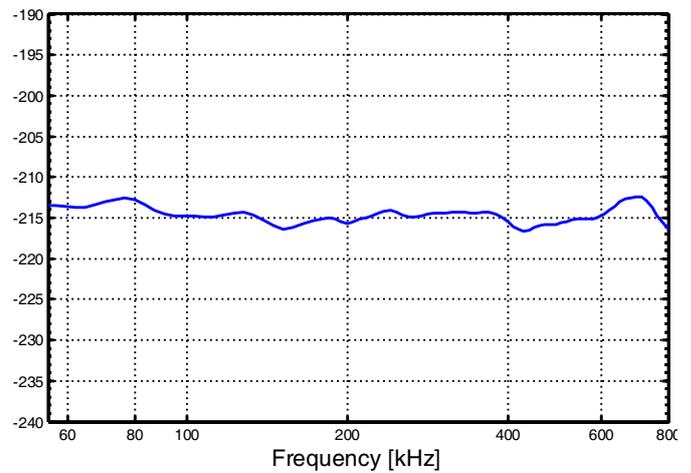
Receiving sensitivity:
50 kHz to 800 kHz

Vertical directivity:
At 250 kHz

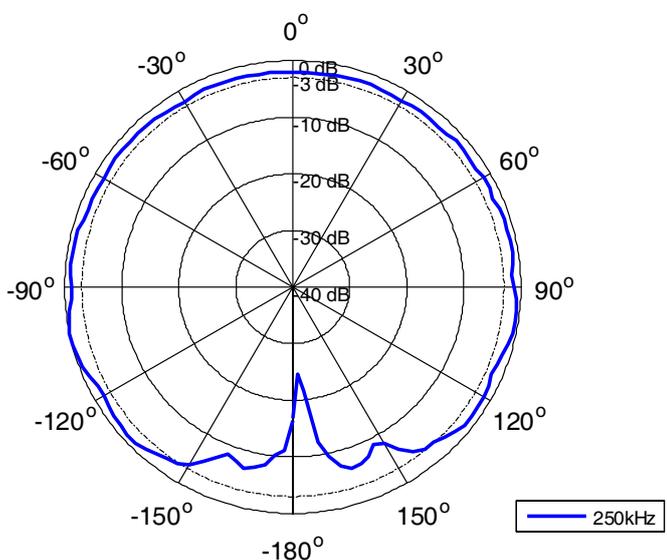
Horizontal directivity pattern



Receiving Sensitivity [dB re 1V/ μ Pa @ 1m]



Vertical directivity pattern



Accessories included: LEMO fixed socket no. ERA.1E.304.CNL

The TC4035 is a high quality hydrophone designed for use as a transfer standard hydrophone. The sensor element has excellent stability over time, - which ensure reliable sensitivity over long periods.

Connecting the TC4035: The TC4035 is supplied with a 4-pole LEMO plug and a receptacle for individual panel mounting.

The EC6073 input module is a universal junction unit for connections of hydrophones. The TC6073 is equipped with the connectors required for: input output, voltage supply and insert calibration signal.

Insert voltage calibration: The insert calibration is an electrical simulation of a signal received from the acoustic sensor element.

Injecting a signal to the calibration line input performs insert calibration. The responding signal received on the hydrophone output terminal is attenuated -30 dB typical.

The recommended max. insert voltage signal for TC4035 is 2 Vpp.

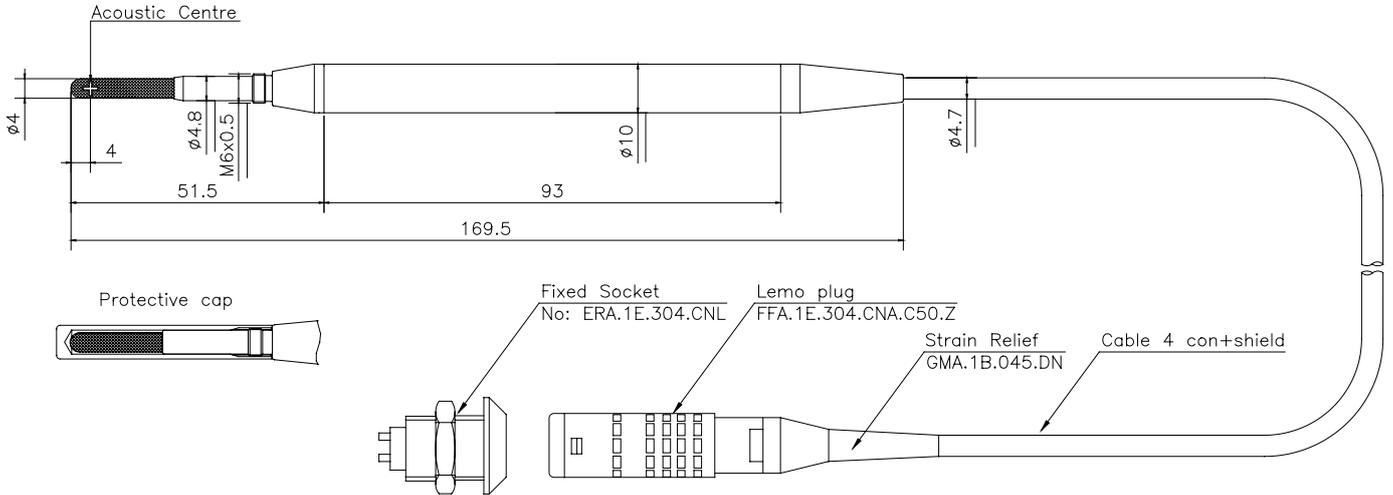
WARNING! Exceeding the recommended calibration voltage may cause damage to the calibration resistor.



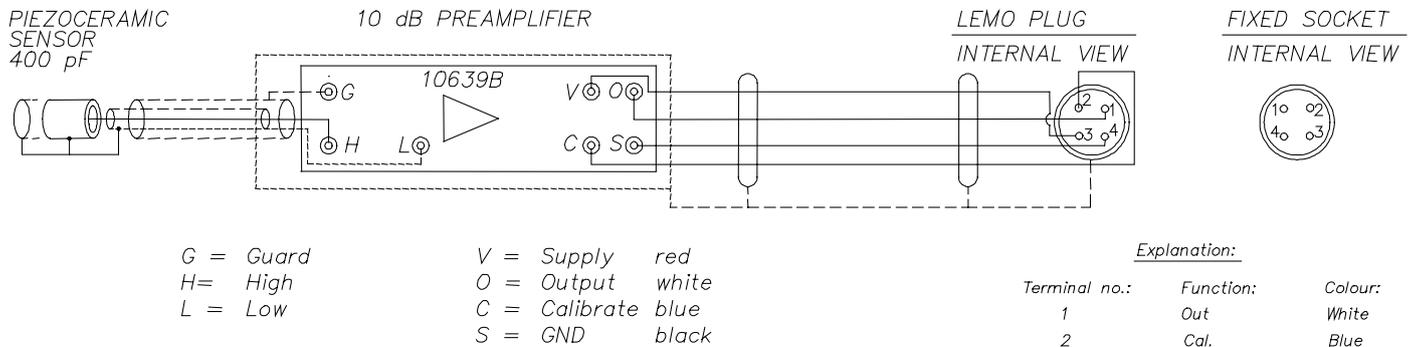
Hydrophone TC4035

Broad Band Miniature Probe Hydrophone

Outline Dimensions



Wiring Diagram



RESON reserves the right to change specifications without notice. © 2005 RESON A/S
 For Acoustical Measurement Accuracy please refer to www.reson.com or contact sales.

RESON A/S
 Denmark
 Tel: +45 4738 0022
 E-mail: reson@reson.dk

RESON Inc.
 USA
 Tel: +1 805 964-6260
 E-mail: sales@reson.com

RESON Offshore Ltd.
 United Kingdom
 Tel: +44 1224 709 900
 E-mail: sales@reson.co.uk

RESON GmbH
 Germany
 Tel: +49 431 720 7180
 E-mail: reson@reson-gmbh.de

RESON B.V.
 The Netherlands
 Tel: +31 (0)10 245 1500
 E-mail: info@reson.nl

RESON Mediterranean SRL
 Italy
 Tel: +39-051-572-643
 E-mail: info@reson.it

Résumé. – L'enregistrement de l'intégralité des échos mesurés par le sondeur autonome S-ALTUS pourrait apporter plus d'informations que la simple mesure de l'altimétrie. L'objectif de cette étude est d'évaluer les potentialités du S-ALTUS à identifier la nature du sédiment de surface et à détecter une couche superficielle de sédiment à partir de la forme du signal.

Une mesure précise des caractéristiques techniques de l'ALTUS (forme du signal émis, fréquence et directivité) a été effectuée en bassin acoustique. La mise au point d'un dispositif expérimental a permis ensuite de recueillir le signal brut réfléchi par le fond voire les premiers centimètres de sédiment.

Un ensemble d'enregistrement a été mené sur différentes épaisseurs de couche d'un sédiment sur un autre (sable fin sur sable grossier, vase fluide sur sable, vase fluide sur vase endurée, sable sur vase indurée, etc...). La corrélation entre le signal émis et l'écho réfléchi permet une bonne mesure de l'altimétrie et, dans certains cas, de détecter plusieurs échos successifs rapprochés permettant, par exemple, d'identifier une couche de vase fluide sur une vase plus endurée ou du sable.

Ensuite, les réponses acoustiques de différents types de sédiments seuls (sable fin, grossier, très grossier, vase fluide, dure,...) sont comparées et des paramètres permettant de décrire le signal (niveau d'énergie, étalement temporel, temps de montée,...) sont mesurés afin fournir quelques indices sur la nature du sédiment de surface. En dépit d'une forte variabilité des signaux, une analyse en composantes principales (ACP) permet tout de même de différencier un fond sableux d'un fond vaseux avec un taux de réussite de 70%. Cet algorithme demande cependant à être validé sur un nombre plus important d'échantillons.

Bien qu'aucun résultat simple ou déterminant ne fut mis à jour au cours du stage, il est intéressant de constater la complexité du problème envisagé qui appelle à coup sûr une poursuite plus approfondie de cette étude.

Abstract. – Beyond the simple measurement of the altimetry, the recording of the whole signal of the echoes measured by the autonomous sounder S-ALTUS may lead to extra information about the superficial sediment. This study wants to assess the potency of the S-ALTUS to identify the nature of the bottom sediment and also to detect a superficial layer using the shape of the signal.

An accurate measurement of the technical attributes of the S-ALTUS was carried out in an acoustic pool. Then, few tests were made on different thickness of a first sediment layer set on an other sediment base (fine sand on coarse sand, soft mud on sand, soft mud on hard mud, sand on hard mud, etc...). A cross-correlation between the emitted signal and the backscattered echo sometimes allows detecting two successive echoes and then measuring a layer thickness in particular in the case of soft mud on hard mud or sand.

The echoes backscattered from different types of sediment were also recorded and compared in order to determinate relevant criteria (energy, length of the signal, rising front,...) which would help to differentiate them from one another. In spite of the high variability of the echoes, a Principal Components Analysis (PCA) allowed to differentiate sand from mud in two cases out of three. However, this algorithm needs to be validated using more data.

Even though no simple and decisive results were found during this study, it is interesting to become aware of the complexity of the considered issue which surely needs to be continued.