

**Laboratoire Modélisation Numérique et Couplages**

**THESE**

Présentée par

**Christophe VIALA**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR EN SCIENCES**

**de l'Université de Toulon et du Var**

Spécialité : Mécanique

Option : Acoustique

---

**Inversion géoacoustique temps réel de  
signaux large bande par grands fonds**

---

Soutenue le 14/12/2007 devant la commission d'examen constituée de :

M M. ASCH	Professeur. Université de Picardie Jules Verne.	Directeur de thèse
M JP. HERMAND	Professeur. Université Libre de Bruxelles. Belgique	Rapporteur
M JP. SESSAREGO	Directeur du Laboratoire Ultrasons. LMA Marseille	Rapporteur
M Y. STEPHAN	Ingénieur de recherche. EPSHOM Brest	Examineur
M M. SAILLARD	Professeur. LSEET. Université de Toulon et Var	Examineur
M D. FATTACIOLI	Ingénieur. CTSN Toulon	Invité

## Résumé court

---

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à développer une méthode globale d'inversion des paramètres géoacoustiques par grands fonds, dans le cadre du REA (Rapid Environmental Assessment : Evaluation Rapide de l'Environnement)) acoustique opérationnel. La méthode développée utilise du Matched Impulse Response de signaux large bande. La finalité est de renseigner les sonaristes opérationnels du domaine de la lutte anti sous-marine sur les paramètres du fond, afin qu'il puissent améliorer l'évaluation des performances de leurs senseurs acoustiques. Ces travaux doivent fournir des enseignements utiles à la conception du prototype futur de REA acoustique STEREO de l'EPSHOM/CMO. La validation du concept s'opère dans cette thèse après la mise en place d'une démarche globale d'inversion basée sur l'ajustement des réponses impulsionnelles mesurées en transmission et des réponses impulsionnelles simulées par un modèle prenant en compte les paramètres du fond. Deux étapes d'inversion sont nécessaires visant à retrouver d'une part la configuration expérimentale puis ensuite les caractéristiques de la nature du fond. La méthode d'inversion développée est appliquée de façon quasi-automatisée à un jeu de données synthétiques complexes, élaborées à partir d'un simulateur temps réel de la propagation acoustique. Les essais sur données synthétiques permettent tout d'abord de valider la faisabilité de la méthode quant à ses performances de détection d'une transition horizontale de la porosité, et quant au respect de la contrainte opérationnelle du délai d'estimation. Ils permettent de qualifier de plus l'impact de l'effet Doppler sur les performances de l'inversion. Celle-ci est ensuite testée sur un jeu de données acoustiques et environnementales réelles mis à disposition par le Centre Militaire d'Océanographie de l'EPSHOM. Ces données correspondent à la campagne de REA HERACLES qui a eu lieu par grands fonds, cas défavorable pour l'inversion en raison du faible contenu informatif des signaux. La prise en compte d'un modèle numérique de terrain dans la méthode d'inversion permet de d'inverser un milieu évolutif avec la distance et de synthétiser l'ensemble des résultats de l'inversion des données d'une campagne typique de REA. Ces travaux permettent de dégager des configurations pour lesquelles l'inversion peut fonctionner en temps réel, ce qui valorise le principe de la méthode développée et les développements réalisés.

## Mots clefs

---

Inversion géoacoustique	Signaux large bande	REA acoustique
Temps réel	Grands fonds	Matched Impulse Response
Exploration exhaustive	Simplex	Rayons
Modèle numérique de terrain	Milieu évolutif	

## Résumé long

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à développer une méthode globale d'inversion afin de valider le concept de REA acoustique opérationnel sur de l'inversion géoacoustique de signaux large-bande en temps réel par grands fonds. La finalité est de renseigner les sonaristes opérationnels du domaine de la lutte anti sous-marine sur les paramètres du fond, afin qu'il puissent améliorer l'évaluation des performances de leurs senseurs acoustiques.

Nous reprenons l'approche large bande prometteuse actuellement utilisée dans la communauté scientifique [Hermand 1995] [Le Gac 2003]. Cette approche, dite de type Matched Impulse Response (méthode de type MIR) est basée sur l'ajustement des réponses impulsionnelles mesurées et des réponses impulsionnelles simulées par un modèle prenant en compte les paramètres du fond. Le résultat de cet ajustement permet de décrire un milieu équivalent fournissant la même réponse acoustique que le milieu réel [Demoulin et al 2000]. Nous l'adaptons au cas défavorable des grands fonds pour lequel le contenu informatif est faible et pour lequel il n'existe pas actuellement de méthode (la problématique du REA justifiant ces travaux étant assez récente).

Toutefois nous ne nous focalisons pas uniquement sur le processus d'inversion, car notre but n'est pas de trouver la méthode inverse la mieux adaptée au jeu de données disponibles. L'objectif est de montrer une approche générique et systémique de l'inversion de données en géoacoustique. Nous mettons ainsi en place une démarche globale, visant à traiter l'intégralité du problème de l'inversion sur une campagne de mesures.

La démarche employée consiste dans un premier temps à automatiser l'ensemble de la procédure d'inversion tout en gardant à l'esprit la contrainte de temps réel, ce qui a ensuite permis d'utiliser l'outil développé pour inverser les séquences de données présentant un intérêt particulier, et d'évaluer ainsi les capacités opérationnelles de ce type de méthodes. La méthode développée permet de traiter le cas des grands fonds dans un milieu variable avec la distance. Inversant simultanément les mesures effectuées sur plusieurs hydrophones, elle permet aussi d'analyser l'apport de la fusion multicapteur. La méthode globale d'inversion que nous développons répond donc à l'ensemble des voies d'approfondissement proposées dans la thèse récente de JC Le Gac effectuée à l'EPSHOM/ CMO et à laquelle ces travaux font suite [Le Gac2003].

L'automatisation de l'ensemble de la procédure est réalisée au travers d'un traitement ping à ping, de la gestion de la propagation au sein même du processus d'inversion, et de la gestion hiérarchisée des données mesurées. Les problèmes de la méconnaissance des paramètres géométriques et des paramètres géoacoustiques du fond sont traités séparément et nous développons une procédure d'inversion indirecte, comprenant deux modules successifs d'inversion visant à retrouver d'une part la configuration expérimentale puis ensuite la nature du fond. Cette dernière est caractérisable par un fond fluide monocouche décrit par sa porosité ou encore par son triplet célérité-atténuation-densité. Elle fonctionne aussi pour un fond multicouche fluide.

Une première méthode d'inversion développée, MIR EE, est de type recherche exhaustive. Très simple et robuste, elle explore exhaustivement un espace très restreint de paramètres. De ce fait sa simplicité a permis de l'utiliser pour développer le prototype d'automate d'inversion. Sa robustesse fait qu'elle a ensuite servi de référence au développement d'une méthode heuristique plus évoluée de type MIR Simplex, pour laquelle un schéma numérique de type Downhill Simplex explore intelligemment l'espace, plus vaste cette fois, des paramètres.

Les méthodes d'inversion sont testées avec succès sur des données synthétiques complexes, élaborées à partir d'un simulateur temps réel de la propagation acoustique. Ces essais sur données synthétiques permettent de valider la faisabilité de la méthode quant à ses performances de détection d'une transition horizontale de la porosité, et en terme de respect de la contrainte opérationnelle du délai d'estimation.

D'autre part, les méthodes d'inversion sont testées sur l'intégralité du jeu de données réelles d'une campagne type. Les valeurs de la porosité obtenues par l'inversion sont légèrement surestimées par rapport à celles attendues. Les travaux sur données synthétiques permettent alors d'expliquer les écarts observés entre les données mesurées et les données de vérité terrain. Ils montrent finalement que cet écart est à imputer à l'effet Doppler. Quand la vitesse relative de la source et le récepteur est trop élevée, celui-ci distord les signaux qui ressemblent moins au signal émis. Les sorties de filtrage adapté ont alors un niveau plus faible que les simulations. La routine d'inversion, dont le rôle est d'ajuster la porosité pour que les simulations ressemblent le plus aux mesures, diminue le niveau des simulations en augmentant la valeur de la porosité. En raison de l'effet Doppler il apparaît donc que les données in-situ disponibles ne permettent pas d'appliquer correctement ces méthodes. Cette étude fournit de plus une évaluation de la déformation des signaux après filtrage adapté pour une vitesse nominale de déplacement relatif source-récepteurs et en fonction de la durée des signaux. Ces renseignements sont utiles pour le design des systèmes futurs de REA et constituent un résultat majeur de cette étude. Les temps de calcul requis sont de l'ordre de la durée d'acquisition des signaux et respectent largement la contrainte temps-réel à l'échelle du REA.

L'apport de cette thèse réside tout d'abord dans sa pluridisciplinarité et surtout dans le niveau d'expertise mis en œuvre dans chaque thématique. Si cette méthode apporte des améliorations considérables dans le domaine : prise en compte de multicauteur, d'un milieu évolutif, d'un fond mono ou multicouche fluide, automatisation du procédé d'inversion, approche temps-réel, la nouveauté de ces travaux réside dans la thématique plus que dans les méthodes employées. Le problème de l'inversion des données acoustiques d'une campagne de mesures constituées de plusieurs radiales est traité ici dans son intégralité, en utilisant des méthodes valables et utilisées jusqu'à présent uniquement par petits fonds.

La difficulté majeure résulte de la complexité de gestion des l'ensemble des données en vue de l'inversion. La démarche employée a consisté dans un premier temps à résoudre le problème de l'automatisation de l'ensemble de la procédure d'inversion. Celle-ci n'est pas totale, mais le pourcentage de procédures automatisées a ensuite permis d'utiliser l'outil développé pour inverser les séquences de données présentant un intérêt particulier. Un

important travail a été conduit relativement à l'analyse de l'effet Doppler sur des données synthétiques et son impact sur les performances de la méthode d'inversion. Ce travail valide l'intérêt de l'utilisation d'un module de simulation temps réel du signal propagé permettant de rendre compte de l'effet Doppler sur les signaux et de quantifier son impact sur un système de REA acoustique. On a pu ainsi comprendre pourquoi l'inversion des données de la campagne HERACLES n'a pas pu fonctionner parfaitement, et dégager des configurations de simulations pour lesquelles l'inversion pourrait fonctionner, ce qui valorise le principe de la méthode développée et les développements réalisés.

## Table des matières

<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Contexte général : De la nécessité de la mesure en transmission.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Contexte scientifique : De la nécessité d'une méthode d'inversion indirecte.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3. Contexte opérationnel : Du besoin opérationnel au besoin d'inversion.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4. Objet des travaux : Mise au point d'une méthode globale d'inversion.....</b>	<b>18</b>
<b>1.5. Historique et justifications de l'orientation des travaux.....</b>	<b>21</b>
<b>1.6. Paramètres et originalité de la méthode globale d'inversion développée.....</b>	<b>22</b>
<b>1.7. Description du document.....</b>	<b>23</b>
<b>CHAPITRE 2 DEFINITION DE L'APPROCHE GLOBALE.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Besoin opérationnel et contraintes associées.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2. Analyse de la démarche d'inversion.....</b>	<b>25</b>
2.2.1. Méthodologie d'analyse de la démarche d'inversion.....	25
2.2.2. Critères hiérarchisés de qualification de la démarche d'inversion.....	27
<b>2.3. Application de la démarche globale d'inversion.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4. Intérêt de la démarche globale d'inversion.....</b>	<b>31</b>
<b>CHAPITRE 3 DONNEES PHYSIQUES : REELLES ET SIMULEES.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. Présentation des données réelles : la campagne HERACLES.....</b>	<b>33</b>
3.1.1. Données environnementales.....	33
3.1.2. Schéma instrumental de la campagne HERACLES.....	36
3.1.3. Conditions de propagation.....	37
3.1.4. Système d'acquisition des signaux.....	37
3.1.5. Chaîne de traitement des données.....	39
3.1.6. Données acoustiques : Sorties de filtrage adapté.....	39
<b>3.2. Simulations numériques de la propagation sonore océanique.....</b>	<b>41</b>
3.2.1. Modèle de rayons sonores.....	41
3.2.1.1. Logiciel RAYSON.....	41
3.2.1.2. Amplitude complexe et perte d'un rayon sonore.....	42
3.2.2. Calcul des pertes des rayons sonores.....	43
3.2.2.1. Perte par divergence géométrique.....	44
3.2.2.2. Perte par atténuation fréquentielle.....	45
3.2.2.3. Pertes par réflexion sur les obstacles (Surface ou fond).....	45
3.2.2.4. Optimisation du calcul des pertes.....	48
3.2.3. Modèle large bande : Calcul de la réponse impulsionnelle.....	49
3.2.3.1. Rayons propres.....	49
3.2.3.2. Insuffisance de la pseudo-réponse impulsionnelle et nécessité d'un modèle large bande.....	50
3.2.3.3. Réponse impulsionnelle.....	51
3.2.3.4. Calcul de la réponse impulsionnelle.....	51
3.2.3.5. Optimisation du calcul de la réponse impulsionnelle.....	53
3.2.3.6. Remarque.....	54
3.2.3.7. Lien entre réponse impulsionnelle et sortie de filtrage adapté.....	55
3.2.3.8. Remarque : prise en compte de la directivité.....	55
3.2.4. Traitements complémentaires aux simulations de la réponse impulsionnelle.....	56
3.2.5. Génération et lecture des réponses impulsionnelles.....	57
<b>3.3. Outils d'analyse et d'identification des réponses impulsionnelles.....</b>	<b>58</b>
<b>3.4. Conclusions.....</b>	<b>59</b>
<b>CHAPITRE 4 METHODOLOGIE GLOBALE D'INVERSION.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1. Principe de la méthode globale d'inversion.....</b>	<b>62</b>

4.1.1. Fonction de coût des méthodes MIR.....	63
4.1.2. Méthode d'inversion de type Matched Impulse Response par Exploration Exhaustive (MIR EE).....	64
4.1.3. Développement d'une méthode d'inversion de type MIR Simplex.....	65
4.1.3.1. Temps de calcul.....	66
4.1.3.2. Remarque : intérêts respectifs des méthodes MIR EE et MIR Simplex.....	66
4.1.4. Comparaison MIR EE et MIR Simplex le long de la radiale R2.....	67
4.1.5. Analyse de la fonction de coût.....	68
4.1.6. Améliorations à envisager.....	68
4.2. Description du MNT de synthèse.....	69
4.2.1. Rôle du MNT : synthèse des résultats.....	69
4.2.2. Hypothèse Couche Homogène.....	69
4.2.3. Couche Evolutive (en fonction de la distance).....	70
4.2.4. Illustration des méthodes en milieu monocouche homogène ou évolutive.....	71
4.3. Maquette logicielle et dossier numérique de résultats.....	71
4.4. Conclusions.....	73
CHAPITRE 5 INVERSION DE DONNEES SYNTHETIQUES.....	74
5.1. Principe du test de la méthode d'inversion sur données synthétiques.....	75
5.2. Méthode de génération des signaux synthétiques.....	76
5.2.1. Principe.....	76
5.2.2. Module Temps-Réel de RAYSON.....	76
5.2.3. Paramètres du milieu marin synthétique.....	79
5.2.4. Calibration du calcul du signal propagé.....	80
5.3. Résultats de l'inversion des données synthétiques.....	82
5.3.1. Résultats de l'inversion des données synthétiques en point fixe.....	82
5.3.2. Description des simulations numériques en mouvement.....	83
5.3.3. Analyse comparative des RI synthétiques et simulées.....	83
5.3.4. Résultats de l'inversion des données synthétiques en mouvement.....	84
5.3.5. Analyse complémentaire de l'impact de l'effet Doppler.....	89
5.4. Conclusions.....	90
CHAPITRE 6 INVERSION DE DONNEES REELLES.....	91
6.1. Résultats de l'inversion de données réelles avec la méthode MIR EE.....	92
6.1.1. Vérité terrain de la Radiale R1_100.....	92
6.1.2. Données mesurées de la Radiale R1_100.....	94
6.1.3. Inversion des données de la Radiale R1_100.....	95
6.1.4. Inversion des données de la Radiale R2_100.....	96
6.1.5. Conclusions.....	98
6.2. Résultats de l'inversion de données réelles avec la méthode MIR Simplex.....	99
6.2.1. Inversion de toutes les radiales avec une maille de 5 Nm.....	99
6.2.2. Inversion de la radiale R1 avec une maille de 1 Nm.....	101
6.2.3. MIR Simplex – Maille 1 Nm – Radiales R1 et R2 – 3 réflexions.....	103
6.3. Conclusions des essais d'inversion sur données réelles.....	105
CHAPITRE 7 CONCLUSIONS. PERSPECTIVES.....	106
7.1. Résumé des résultats.....	106
7.2. Synthèse des résultats.....	108
7.3. Conclusions - Perspectives.....	109

---

REFERENCES .....	111
ANNEXES.....	115
<b>Publications des travaux réalisés dans le cadre de la thèse .....</b>	<b>116</b>
<b>Travaux connexes.....</b>	<b>116</b>
<b>Prise en compte d'un fond multi-couches .....</b>	<b>117</b>
<b>1) Coefficient de réflexion-transmission fluide-fluide .....</b>	<b>117</b>
1) Expressions de $R$ et $T$ .....	117
2) Angle de rasance critique .....	118
3) Angle d'intromission .....	118
<b>2) Coefficient de réflexion fluide-solide .....</b>	<b>118</b>
<b>3) Coefficient de réflexion pour un fluide stratifié .....</b>	<b>119</b>
1) Expressions de $R$ et $T$ .....	119
2) Couche « quart d'onde ».....	119
3) Couche « demi d'onde ».....	120
4) Généralisation à une stratification quelconque .....	120
<b>4) Atténuation dans les couches sédimentaires.....</b>	<b>122</b>
<b>5) Implémentation.....</b>	<b>122</b>
1) Format du fichier fond multicouches.....	122
2) Organigramme : .....	123



---

## Glossaire

---

ASM	Acoustique Sous-Marine.
BF	Basses fréquences
CMO	Centre Militaire d'Océanographie
CMOX	Signal d'émission large bande
EPSHOM	Etablissement Principal des Services Hydrographiques et Océanographique de la Marine
Evolutif	Milieu marin variable avec la distance de propagation
EXPEREA	Etude menée par l'EPSHOM/CMO pour dépouiller les données de la campagne HERACLES
FA	Filtrage adapté (ou signal résultant du filtrage adapté)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformée de Fourier rapide)
FFT <sup>-1</sup>	Transformée de Fourier inverse rapide
GF	Grands Fonds
H1 à H11	Hydrophones de l'antenne placés sous l bouée TELEMAQUE
HERACLES	Campagne de mesure de REA réalisée par l'EPSHOM/CMO dans le golfe d'Oman en 2002
KS01 à KS05	Cinq carottages de la campagne HERACLES
LASM	Lutte Anti Sous Marine
METOC	Base de données environnementale opérationnelle
MIR EE	Matched Impulse Response par Exploration Exhaustive
MIR Simplex	Matched Impulse Response par Simplex
MIR	Matched Impulse Response
MNT	Modèle Numérique de Terrain
PEA	Programme d'études amont
PF	Petits fonds
R1 à R4	Radiales de mesure
R1, R2, R3, R4	Radiales réalisées pendant la campagne HERACLES
RAYSON	Logiciel de prédiction de la propagation sonore par rayons développé par l'auteur
REA	Evaluation rapide de l'environnement (Rapid Environmental Assessment)
RI	Réponse impulsionnelle (ou encore par assimilation réponse impulsionnelle corrigée de l'autocorrélation du signal émis)
S1 à S3	Signaux d'émission
STEREO	Système Temps réel d'Évaluation Rapide de l'Environnement Océano-acoustique
Stratifié	Milieu marin homogène horizontalement
TACSI	Logiciel de Traitement des Signaux développé par C Viala
TAO	Tomographie acoustique des océans
TBF	Très Basses Fréquences
XCTD	Profils bathycélérimétriques obtenus à partir de mesures de conductivité, température et densité avec des sondes largables (eXpendable)

---

**Notations**


---

$\otimes$	Produit de corrélation
*	Produit de convolution
$\varphi_e(t)$	Fonction d'autocorrélation de $e(t)$
$\tilde{h}(t)$	Pseudo réponse impulsionnelle
$\alpha$	Coefficient d'atténuation fréquentielle
a	Coefficient d'atténuation fréquentielle en dB/km
$\theta_r$	Angle de rasance en degrés
$\theta$	Site du rayon
$\delta$	Fonction de Dirac
$\phi$	Phase du front d'onde
$\rho$	Densité du fond fluide
$\theta_n$	Angle d'arrivée du $n^{\text{ième}}$ rayon propre
$\Gamma_n$	Trajectoire du rayon, s l'abscisse curviligne
$a_n$	Amplitude du $n^{\text{ième}}$ rayon propre
A	Amplitude du front d'onde
C	Célérité du son
D	Distance de propagation : distance source-récepteur
$d^{\text{obs}}$	Données observées
$e(t)$	Signal émis
f	Fréquence en kHz
$F_{\text{Num}}$	Fréquence de numérisation des signaux
$f(t)$	Sortie de filtrage adapté
G	Modèle direct reliant les paramètres aux données
H	Profondeur du fond
$h(t)$	Réponse impulsionnelle
$I_x$	Intensité sonore du rayon à une distance x de la source
$I_0$	Intensité sonore du rayon à à 1m de la source
P	Porosité. P est un nombre réel compris entre 0 et 1. Valeurs typiques : 0.4 $\rightarrow$ sable ; 0.8 $\rightarrow$ vase
Prt	Perte en valeurs naturelles
$P_{\text{dB}}$	Perte en Décibels
$p(t)$	Pression sonore reçue sur les hydrophones ou signal reçu
$r(t)$	Réponse impulsionnelle simulée après traitements spécifiques
R	Coefficient de réflexion
s	Abcisse curviligne le long du rayon
$s^{\text{est}}$	Paramètres
S	Sable
T	Coefficient de transmission

---

$T_{RI}$	Durée du support temporel de la RI
$t$	Temps
$t_n$	Temps de propagation du $n^{\text{ième}}$ rayon propre
Nm	Nautical mile. Mile nautique = 1852 m.
$N_D$	Nombre d'intervalles en distance
$N_H$	Nombre d'hydrophones
$N_M$	Nombre de mailles traversées entre la source et le récepteur
$N_P$	Nombre de valeurs de la porosité à explorer dans la méthode EE
V	Vase
$V_v$	Vitesse du vent
Z	Impédance du fond

## Chapitre 1 Introduction

Les travaux présentés dans cette thèse visent à développer une méthode globale d'inversion géoacoustique temps réel de signaux large-bande par grands fonds. La finalité est de renseigner les sonaristes opérationnels du domaine de la lutte anti sous-marine sur les paramètres du fond, afin qu'il puissent améliorer l'évaluation des performances de leurs senseurs acoustiques TBF.

### **1.1. Contexte général : De la nécessité de la mesure en transmission**

---

La connaissance des fonds marins est une problématique essentielle de l'exploration des océans. Longtemps les moyens d'investigation étaient basés sur des observations directes dans le milieu ou des prélèvements. L'utilisation de l'acoustique sous-marine a permis d'améliorer ces technologies. Elle est assez récente puisque les premières réalisations pratiques viables datent du début du 20<sup>e</sup> siècle. Les ondes acoustiques se propagent extrêmement bien sous l'eau. Elles permettent ainsi de véhiculer facilement des informations, en particulier des informations utiles à la mesure des caractéristiques des différents constituants du milieu marin, et tout particulièrement la forme et la nature du fond [Lurton 1998].

Les systèmes acoustiques de mesure des caractéristiques des fonds marins sont majoritairement de type actif et monostatique : écho-sondeur, sondeur multifaisceau, sondeur de sédiment, sonar latéral ... Ils émettent un signal sonore ; celui-ci se réfléchit sur le fond, revient vers la surface et est enregistré par une antenne. Si celle-ci est placée au voisinage de la source sonore, on parle de système monostatique.

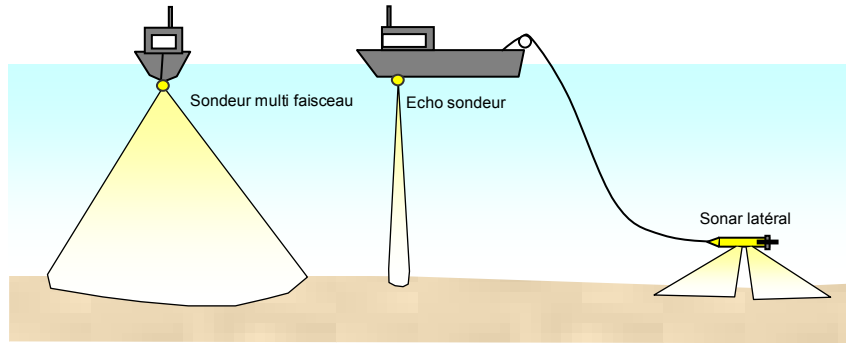


Figure 1 : Mesure des paramètres du fond marin - Configuration monostatique : le trajet sonore est un aller-retour

L'analyse de l'écho de ce signal après réflexion sur le fond permet d'en extraire des informations sur les caractéristiques des fonds, telles que la profondeur, la dureté, la rugosité... Une première phase consiste à traiter l'écho temporel mesuré pour en extraire la donnée observée. Les caractéristiques des fonds sont des paramètres qui modifient cette donnée observée. Trouver ces paramètres revient à trouver la fonction de transfert inverse associant les paramètres aux mesures.

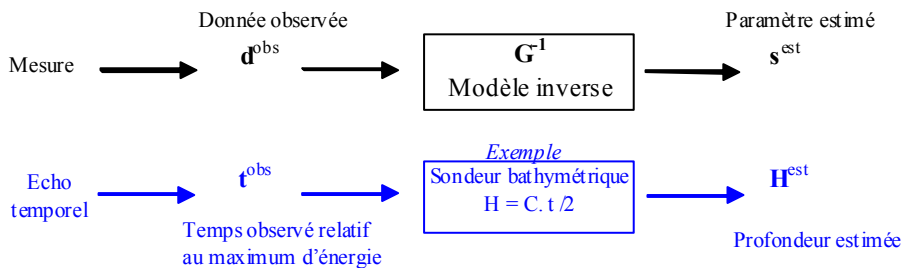


Figure 2 : Principe des méthodes inverses directes. G est le modèle direct reliant les paramètres aux données. En bleu : application au cas du sondeur bathymétrique

Par exemple dans le cas d'un sondeur bathymétrique la donnée observée est le temps  $t$  correspondant au maximum de retour énergétique, le paramètre à estimer étant la profondeur  $H$  du fond. Le modèle direct reliant la donnée au paramètre est par exemple spécifié par la relation  $C = \frac{2H}{t}$  où  $C$  est la célérité du son. Dans ce cas le modèle est linéaire et très simplement inversible.

Trouver la bonne valeur du paramètre revient donc à chercher le modèle inverse de celui utilisé pour la simulation, la notion de paramètres n'ayant de sens qu'associée à celle de modèle. L'intérêt de cette approche est qu'elle permet ensuite de réaliser très rapidement une inversion à partir de nouvelles mesures. On parle pour cette approche d'inversion directe. Le modèle utilisé pour la simulation, c'est-à-dire le modèle direct, est cependant rarement assez simple pour pouvoir être inversé analytiquement. Il faut donc généralement recourir à une inversion purement numérique, le modèle direct servant alors uniquement à générer un ensemble de couples (paramètres, données observées). Ce sont ensuite ces données, prises dans le sens (données observées, paramètres), qui vont permettre de trouver le modèle inverse recherché.

Les méthodes associées aux appareillages du type suivant : écho-sondeur, sondeur multifaisceau, sondeur de sédiment, sonar latéral sont basées sur l'exploitation de mesures acoustiques directes ou de type monostatique.

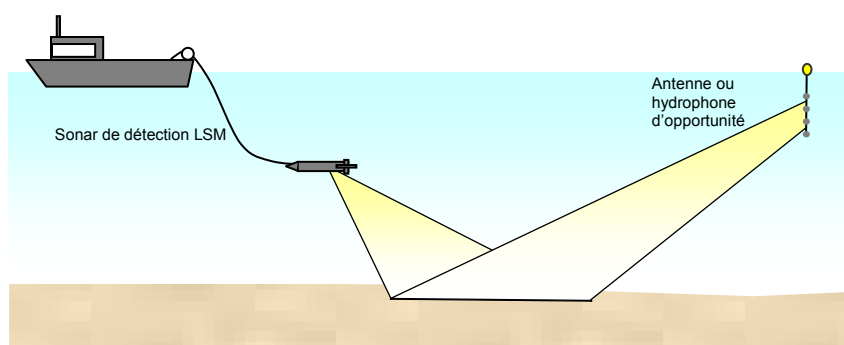
Elles admettent généralement des modèles directs simples donc facilement inversibles et exploitent donc des méthodes inverses directes. Elles sont très fiables et de ce fait ces informations, que l'on peut associer en plus à des prélèvements et à des observations visuelles, constituent ce que l'on appelle la vérité terrain. Elles sont stockées dans des bases de données d'environnement.

Toutefois les informations recueillies par ce type de méthodes sont très générales et inadaptées à l'utilisation particulière que constitue l'emploi d'un système sonar. En effet les informations obtenues sont valables pour l'angle de visée du sondeur, typiquement à la verticale du navire, alors que le système sonar, fonctionne en transmission, c'est-à-dire après réflexion vers l'avant, pour des angles de rasance très faibles, typiquement inférieurs à  $20^\circ$ . La configuration de mesure de paramètres, pour renseigner les forces opérationnelles doit donc admettre des angles rasants, proches de l'horizontale et du fonctionnement en détection lointaine du sonar.

Ces informations sont de plus valables à la fréquence du système acoustique de mesure, c'est-à-dire typiquement quelques centaines de kilo Hertz pour un sondeur multifaisceaux. Or les caractéristiques du fond dépendent de la fréquence et une information de dureté ou de rugosité<sup>1</sup> du fond obtenue par une mesure à 200 kHz, n'est pas forcément valable à une fréquence de 2 kHz. La connaissance des caractéristiques du fonds marins est donc liée à la fréquence d'utilisation et il est nécessaire de mesurer les caractéristiques du fond à la fréquence d'usage des sonars.

Notons enfin que les méthodes précédentes sont longues et lourdes à mettre en œuvre, ce qui les rend difficiles à appliquer dans un contexte opérationnel d'évaluation rapide de l'environnement.

Dans ce cadre de la caractérisation des paramètres du fond à des fins opérationnelles, il est optimal d'effectuer les mesures à la fréquence d'usage des senseurs et en transmission. La configuration est alors de type bistatique. La Figure 3 illustre ce type de configuration.



**Figure 3 : Mesure des paramètres du fond marin à des fins opérationnelles - Configuration bistatique. Les angles de visée sont proches de l'horizontale comme en fonctionnement sonar de type détection La fréquence de mesure est celle utilisée par les sonars.**

<sup>1</sup> La vitesse de transmission de l'onde acoustique à travers le matériau du sous-sol marin permet de donner une indication sur sa nature. Des vitesses faibles sont généralement associées à un milieu sédimentaire meuble, peu réfléchissant; tandis que des vitesses élevées signalent souvent la présence de roches nues, très réfléchissantes.

Cette thèse s'inscrit dans un contexte général d'estimation des paramètres du fond par des mesures en transmission en basses fréquences.

## 1.2. Contexte scientifique : De la nécessité d'une méthode d'inversion indirecte

Le modèle direct est alors complexe. Pour répondre à un besoin d'inversion dans ce cas, une seconde famille de méthodes inverses a été développée par la communauté des acousticiens sonaristes. Elles consistent à comparer les résultats d'une simulation de propagation avec la mesure réalisée, puis à modifier les paramètres de la simulation jusqu'à obtenir un bon accord avec la mesure. On parle alors d'inversion indirecte ou encore de matched-field processing qui signifie littéralement processus d'ajustement de champ, le champ étant la donnée observée [Hermand 1999] [Siderius et Nielsen 2002] [Le Gac 2003]. Cette approche est la plus étudiée et la plus riche en variantes. Elle ne résout pas à proprement parler le problème de l'inversibilité du modèle direct, mais garantit l'obtention d'une solution correcte. Le modèle direct sert cette fois à explorer l'espace des solutions en permettant de comparer des résultats de simulation avec la mesure comme cela est illustré sur la Figure 4.

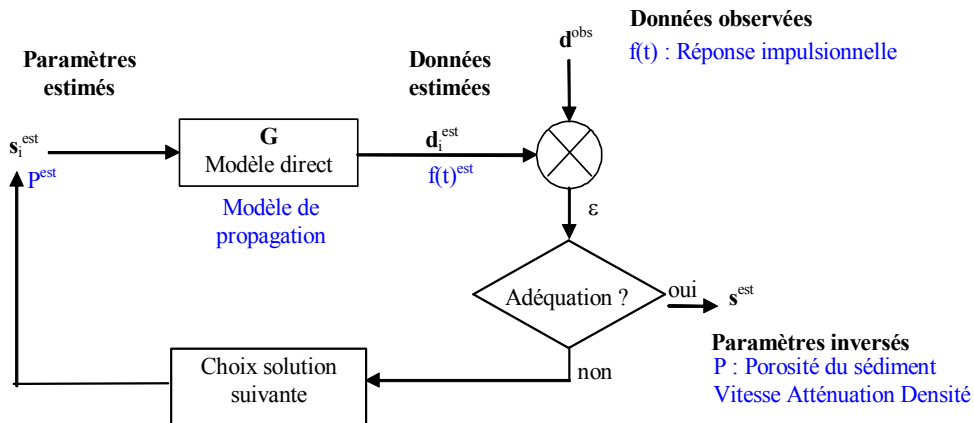


Figure 4 : Principe des méthodes inverses indirectes. G est le modèle direct reliant es paramètres aux données. En bleu : application à notre cas d'étude

La simplicité analytique du modèle direct n'a plus d'importance, puisqu'on ne va pas en chercher une expression inverse. Par contre, il doit être rapide puisqu'il va être appelé un certain nombre de fois pour chaque inversion. Dans notre cas la donnée observée est la réponse impulsionnelle du milieu en transmission, obtenue à partir de la mesure de la pression sur le ou les capteurs d'une antenne. Les paramètres à inverser renseignent sur la nature du fond ; ce sont la porosité ou le triplet (vitesse, atténuation et densité) du sédiment. Le modèle direct décrit la façon dont le son se propage en transmission depuis la source jusqu'aux récepteurs [Stéphan 1996].

Ces travaux s'inscrivent donc dans un contexte scientifique de méthode d'inversion indirecte où, à partir de mesures en transmission, on cherche à déterminer les paramètres du fond marins afin de renseigner le besoin de connaissance opérationnel.

Avant de spécifier plus finement la méthode d'inversion nécessaire, nous proposons d'analyser plus en détails ce besoin de connaissance.

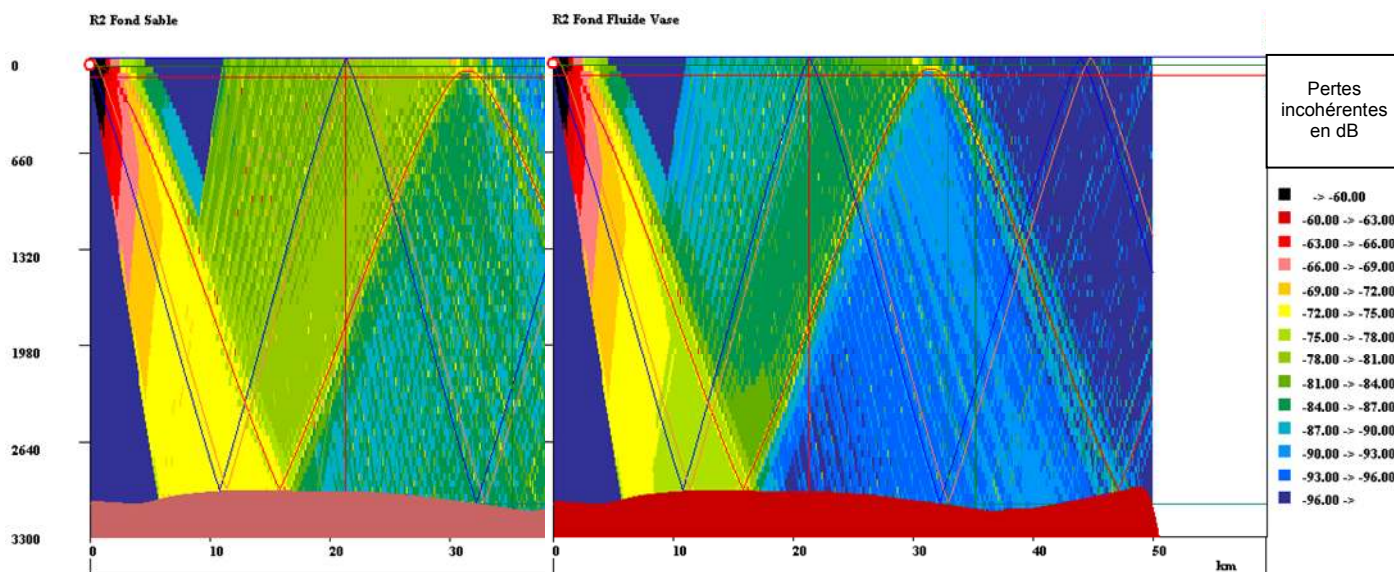
### 1.3. Contexte opérationnel : Du besoin opérationnel au besoin d'inversion

Le cadre opérationnel de cette thèse est fixé par le Centre Militaire d'Océanographie de l'EPSHOM qui a soutenu ces travaux. Ce centre a pour mission de renseigner les opérationnels sur les paramètres du fond afin qu'ils puissent évaluer les performances de leurs senseurs pour en optimiser l'usage. Celles-ci sont estimées au travers de l'équation du sonar donnée en actif par :

$$SL - TL_{\text{aller}} + TS - TL_{\text{retour}} - (RL + Na + Np) + DI + PG > DT \quad \text{Eq. 1}$$

avec	SL	Niveau d'émission	TL	Pertes de propagation sur les trajets aller et retour
	TS	Index de cible	RL	Niveau de réverbération
	Na	Niveau de bruit ambiant	Np	Niveau de bruit propre
	DI	Index de directivité d'antenne	PG	Gain de traitement
	DT	Seuil de détection		

La nature du fond marin agit sur le terme de réverbération et majoritairement sur le terme de pertes de propagation. La Figure 5 en illustre l'impact sur la perte de niveau sonore dans une configuration en détection lointaine. Selon que la nature du fond est du sable (image de gauche) ou de la vase (image de droite) la perte varie de 10 dB en zone de convergence, la vase atténuant le signal. Par conséquent la détection se fait moins bien sur fond absorbant et la portée de détection est considérablement réduite.



**Figure 5 : Simulations de la propagation du son montrant l'impact de la nature du fond sur la répartition de l'énergie sonore dans le milieu. A gauche par fond de sable (Porosité= 0.4) – A droite par fond de vase (Porosité= 0.7). La vase, par rapport au sable, atténué de 10 dB le signal se réfléchissant en zone de convergence.**

La prédiction des pertes est effectuée par les modèles de propagation, et les paramètres géoacoustiques que nous recherchons sont adaptés à ces modèles. Nous nous sommes donc appuyés sur la modélisation empirique des coefficients de réflexion de Hall-Watson [Etter 1996] [CTSN 1995] [Hall – Watson 1967] fournissant la perte par réflexion au fond en fonction de la porosité du sédiment et couramment utilisée par les analyseurs de performances.

Notons que l'objectif opérationnel n'est pas de retrouver le modèle géoacoustique proche de la réalité, mais un ensemble de paramètres suffisants pour prédire correctement les pertes de propagation. C'est la base du concept de milieu équivalent (« through-the sensor approach ») [Demoulin et al 2000] [Le Gac et al 2002]. Dans ce



contexte nous nous sommes aussi appuyés sur une paramétrisation mono ou multicouche fluide du sédiment, chaque couche sédimentaire étant décrite par un triplet (vitesse, atténuation et densité). Ce paramétrage, plus fin que le précédent, étant aisément pris en compte dans les modèles de propagation.

Les travaux effectués dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du Programme d'Etudes Amont de la DGA « Evaluation Rapide de l'Environnement », et tout particulièrement dans son volet REA acoustique STEREO. Ce programme contribue à répondre au besoin opérationnel d'information temps-réel de l'environnement METOC. Cette information doit être élaborée dans des délais très courts et concerne des milieux complexes, mal connus a priori et variables dans l'espace et le temps. Le concept de REA repose sur la capacité des systèmes de mesures à recueillir, exploiter et fusionner l'information METOC afin de représenter de manière la plus pertinente possible l'environnement à l'échelle d'un théâtre d'opération et à l'échelle de l'environnement local d'une unité. Le REA conventionnel fournit un modèle d'environnement résultant de la fusion des informations contenues en base de données, des mesures in-situ disponibles et des modèles de prévisions océaniques. Ce modèle d'environnement est ensuite injecté dans les modèles acoustiques pour un calcul de performances. La fusion étant établie en dehors du contexte opérationnel, cela rend difficile l'appréhension des paramètres pertinents, ainsi que leur précision et résolution. De plus le découplage environnement-acoustique cumule les erreurs dues à la description de l'environnement et celles dues à la modélisation acoustique.

Le REA acoustique permet d'améliorer la connaissance environnementale fournie par le REA conventionnel en renseignant des champs inaccessibles à la mesure directe (paramètres géoacoustiques, pertes de propagation et fluctuations associées). Il utilise les informations contenues dans les signaux acoustiques propagés ou réverbérés dans le milieu et les exploite pour valider la pertinence d'un modèle d'environnement ou pour améliorer la description de l'environnement (ajout des nouveaux paramètres, estimation de milieux « équivalents »...).

Un volet du plan d'études amont (PEA) de l'EPSHOM est consacré au REA acoustique. Ce volet, qui a débuté en Mars 2006, a pour objectif la réalisation d'un prototype de système d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique, dans la gamme TBF. Il doit permettre en particulier d'évaluer en temps réel les paramètres d'environnement et en particulier les paramètres géoacoustiques.

**Les présents travaux se situent en amont du volet REA acoustique. Ils ont pour but de valider la faisabilité d'une méthode d'inversion en temps réel.**

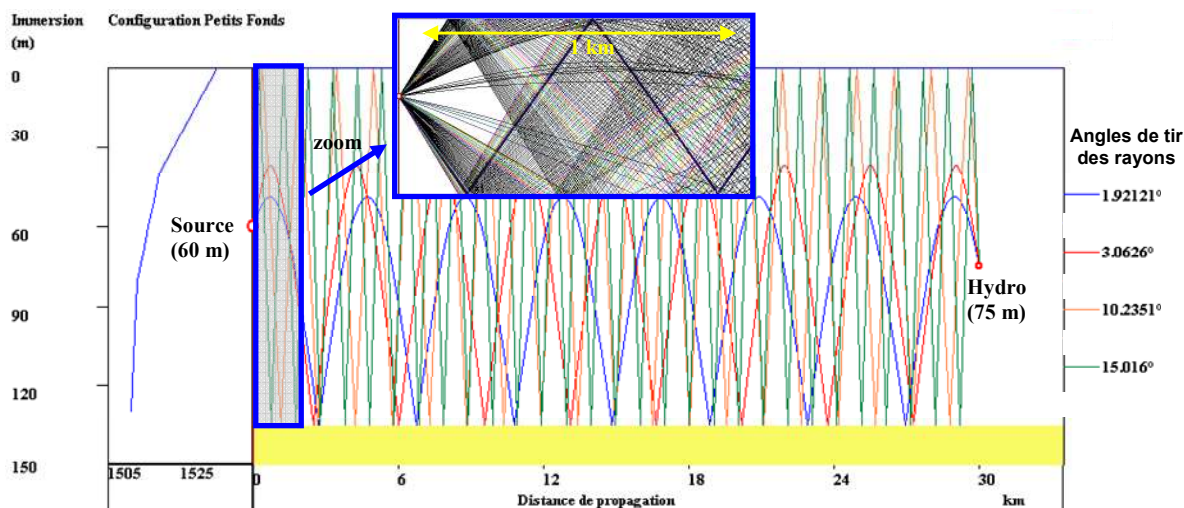
## 1.4. Objet des travaux : Mise au point d'une méthode globale d'inversion

Les travaux présentés dans ce mémoire ont donc pour objet de mettre au point une méthode globale d'inversion afin de valider le concept de REA acoustique opérationnel sur de l'inversion géoacoustique de signaux large-bande en temps réel par grands fonds. Ils doivent fournir des enseignements utiles à la conception du prototype futur STEREO. En particulier les objectifs plus précis du CMO, initiateur de cette thèse, sont:

- de valider la faisabilité du traitement global ainsi que les contraintes en temps de calcul,
- de vérifier la capacité à retrouver la valeur correcte de la porosité sur une zone homogène connue, c'est-à-dire typiquement de retrouver que deux radiales différentes d'une campagne d'essais sont homogènes et admettent des valeurs différentes de la porosité, et
- de comparer les données obtenues avec les données initiales issues du guide METOC<sup>2</sup> afin de qualifier l'apport de la méthode.

La validation du concept s'opère dans cette thèse après la mise en place d'une démarche globale d'inversion et son application à un jeu de données acoustiques et environnementales réelles mis à disposition par le Centre Militaire d'Océanographie de l'EPSHOM. Ce jeu de données a été enregistré par grands fonds dans le golfe d'Oman en 2002.

L'objectif du travail n'est pas de trouver la méthode inverse la mieux adaptée au jeu de données disponibles. Le but est de mettre en place une approche générique et systémique de l'inversion de données en géoacoustique. Cette démarche a impliqué des contraintes extrêmement fortes en terme d'automatisation des traitements et de calculs en temps réel. Le fait de travailler sur des données grands fonds accroît la difficulté du problème. Dans une approche milieu fluide et fond équivalent, le contenu informatif des signaux par petits fonds est beaucoup plus riche qu'en grands fonds car il existe un grand nombre de rayons propres présentant des angles allant de la rasance à l'angle critique [Demoulin et al 2000] [Caiti-Jesus 1996][Caiti - al 1996], comme l'illustre la Figure 6 :



**Figure 6 : Trajectoires de 4 rayons propres caractéristiques dans une configuration petits fonds. Dans un angle de tir de  $(-20^\circ, 20^\circ)$ , on dénombre une centaine de rayons propres. L'encart est un agrandissement du tracé de l'ensemble des rayons propres sur le premier kilomètre.**

<sup>2</sup> Le Guide METOC est un système d'exploitation de produits numériques d'environnement édité par le SHOM. Il permet de consulter des données statistiques dans tous les domaines environnementaux susceptibles d'influencer la planification et la conduite des opérations navales (météorologie, océanographie, acoustique, géophysique, activités humaines).

En grands fonds, ce n'est pas le cas, et comme l'illustre la Figure 7 seuls quelques groupes de rayons propres sont observés.

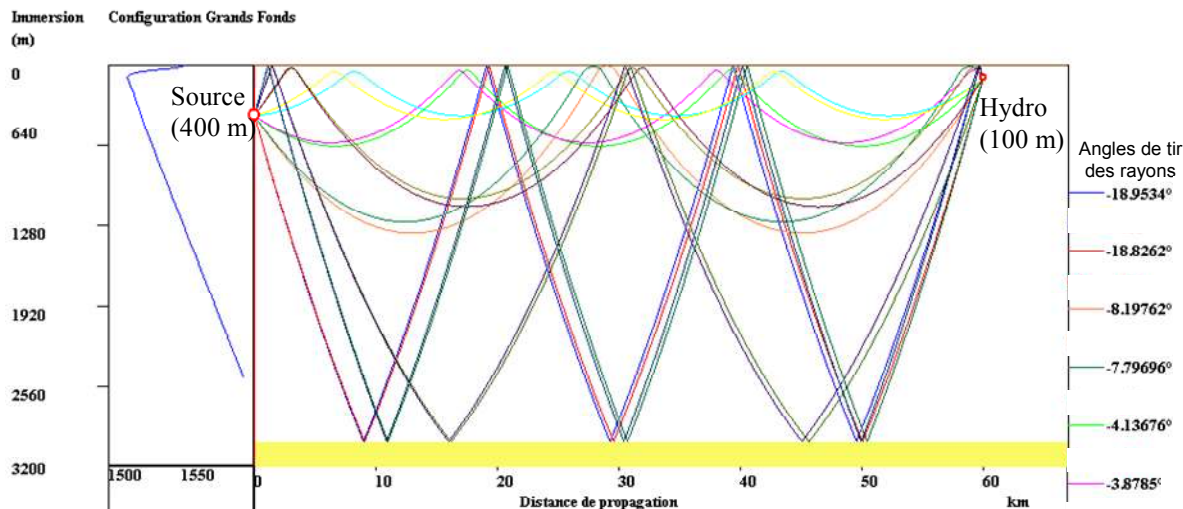


Figure 7 : Trajectoires des rayons propres dans une configuration grands fonds. Dans un angle de tir de  $(-20^\circ, 20^\circ)$ , on dénombre 13 rayons propres.

De ce fait le contenu informatif de la réponse impulsionnelle par grands fonds est beaucoup plus faible que par petits fonds, ainsi que le montrent la Figure 8 et la Figure 9.

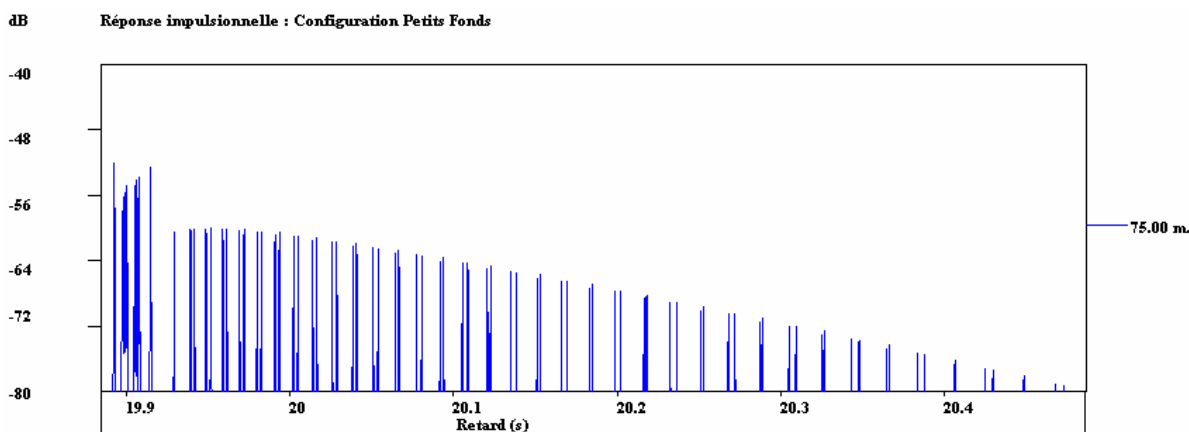


Figure 8 : Réponse impulsionnelle correspondant au cas petits fonds

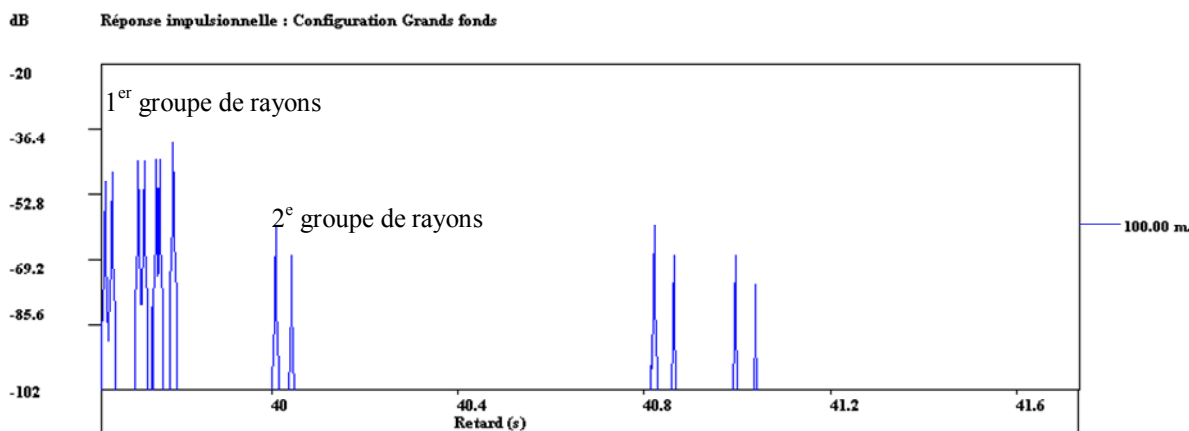


Figure 9 : Réponse impulsionnelle correspondant au cas grands fonds.

Le travail de cette thèse s'effectue donc dans un contexte défavorable en terme de nombre d'éléments inversibles. Notons de plus que ce jeu de données a été conçu pour faire du REA acoustique, mais il n'a pas été optimisé au sens de la stratégie des mesures (placement des hydrophones, optimisation des distances, ...) dans un but de faire de l'inversion par grand fonds.

En résumé, nous définissons une approche générale d'inversion de données et nous appliquons cette démarche sur un jeu de données disponibles, avec les contraintes qu'elle induit (temps réel, automatisation, faible contenu informatif). Les résultats de l'inversion sont analysés et la faisabilité d'un usage en contexte opérationnel est démontrée. Des pistes d'amélioration sont ensuite définies afin d'améliorer la qualité de l'inversion.

Dans ce contexte opérationnel et dans un objectif de mise au point d'une démarche globale, ces travaux abordent de ce fait des thématiques à la fois spécifiques et diverses :

- Le problème direct de la modélisation de la propagation du son dans l'océan
- La résolution du problème inverse ou comment exploiter le signal sonore en transmission pour inférer la nature du fond marin
- Les systèmes experts
- La démonstration de la faisabilité, sur données réelles, par grands fonds, et en temps-réel.

Notre parcours professionnel original, nous a permis de mettre à profit notre expérience acquise dans chacun de ces domaines spécifiques, pour aboutir à la réalisation de cette démarche globale d'inversion.

---

## 1.5. Historique et justifications de l'orientation des travaux

---

En effet, cette thèse, démarrée en 2003 couronne 17 années de recherche et développement dans le domaine de l'océanographie acoustique. Cette démarche est particulièrement originale, puisque la thèse est réalisée au sein du bureau d'études SEMANTIC TS, sans financement spécifique. Elle se concentre uniquement sur les cinq dernières années de travail, dédiées à de l'inversion géoacoustique de signaux large bande par grands fonds, mais exploite l'ensemble des travaux réalisés dans ce domaine au sein de la société depuis 2003. En particulier nous avons développé les thèmes suivants, dont les résultats ont à la fois orienté, puis été utilisés dans ces travaux :

- Développement de méthodes de traitement du signal acoustique large bande pour de la télémétrie et du positionnement [Viala et al 1998] [Viala et al 1996]
- Réalisation de code de traitement des signaux dédiés à des campagnes de mesures acoustiques [Noël et al 1994] [Noël et al 1999]
- Modélisation de la propagation en acoustique sous-marine par une méthode de rayons et réalisation de code de propagation [Rayson] [Noël et al 1999] [Noël -Viala -Stéphan 1999] [Viala et al 1997] [Noël et al 2002] [Noël –Viala - Sturm1995] [Viala et al 2004]
- Participation, organisation, dépouillement de campagnes de mesures acoustiques, en particulier campagne HERACLES dont les données sont exploitées en tant que données réelles dans cette thèse [Noël – Viala - Mandine 2002] [Viala et al 1995]
- Etudes et campagnes de tomographie acoustique des océans [Noël et al 1995]
- Etude des méthodes inverses pour la caractérisation acoustique de la couverture des fonds marins [Viala et al 2007] [Noël et al 2006] [Noël et al 2005]
- Etude de synthèse des méthodes inverses [Noël – Viala - Sarzeaud 1999]

En particulier dans cette dernière étude intitulée « Etude de synthèse des méthodes d'inversion en tomographie des océans » nous avons participé à l'élaboration du système expert mis en place. Cette étude concernait la synthèse des méthodes d'inversion utilisées en tomographie acoustique océanique. Il s'agissait d'analyser, de comprendre et finalement de comparer les diverses méthodes mises en oeuvre jusqu'ici, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application et leurs performances. Le but ultime est d'évaluer la faisabilité de méthodes d'inversion "automatiques" embarquées, le développement et/ou l'exploration de nouvelles méthodes d'inversion étant exclu du champ de cette étude, de même que la réalisation d'un système prototype. Les conclusions de cette étude, basée sur une analyse bibliographique conséquente, ont comme nous l'avons explicité au paragraphe précédent, impacté l'orientation des présents travaux, de même que celle de la thèse de JC Le Gac [Le Gac et al 2002] [Le Gac2003].

Cette thèse s'inscrit à la suite de la thèse de JC Le Gac. L'auteur présente, dans la première partie de son manuscrit, une méthode d'inversion géoacoustique par petits fonds en large bande exploitant la réponse impulsionnelle du canal en transmission. Le travail est focalisé sur le processus d'inversion lui-même. L'originalité de sa méthode tient au fait qu'elle s'appuie sur la partie résolue de la réponse impulsionnelle et d'autre part qu'elle traite séparément les problèmes de la méconnaissance des paramètres géométriques et des

paramètres géoacoustiques du fond. L'auteur conclue que l'inversion large bande est prometteuse [Le Gac2003 p 47], et définit les voies d'approfondissement suivantes, consistant à :

- étudier la capacité de ce type de méthode à traiter le cas d'un milieu évolutif [Le Gac2003 p 105],
- analyser l'intérêt d'une fusion multicapteur en inversant non pas le signal reçu sur un hydrophone, mais sur tous les hydrophones de l'antenne de réception [Le Gac2003 p 105],
- évaluer les capacités opérationnelles de ce type de méthode [Le Gac2003 p 153].

## **1.6. Paramètres et originalité de la méthode globale d'inversion développée**

Les conclusions des travaux de JC Le Gac [Le Gac2003], qui visaient à répondre au même challenge opérationnel, justifient les orientations de cette thèse. Nous avons repris l'approche large bande prometteuse développée par l'auteur et l'avons adaptée au cas des grands fonds pour lequel il n'existe pas actuellement de méthode puisque la problématique du REA justifiant ces travaux est assez récente. Toutefois nous ne nous focalisons pas uniquement sur le processus d'inversion, mais sur la démarche globale, visant à traiter l'intégralité du problème de l'inversion sur une campagne de mesures. La démarche employée a donc consisté dans un premier temps à automatiser l'ensemble de la procédure d'inversion tout en gardant à l'esprit la contrainte de temps réel, ce qui a ensuite permis d'utiliser l'outil développé pour inverser les séquences de données présentant un intérêt particulier, et d'évaluer ainsi les capacités opérationnelles de ce type de méthodes. La méthode développée permet de traiter le cas des grands fonds dans un milieu variable avec la distance, à la fois en célérité et en nature du fond. Inversant simultanément les mesures effectuées sur plusieurs récepteurs, elle permet aussi d'analyser l'apport de la fusion multicapteur. La méthode globale d'inversion que nous développons répond donc à l'ensemble des voies d'approfondissement proposées dans [Le Gac2003].

L'automatisation de l'ensemble de la procédure est réalisée au travers d'un traitement ping à ping, de la gestion de la propagation au sein même du processus d'inversion, et de la gestion hiérarchisée des données mesurées. Les problèmes de la méconnaissance des paramètres géométriques et des paramètres géoacoustiques du fond sont traités séparément et nous développons deux procédures d'inversion successives, de type recherche exhaustive, visant à retrouver la configuration expérimentale puis la nature du fond. Cette dernière est caractérisable par un fond fluide monocouche décrit par sa porosité au sens de Hall-Watson [Etter 1996] [Hall-Watson 1967] ou encore par son triplet célérité-atténuation-densité. Elle fonctionne aussi pour un fond multicouche fluide.

L'originalité de ce travail réside tout d'abord dans sa pluridisciplinarité et surtout dans le niveau d'expertise mis en œuvre dans chaque discipline : propagation acoustique sous-marine, traitement du signal, méthode d'inversion, signaux large bande, informatique temps-réel. Si cette méthode apporte des améliorations considérables dans le domaine : prise en compte de multicapteur, d'un milieu évolutif, automatisation du procédé d'inversion, approche temps-réel, la nouveauté de ces travaux réside dans la thématique (inversion géoacoustique en temps réel, en large bande et par grands fonds) plus que dans les méthodes employées. Le problème de l'inversion des données acoustiques d'une campagne de mesures constituées de plusieurs radiales est traité ici dans son intégralité, en utilisant des méthodes valables et utilisées jusqu'à présent uniquement par petits fonds.

---

## 1.7. Description du document

---

Le Chapitre 2 présente les résultats de nos travaux menés dans l'étude de synthèse des méthodes inverses [Noël - Viala - Sarzeaud 1999] et définit le concept d'approche globale d'inversion.

Le Chapitre 3 définit la nature physique des données observées et simulées. Il présente le jeu de données réelles acoustiques et environnementales, acquises au cours de la campagne HERACLES conduite par l'EPSHOM/CMO dans le golfe d'Oman en 2002 et visant à démontrer la faisabilité du REA acoustique. Il décrit ensuite les fonctionnalités du simulateur de propagation sonore utilisé et ses caractéristiques de modélisation. Nous insistons tout particulièrement sur la prise en compte de la nature des fonds et la prédiction de la réponse impulsionnelle. Des traitements spécifiques sont mis en œuvre sur cette dernière afin d'en améliorer la ressemblance avec la sortie de filtrage adapté. Enfin, nous décrivons les outils d'analyse et d'identification de la réponse impulsionnelle mis en place dans cette étape.

Disposant d'une part d'un jeu propre, organisé et accessible de données observées, et d'autre part d'un outil de génération de données estimées, nous développons au Chapitre 4 une méthode globale d'inversion de type matched impulse response (MIR) reposant sur deux modules successifs d'inversion. Ceux-ci visent à retrouver tout d'abord la configuration expérimentale, puis ensuite la nature du fond. La première méthode d'inversion développée, MIR EE, est de type recherche exhaustive. Sa simplicité et sa robustesse permettent de l'utiliser pour développer le prototype d'automate d'inversion et de s'en servir de référence pour le développement d'une méthode heuristique plus évoluée de type MIR Simplex, pour laquelle un schéma numérique de type Downhill Simplex explore intelligemment l'espace plus vaste des paramètres. Ce chapitre se termine par la présentation des travaux de prise en compte d'un modèle numérique de terrain, nécessaire à l'inversion d'un milieu évolutif et à la synthèse et l'analyse des données inversées.

Les méthodes d'inversion sont testées au Chapitre 5 sur des données synthétiques complexes, élaborées à partir d'un simulateur temps réel de la propagation acoustique, permettant tout particulièrement de prendre en compte l'effet Doppler dû au mouvement relatif de la source et des récepteurs. Les fonctionnalités de ce dernier sont décrites, avant de présenter les résultats de ces essais sur des données synthétiques en point fixe, puis en déplacement sur une radiale présentant une rupture horizontale. Enfin nous analysons l'impact de l'effet Doppler sur les performances de la procédure d'inversion.

Le Chapitre 6 commence par présenter les résultats sur les données réelles de la méthode d'inversion de type MIR EE sans MNT (Modèle Numérique de Terrain). La complexité de l'analyse et de la synthèse des données est mise en évidence avant d'exposer aux paragraphes suivants les résultats de la méthode MIR simplex avec MNT sur l'ensemble de la campagne avec des mailles de cinq nautiques puis de un nautique, puis de conclure sur les performances de l'inversion des données réelles.

Enfin, le Chapitre 7 résume les travaux développés et synthétise les apports de la méthode développée dans les différentes thématiques abordées (informatique, simulations de la propagation, méthode d'inversion, méthode globale et processus automatisé...), avant de présenter les perspectives de ces travaux.

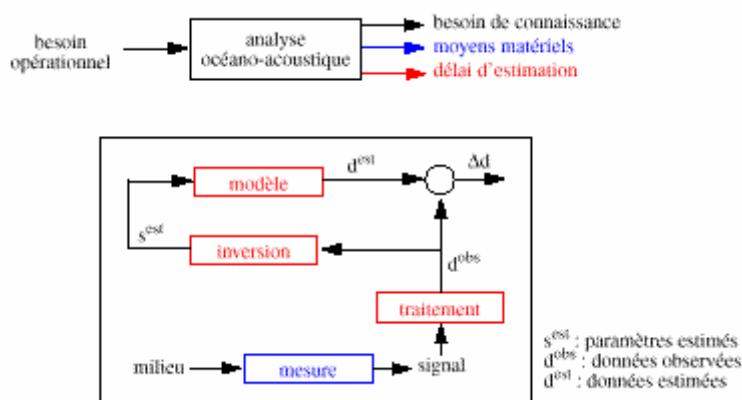
## Chapitre 2 Définition de l'approche globale

Ce chapitre repart du besoin opérationnel de connaissance et en expose les contraintes associées liées aux quatre actions principales : la mesure, le traitement des données, la modélisation directe et l'inversion elle-même. Il définit le concept de méthode globale d'inversion, appliqué dans cette thèse, ne se focalisant pas seulement sur le module inversion, mais sur l'ensemble des modules. Il présente les résultats de l'étude méthodologique conduite avec le CMO [Noël – Viala - Sarzeaud 1999] et montre la puissance de ce concept pour optimiser une méthode d'inversion dans un contexte opérationnel. La méthodologie mise en place dans cette étude a été appliquée au début des travaux et a initié cette thèse. Puis les modules de cette méthode ont été évalués ensuite à chaque phase de l'élaboration et de validation de nos développements.



## 2.1. Besoin opérationnel et contraintes associées

Le besoin opérationnel s'exprime sous la forme d'un besoin de connaissance, c'est-à-dire un ensemble de paramètres du fond à estimer avec une certaine précision (caractéristiques du milieu équivalent ou porosité), il fournit des contraintes instrumentales (facilité de déploiement, insensibilité à l'environnement extérieur, moyens de calcul embarqués) et de délai (temps de calcul équivalent à celui de l'acquisition). L'analyse de ce besoin permet donc de spécifier les contraintes de la démarche globale d'inversion comme cela est représenté sur la Figure 10.



**Figure 10 : Analyse du besoin opérationnel et lien avec la démarche d'inversion. En rouge la contrainte forte due au délai d'estimation concerne les modules modèle, inversion et traitement**

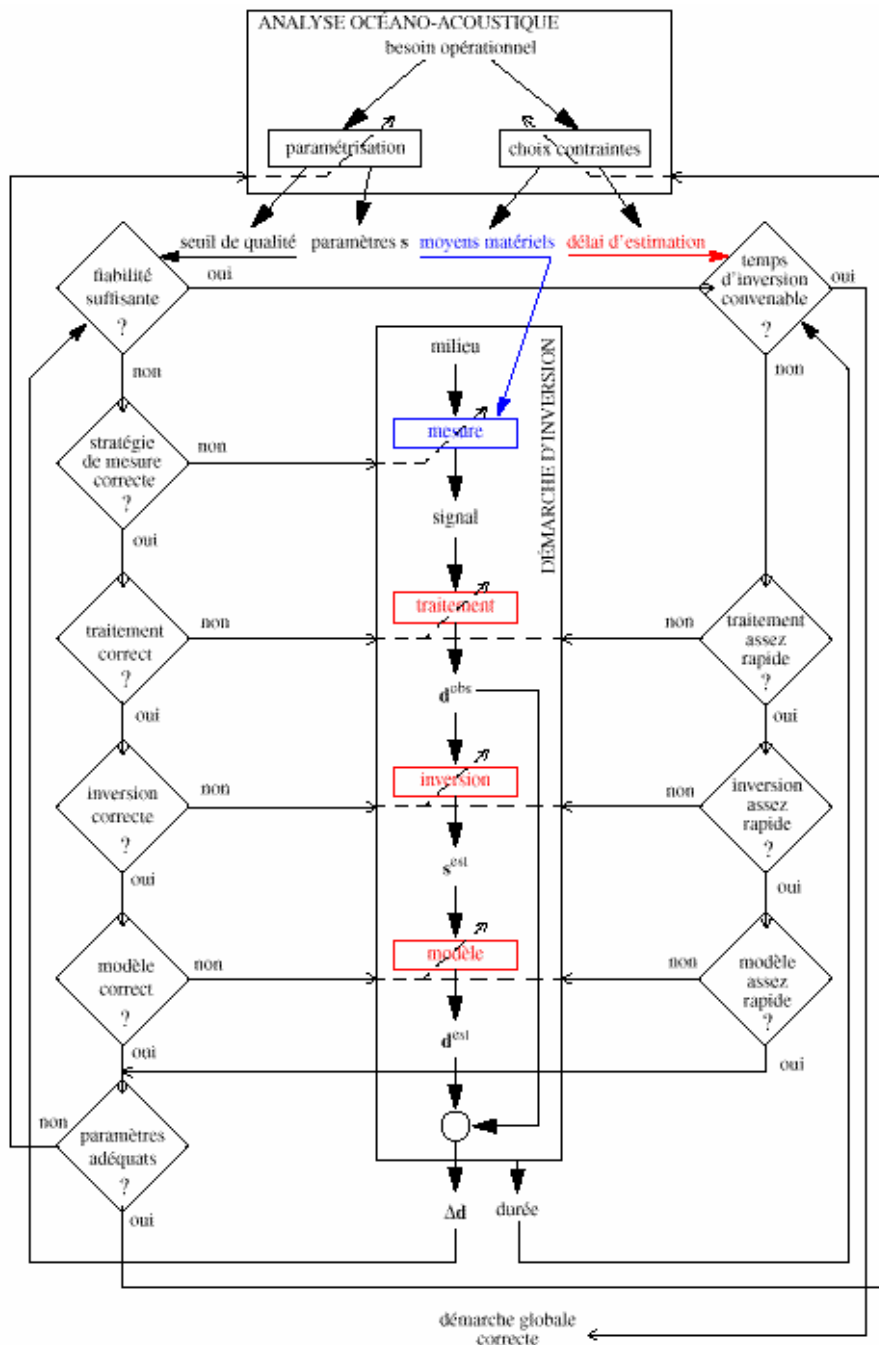
Dans la démarche globale d'inversion, quatre actions principales sont requises : la mesure, le traitement des mesures pour obtenir des données inversibles, l'inversion elle-même et la modélisation directe sur lequel se base l'inversion. Notons que la démarche globale met en œuvre et séquence l'ensemble des modules.

Les contraintes instrumentales concernent essentiellement la mesure et ne sont pas abordées dans cette thèse. Elles se résument à dire que les mesures seront faites avec le matériel mis à disposition, puis dans le REA futur avec des sources d'opportunités. Par contre les moyens de calcul, tant pour les simulations, l'inversion et le traitement doivent pouvoir être embarqués. La contrainte de délai concerne par contre l'ensemble des modules : le traitement du signal, la méthode d'inversion, et le modèle direct de la propagation. La contrainte en temps nous conduit à donner des règles de choix des différents modules nécessaires.

## 2.2. Analyse de la démarche d'inversion

### 2.2.1. Méthodologie d'analyse de la démarche d'inversion

L'organigramme de la Figure 11 présente schématiquement et de façon hiérarchisée la méthodologie d'analyse de la démarche d'inversion telle que nous l'avons élaborée dans une étude réalisée avec le CMO en 1999 et intitulée « Etude de synthèse des méthodes d'inversion en tomographie des océans » [Noël - Viala - Sarzeaud 1999].



**Figure 11 : Organigramme de la démarche d'analyse de la méthode d'inversion. Chaque point d'interrogation nécessite de se poser la question de la suffisance des performances et de renseigner cette question en déclinant les critères hiérarchisés. Par exemple à la question « le modèle est-il correct ? » se décompose en : est-il fiable, c'est-à-dire efficace (précis, de bonne résolution, répétitif). Est-il robuste ? stable ? Enfin, est-il rapide ? Une analyse corrective des modules doit ensuite être effectuée en déclinant ces critères de performances.**

La démarche consiste à s'interroger sur la performance de chaque module séparément. Elle est basée sur la définition de critères d'analyse hiérarchisés définis à la Figure 12, qui permettent de qualifier les performances de chaque étape et de chaque module de l'inversion.

Performances suffisantes ?	Critères			Définition
	Fiabilité	Efficacité	Précision	(Caractérisation absolue du résultat) Qualificatif le plus puissant Solution à faible résidu
Résolution			(Sensibilité) Caractérise la variation du résultat de la méthode d'inversion	
Répétitivité du résultat			(Reproductif) 2 passages différents dans la routine d'inversion donnent le même résultat	
Robustesse		Généralités	(Force) Non affecté par un changement de configuration générale, de matériel Tolérance au bruit : modification du point d'équilibre	
		Stabilité	(Equilibre par rapport aux données d'entrée) Le système continue à présenter les mêmes caractéristiques qu'initialement : précis, répétitivité, résolution Modification autour du point d'équilibre	
Rapidité				

Figure 12 : Définition de critères hiérarchisés pour l'analyse des performances de la méthode d'inversion

Ces critères hiérarchisés permettent de se poser les bonnes questions et d'orienter de façon optimale les développements en vue dans un but d'améliorations des performances.

### 2.2.2. Critères hiérarchisés de qualification de la démarche d'inversion

En effet, qualifier les performances de la démarche d'inversion nécessite tout d'abord de définir ce qui est entendu par le terme de « performances ». Un système n'est performant qu'à la vue d'un jeu de critères, hiérarchisés, définis par rapport à la finalité du système. Dans le cas de la démarche d'inversion les deux critères majeurs sont la fiabilité et la rapidité.

La **rapidité** est un critère à satisfaire à des degrés divers selon l'application. Elle est, par exemple un critère fondamental en R.E.A., alors que ce critère peut être moins bien satisfait en application de type océanographie acoustique, où l'utilisateur dispose de plus de temps pour inférer le milieu. Le critère de rapidité est étroitement lié aux moyens mis en œuvre et aux budgets accordés pour le développement du système d'instrumentation tomographique. En effet, les phases de traitement, d'inversion et de modélisation admettent des temps de réalisation fort dépendants des ordinateurs et processeurs utilisés (parallélisation, vectorisation, accélération, traitement en mémoire à la volée, traitement temps-réel ...).

La **fiabilité** est un terme beaucoup plus complexe, englobant les notions d'efficacité et de robustesse.

L'**efficacité** inclus, dans le cas d'une démarche d'inversion en tomographie acoustique, les notions principales suivantes : précision, résolution et répétitivité du résultat.

La **précision** est le qualificatif le plus puissant ; il caractérise le résultat de façon absolue. Une méthode précise signifie qu'elle fournit la solution avec un résidu très faible. Celle-ci est souhaitable mais n'est pas forcément toujours réalisée. La comparaison entre la précision obtenue et celle requise permet de renseigner objectivement ce critère.

La **résolution** caractérise la sensibilité de la méthode d'inversion et définit sa dispersion autour de la solution absolue ; elle est accessible au travers de l'analyse des résidus, qui, même importants, peuvent admettre des variations faibles.

La **répétitivité** quant à elle qualifie l'écart entre les solutions obtenues après inversion dans exactement les mêmes conditions. Ce critère est renseigné par la comparaison des solutions obtenues après deux passages différents dans la routine d'inversion.

Les applications suivantes permettent d'illustrer ces notions :

- Exemple N°1 : Supposons que plusieurs sources d'informations soient disponibles en raison de l'instrumentation et qu'il soit utile d'assimiler ces différents types de données : dans ce cas une bonne précision est nécessaire.
- Exemple N°2 : L'observation des marées internes sur quelques jours peut très bien être effectuée en relatif. L'analyse océanographique se base alors sur les fluctuations des temps de trajet ; dans ce cas une bonne résolution est nécessaire.
- Exemple N°3 : Supposons que l'on dispose d'un système répétitif mais non précis ; c'est le cas par exemple des systèmes de mesure des temps de trajet réalisés avec des horloges à quartz qui dérivent de 10-6 en fréquence relative sur un an ; les informations peuvent être exploitées à condition de procéder à un étalonnage.

La **robustesse** se décrit tout d'abord de façon **générale** ; elle permet d'indiquer si le système est ou non affecté par un changement de configuration générale, par une modification de son point d'équilibre. Plus finement, la **stabilité** indique si système continue à présenter les mêmes caractéristiques qu'initialement : précis, répétitivité, résolution ; caractérise l'effet d'une modification autour du point d'équilibre.

Ces critères de performances hiérarchisés sont à décliner sur la méthode globale d'inversion afin d'en qualifier ses performances

Chaque sous-étape de la démarche d'inversion (Stratégie de mesure correcte ?, Traitement correct ? Inversion correcte ? Modèle correct ? Paramètres adéquats ? ) peut être qualifiée à l'aide de ces critères de performances. Déclinés dans chaque sous-thèmes ils fournissent des éléments de réponses aux questions posées et des éléments de solution pour une amélioration. Citons pour illustration

- Exemple N°4 : Dans le thème « Inversion correcte », l'usage d'une méthode linéaire assure une répétitivité du résultat ;
- Exemple N°5 : Dans le thème « Modèle correct », l'utilisation des rayons en basses fréquences est une erreur qui engendre une non-fiabilité ;
- Exemple N°6 : Dans le thème « Stratégie de mesure correcte », la présence d'un bruiteur sur la zone d'expérimentation peut nuire à la robustesse du système.

### 2.3. Application de la démarche globale d'inversion

Cette démarche a été appliquée au début des travaux et a initié cette thèse. Puis les modules de cette méthode ont été évalués ensuite à chaque phase de l'élaboration et de validation de notre méthode, au travers des critères définis dans le système expert dans le souci de mettre en oeuvre au final une démarche globale optimale. Des exemples d'analyse corrective extraits de [Noël – Viala - Sarzeaud 1999] sont donnés ci-après afin d'illustrer les réflexions que nous avons menées et de justifier nos orientations de travail dans le cas du traitement des signaux et du module d'inversion.

La Figure 13 présente la méthodologie d'analyse initiale de l'adéquation du traitement des signaux. Pour chaque opération : détection des trajets, identification et optimisation, nous définissons les traitements disponibles, et nous fournissons des éléments de réponse et des règles de choix.

Opération	Traitement	Eléments de réponse	Règles de choix
<b>Détection des trajets</b>	Détection quadratique FA (Filtrage Adapté) FV (Formation de voies) FA + FV FV HR (Haute Résolution) Soustraction de bruit Antenne synthétique	Traitement optimal vis-à-vis du rapport Signal/Bruit ?	Si faible S/B : FA plutôt que détection quadratique, sommation cohérente si répétition (problème du Doppler), dans ce cas éventuellement correction de Doppler Soustraction de bruit → connaissance du bruit de fond
	(contrainte : déplacement de S ou R et une répétition des émissions)	Traitement optimal vis-à-vis des signaux émis ?	- Signaux FP → détection quadratique
	FV par moindres carrés généralisés	Traitement optimal vis-à-vis de la configuration expérimentale ?	- Signaux LB → FA - Plusieurs récepteurs → FV
<b>Identification des trajets</b>	Filtrage de Kalman Recalages : premier front montant, maximum...	Suivi des arrivées Reconnaissance des arrivées	Rq : certains modèles ne nécessitent pas l'identification des arrivées (approche globale) Choisir les rayons et les modes les plus robustes (rayons les plus pentus et les modes d'ordre faible)
<b>Optimisation</b>	Traitements annexes relatifs à l'optimisation de la détection et de l'identification des trajets	Calcul en temps réel de la déformée de l'antenne	

Figure 13 : Analyse de la question : le traitement des signaux est-il adéquat ? : Analyse initiale du traitement

Dans les présents travaux la détection des trajets est effectuée après filtrage adapté. Ce choix a été adopté lors de la phase de définition des mesures dans le golfe d'Oman, et les niveaux et les bandes des signaux adaptés en conséquence. La forte contrainte d'automatisation a par contre été satisfaite d'une part en occultant la phase d'identification individuelle des trajets (c'est l'ensemble de la réponse impulsionnelle mesurée qui est comparée à celle simulée) et d'autre part en rajoutant une phase préliminaire d'inversion de la géométrie instrumentale.

La Figure 14 expose ensuite la démarche corrective appliquée. Les caractéristiques des signaux utilisés ayant été adaptés à la contrainte de précision et de résolution, nous nous sommes attachés dans cette étude au critère de rapidité (contrainte temps-réel) et d'automatisation. En effet, dès qu'une méthode automatique est en place, il est possible d'effectuer un grand nombre d'inversions et de disposer alors de jeux de données (mesurées, inversées) pour analyser les performances de la méthode et réfléchir ensuite à des améliorations relatives aux autres critères.

Critères de performances		Eléments de réponse		Règles de choix
Fiabilité	Efficacité	Précision	Manque de précision temporelle	Augmenter la bande des signaux et utiliser un traitement adapté à la bande des signaux Si Doppler : Corriger l'effet Doppler (pas de signaux tolérants au Doppler sans biais)
		Résolution	Manque de résolution temporelle	Augmenter la bande des signaux et utiliser un traitement adapté à la bande des signaux Si Doppler : Corriger l'effet Doppler ou utiliser un signal tolérant
		Répétitivité	Dépend des aléas	Utiliser des traitements statistiques (exemple : moyennage) pour augmenter le rapport signal à bruit
	Robustesse	Généralités	Dépend fortement du bruit	Augmenter le rapport signal à bruit → augmenter l'énergie du signal, donc augmenter soit la durée soit la puissance. Diminuer l'effet du bruit par filtrage ou par le choix de la période de la manip
		Stabilité	Manque de stabilité	Peut être dû à la modulation de fréquence : démoduler
Rapidité		Dépend du calculateur, de l'algorithme choisi et de son implémentation		Optimisation des coûts compte tenu des technologies disponibles à l'instant de l'étude

Figure 14 : Analyse de la question : le traitement des signaux est-il adéquat ? : Analyse corrective du traitement

En ce qui concerne le module d'inversion, nous avons rappelé brièvement en introduction la différence entre les méthodes d'inversion directes et indirectes. La Figure 15 synthétise l'ensemble des cas possibles, en distinguant d'une part l'inversion directe de l'inversion indirecte, et d'autre part les hypothèses qu'il est possible de faire sur le modèle direct (linéaire, linéarisable localement ou non linéaire). Pour chaque cas, les méthodes utilisables sont indiquées. Les méthodes mentionnées doivent être considérées comme définissant des familles, tant il existe de variantes au sein de chacune. Nous présentons en annexe la classification de l'abondante bibliographie menée dans [Noël- Viala -Sarzeaud 1999] dans ce tableau.

	G linéaire	G linéarisable localement	G non linéaire
<b>Inversion directe</b>	Inverse généralisée	Inverse généralisée	Réseaux de neurones
<b>Inversion indirecte</b>	Moindres carrés Filtre de Kalman	Méthode linéaire itérative Filtre de Kalman étendu Méthode d'optimisation locale: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descente de gradients (simples ou conjugués)</li> <li>• Méthode de Newton</li> <li>• Méthode adjointe</li> </ul>	Méthode d'optimisation globale : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recherche exhaustive</li> <li>• Méthodes heuristiques</li> <li>• Pénalité / récompense</li> <li>• Recuit simulé</li> <li>• Algorithmes génétiques</li> </ul>

Figure 15 : Synthèse des méthodes d'inversion. G est le modèle direct reliant les paramètres aux données. Cette synthèse est extraite de [Noël- Viala -Sarzeaud 1999]

La Figure 16 présente des éléments de réflexion pour analyser l'adéquation du module d'inversion.

Les modules d'inversion mis au point dans ces travaux relèvent d'une méthode d'optimisation globale soit de type recherche exhaustive effectuée par exploration exhaustive (EE), soit de type méthode heuristique effectuée par une exploration intelligente (Simplex). La méthode type EE a été choisie initialement en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de sa robustesse, notre contrainte la plus forte étant l'automatisation de l'inversion. En cours d'étude, il s'est avéré qu'elle ne permettait pas d'explorer assez rapidement un espace de paramètres permettant de décrire un milieu évolutif. Nous nous sommes alors orientés vers la seconde méthode (Simplex), tout aussi automatisable, plus complexe à mettre en œuvre, mais plus performante en terme de rapidité d'exploration.

**Inversion Directe (ID) : 2 phases :**  
 P1 : Construction du modèle inverse G-1 à partir du modèle direct G  
 P2 : Inversion des données

**Inversion Indirecte (II) : 1 phase**  
 Inversion itérative des données à l'aide du modèle direct G

Critères			Eléments de réponse	
			Inversion Directe	Inversion Indirecte
Fiabilité	Efficacité	Précision	Aucune maîtrise du résidu en P2. On suppose que c'est celui atteint en P1.	Peut généralement être aussi faible qu'on le souhaite, à condition de disposer de temps.
		Résolution	Dépend de l'échantillonnage de l'espace des solutions, quelle que soit la méthode. Augmenter le nombre de couples utilisés pour construire le modèle inverse (ID), ou augmenter le nombre d'itérations (II) si on dispose de temps.	
		Répétitivité du résultat	Totale.	Non si on utilise une méthode stochastique (G non linéaire) ou si on change la connaissance a priori requise (G linéaire ou linéarisable). Utile si on n'a aucune connaissance a priori ou si on en est incertain pour produire des solutions très différentes qui pourront être départagées a posteriori.
	Robustesse	Généralités	Si changement de configuration entre P1 et P2, alors les résultats peuvent être aberrants. Vérifier la configuration utilisée pour P1.	Robustesse totale dans la limite de validité du modèle direct. Vérifier celle-ci.
		Stabilité	Très bonne dans tous les cas.	
Rapidité			Si G est linéaire ou linéarisable, P1 est très rapide, sinon P1 peut être assez longue. Dans les 2 cas P2 est instantanée.	Si G est linéaire ou linéarisable, rapide MAIS nécessité de connaissance a priori (solution de référence) ; sinon, temps de calcul fonction de la précision souhaitée.

Figure 16 : Analyse de la question : L'inversion est-elle correcte ?

## 2.4. Intérêt de la démarche globale d'inversion

La puissance du concept de démarche globale d'inversion vient du fait qu'il permet d'ajuster au mieux les performances de l'inversion au besoin opérationnel en traitant le problème dans sa globalité. La définition de critères de performances et de démarche d'analyse des performances en regard de ces critères a conduit à l'élaboration d'un système expert. Ce dernier a servi à initier les choix méthodologiques au démarrage de cette thèse et a constamment été utilisé au cours de ces travaux. Il a permis d'améliorer au fur et à mesure de l'étude les performances de la méthode développée, tant au niveau du temps de calcul que de la précision des inversions.

## Chapitre 3      Données physiques : réelles et simulées

Ce chapitre présente les données physiques du problème de l'inversion géoacoustique par grand fond en large bande, c'est-à-dire les données mesurées et les données simulées considérées dans cette thèse. Les premières sont issues de la campagne HERACLES effectuée par l'EPSHOM/CMO en 2002 dans le golfe d'Oman et à laquelle nous avons participé. Notre rôle au cours de cette campagne a consisté à développer la chaîne de traitement embarqué des données environnementales et acoustiques, puis à la mettre en œuvre en temps réel durant la campagne. Le premier paragraphe de ce chapitre présente la campagne : il en rappelle brièvement les objectifs avant de décrire les données réelles mesurées disponibles ainsi que la vérité terrain acquise sur la zone. Le principe est basé sur l'émission d'un signal large bande et sur l'analyse du signal reçu sur une antenne après transmission dans le milieu marin. Les sorties de filtrage adapté du signal reçu constituent les données mesurées ou les données réelles du problème de l'inversion géoacoustique.

Le second paragraphe présente les données simulées. Celles-ci sont les réponses impulsionnelles relatives à la transmission émetteur-antenne de réception simulées par le code RAYSON modélisant la propagation du son en milieu marin par une méthode de rayons. Ce code, que nous développons depuis 1993, a été adapté à la spécificité du problème de l'inversion géoacoustique et nous en présentons brièvement ses fonctionnalités, avant de décrire le calcul optimisé des réponses impulsionnelles, c'est-à-dire prenant en compte les caractéristiques instrumentales, et de montrer dans quelle limite celles-ci sont le « pendant » des sorties de filtrage adapté.



### 3.1. Présentation des données réelles : la campagne HERACLES

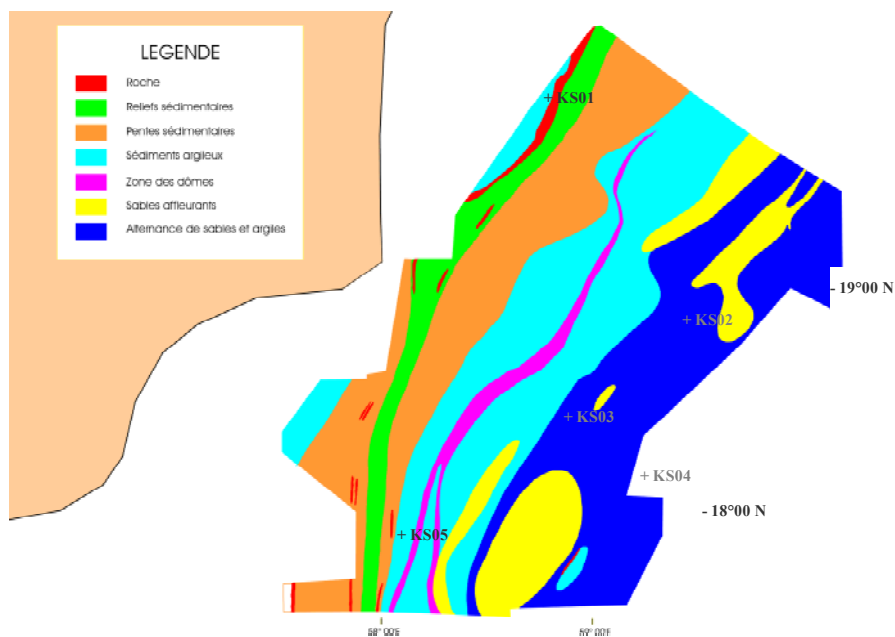
Ce paragraphe présente les données recueillies et élaborées durant la phase 3 de la campagne HERACLES qui s'est déroulée en Mars 2002, dans le golfe d'Oman, au large de Masirah. La phase 3 de cette campagne concerne la phase de collecte des données acoustiques dans un but d'évaluation du concept REA acoustique.

#### 3.1.1. Données environnementales

Une investigation complète des caractéristiques environnementales de la zone a été conduite par le SHOM. Le levé bathymétrique effectué sur zone n'a pas présenté d'écart significatif avec le modèle bathymétrique disponible sur les cartes marines. Nous avons donc utilisé ce dernier. La zone est plane et ne présente pas d'anomalie bathymétrique ; les fonds moyens sont de 3400 mètres. Les positions sont fournies par un GPS et ont une précision d'une dizaine de mètres. Une routine de calcul des distances horizontales entre deux points de l'ellipsoïde de référence a été écrite.

La connaissance climatologique de la zone a été améliorée par une série de mesures AXBT la semaine précédant la campagne. Des profils XCTD ont été effectués tous les 10 Nm environ le long des radiales. L'analyse des profils de célérité mesurés montre que le milieu est globalement stratifié avec un profil de type November.

Le levé sédimentologique a été obtenu à partir de cinq carottages et de radiales au sondeur de sédiment. Il a permis au SHOM [Stéphan 2002] d'établir une cartographie des sédiments superficiels. Elle définit des provinces homogènes comme le montre la figure suivante :



**Figure 17 : Cartographie sédimentologique. Présence de sables affleurants ou des alternances de couches de sable et d'argile sur la partie est de la zone (couleurs jaune et bleu marine). Les points KS01-05 représentent les points de carottages**

La zone semble scindée en deux parties avec, sur la partie Est, la présence de fonds sableux d'épaisseurs diverses. Ces fonds peuvent être recouverts d'un dépôt argileux. Sur la partie Ouest, les fonds sont a priori vaseux.

Des carottages effectués en cinq points (KS01 à KS05) ont permis de caractériser plus finement le sédiment.

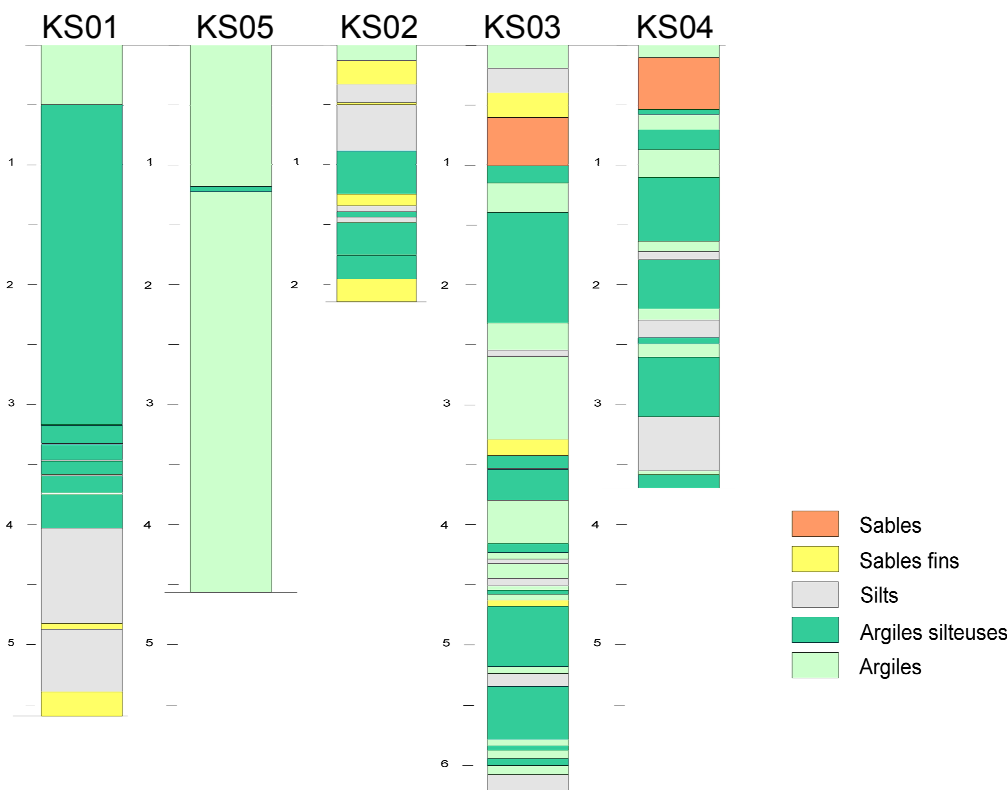


Figure 18 : Structures sédimentaires verticales des points KS01-05

Le calcul des coefficients de réflexion est réalisé pour la structure de chaque carottage, en supposant un fond fluide multicouche. Il permet d'anticiper le comportement de ces structures sédimentaires en réflexion à très basses fréquences. Les propriétés acoustiques des cinq carottages sont données sur la Figure 19:

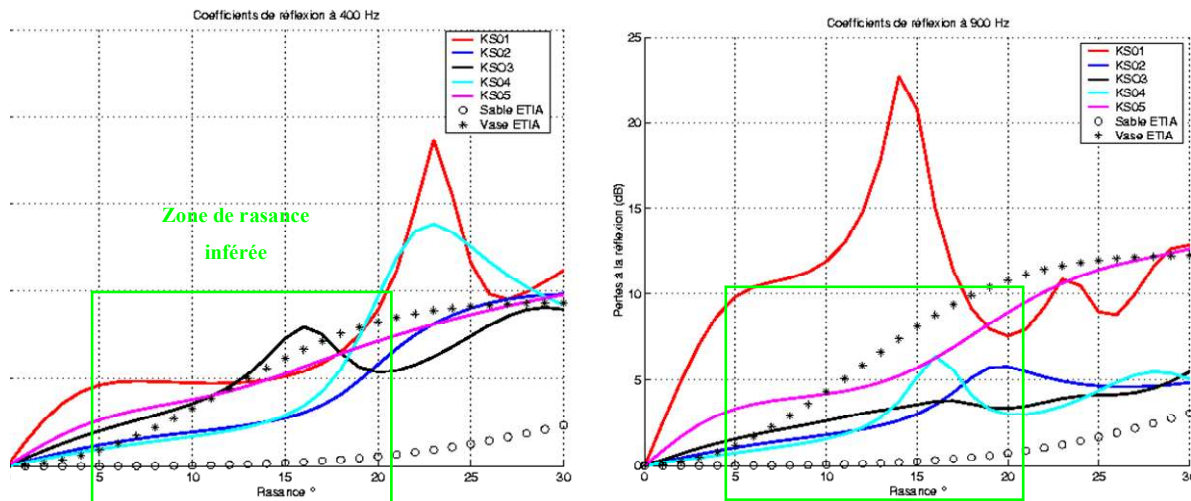


Figure 19 : Coefficients de réflexion à 400 Hz (à gauche) et à 900 Hz (à droite) relatifs aux 5 carottages, ainsi que ceux typiques du sable ( $P = 0.4$ ) et de la vase « standard » ( $P = 0.8$ )

Dans le cas du carottage KS01 le sédiment est vaseux et absorbant ; il est a priori plus absorbant que la vase, aux faibles rasances et à la première réflexion fond (entre 10 et 15 degrés) pour la fréquence 900 Hz.

Du point de vue du coefficient de réflexion, la structure KS02 se comporte comme un sédiment intermédiaire entre vase et sable, ce qui correspond bien à l'alternance de couches de sable et d'argile.

La structure KS03 a un comportement différent à 400 Hz qu'à 900 Hz. A 400 Hz, le fond se comporte comme un sédiment vaseux alors qu'il est plus réfléchissant à 900 Hz.

Le comportement relatif à KS04 est intermédiaire entre la vase et le sable excepté à 400 hertz au delà de 15° de raseance, où il se comporte comme de la vase.

Enfin, la structure KS05 est un sédiment assez proche de la vase.

Les zones de travail ont été définies en fonction du levé sédimentaire La Figure 20 présente une cartographie de la zone expérimentale montrant les trajectoires des quatre radiales de mesure, R1 à R4. Ces radiales ont été choisies à partir de la connaissance a priori du fond sédimentaire de la zone. Elles sont situées sur des fonds plats, et dans des zones homogènes tant en ce qui concerne les sédiments, que la bathycélérimétrie. Elles font environ 25 Nm de longueur.

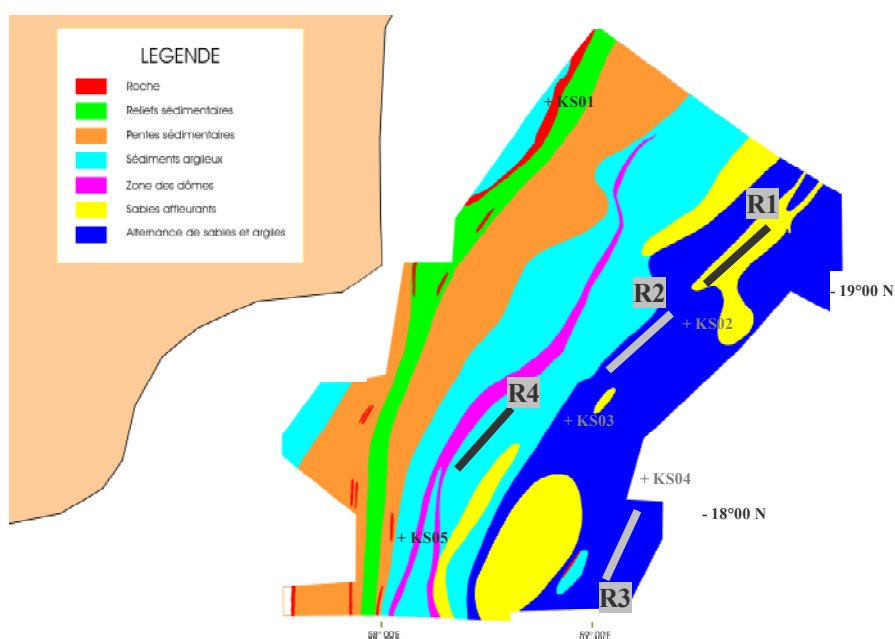


Figure 20 : Position géographique des radiales

Les objectifs de ces radiales sont les suivants :

- la radiale R1 a pour objet de caractériser le banc sableux situé au Nord-Est de la zone
- la radiale R2 a pour objet de caractériser la province sédimentaire à affleurement sableux de la partie Est de la zone pour laquelle on dispose du carottage KS02 et KS03
- la radiale R3 est destinée à confirmer le caractère réfléchissant de la partie Est de la zone et de voir notamment si la zone se comporte de la même façon qu'en R2 ; on dispose pour cette zone du carottage KS04 ;
- la radiale R4 a pour but de confirmer que la partie ouest de la zone est plus vaseuse et moins réfléchissante que la partie Est ; nous disposons dans cette zone du carottage KS05.

### 3.1.2. Schéma instrumental de la campagne HERACLES

Pour chaque radiale de la campagne, la bouée TELEMAQUE est mise à l'eau avec une antenne de 11 hydrophones (H1 à H11). Le BO D'ENTRECASTEAUX tracte une source sonore à 50 m de profondeur et s'éloigne de cette bouée jusqu'à dépassement de la zone de convergence. Il revient ensuite en immergeant la source plus profondément (100 m). Les signaux sont enregistrés par la bouée. En fin de radiale, la bouée est relevée et les données sont extraites et détrimées.

Dans le cadre de la démonstration de la faisabilité du REA acoustique, nous avons récupéré les données acoustiques et environnementales et les avons traitées à bord en temps réel. Des simulations numériques étaient réalisées spécialement pour cette campagne et comparées aux données mesurées. Les résultats des traitements, simulations et comparaisons étaient envoyés au CMO à Brest, par mail, après chaque radiale, pour analyse et rédaction des Bulletins acoustiques destinés aux forces et diffusés le lendemain de la mesure. Si la faisabilité du REA a été démontrée, aucune inversion n'a été effectuée à bord, et l'objet de cette thèse est bien de mettre au point une méthode permettant d'effectuer les inversions en temps réel dans ce type de situation.

La figure suivante présente le schéma instrumental de la campagne :

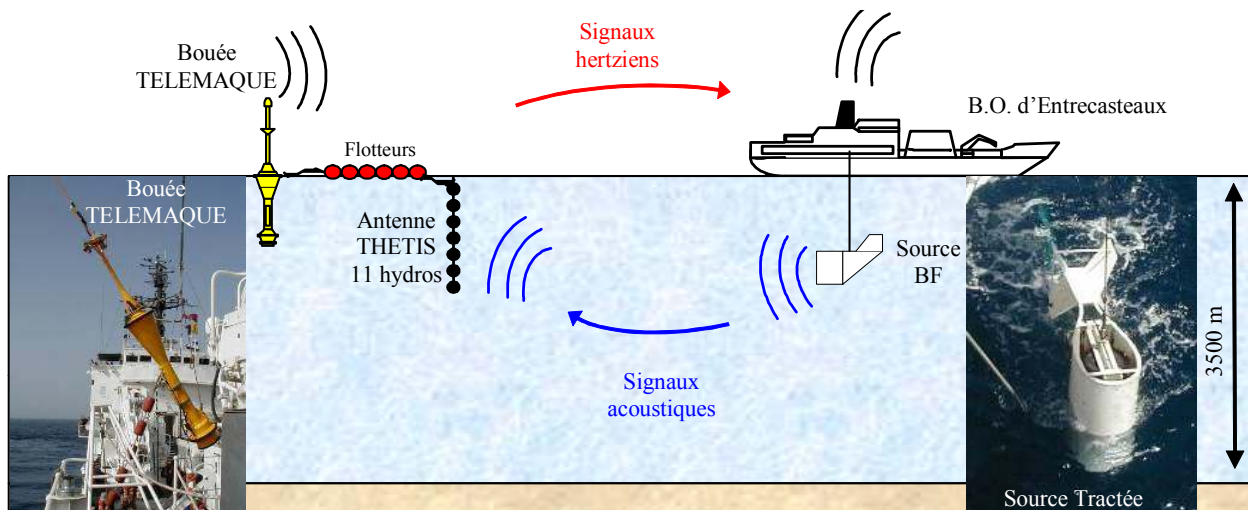


Figure 21 : Schéma instrumental de la campagne HERACLES

La source TBF (ouverture en site +/- 25°, niveau d'émission 205 dB, fréquence entre 300 et 1000 Hz) a été remorquée à 3 Nd. Le signal émis est constitué de séquences de quatre modulations linéaires de fréquence: S1, S2, S3, CMOX de durée 8 s chacun. Ces séquences sont séparées de 15 s. Le tableau suivant donne les caractéristiques fréquentielles des signaux. Ces fréquences ont choisies de façon à coller le plus possible aux fréquences des sonars tactiques en respectant les contraintes liées à la bande passante de la source.

Signal	Fréquence min	Fréquence max
S1	300	500
S2	550	750
S3	800	1000
cmox	300	1000

Figure 22 : Caractéristiques des signaux émis

Les trois premiers signaux S1, S2 et S3 sont destinés aux mesures de pertes et ne sont pas traités dans cette thèse. Le quatrième CMOX est un signal large bande destiné aux études d'inversion.

Le système d'enregistrement TELEMAQUE est laissé dérivant avec une antenne hydrophonique verticale constituées de 11 hydrophones placés entre 25 et 120 mètres.

### 3.1.3. Conditions de propagation

Les conditions de propagation acoustique dans la zone sont relativement stables. La figure suivante en est une bonne illustration. Elle présente le résultat de la simulation, effectuée avec le logiciel RAYSON (CF 3.2. Simulations numériques de la propagation sonore océanique), du champ de pertes dans le contexte de la campagne HERACLES. Tous les profils étant de type november, l'énergie émise dans la thermocline se propage vers le fond. Après une réflexion à une douzaine de kilomètres, les ondes sonores viennent en résurgence (angles de rasance supérieurs à 13 °, distances entre 7 et 15 Nm) ou en convergence (angles entre 11° et 13°, distances entre 15 et 20 Nm).

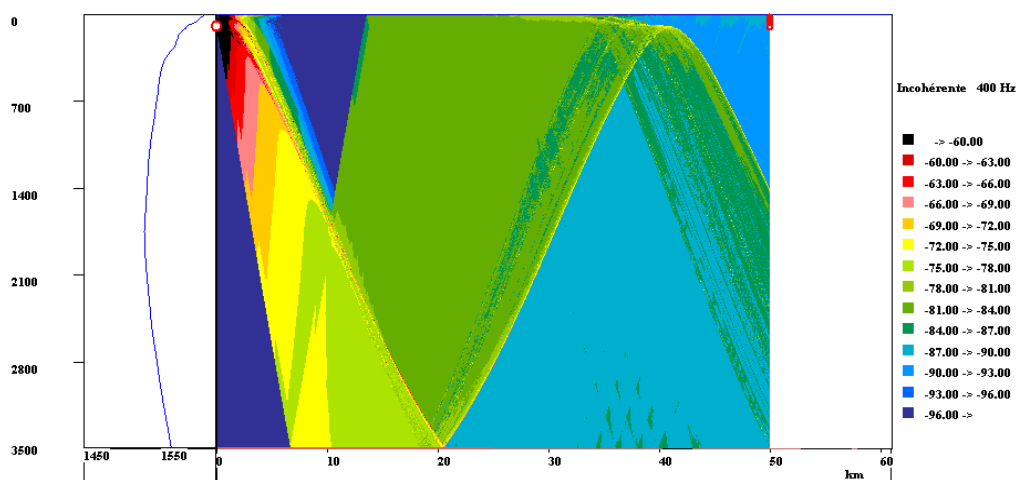


Figure 23 : Champ de pertes représentant les conditions typiques de propagation durant la campagne HERACLES (radiale R2\_100). Le profil est de type november ; l'énergie émise dans la thermocline se propage vers le fond. On observe une réflexion sur le fond, puis les ondes sonores viennent en résurgence (angles de rasance supérieurs à 13 °, distances entre 7 et 15 Nm) ou en convergence (angles entre 11° et 13°, distances entre 15 et 20 Nm)

### 3.1.4. Système d'acquisition des signaux

Les gains de la chaîne d'acquisition sont représentés sur la figure suivante :

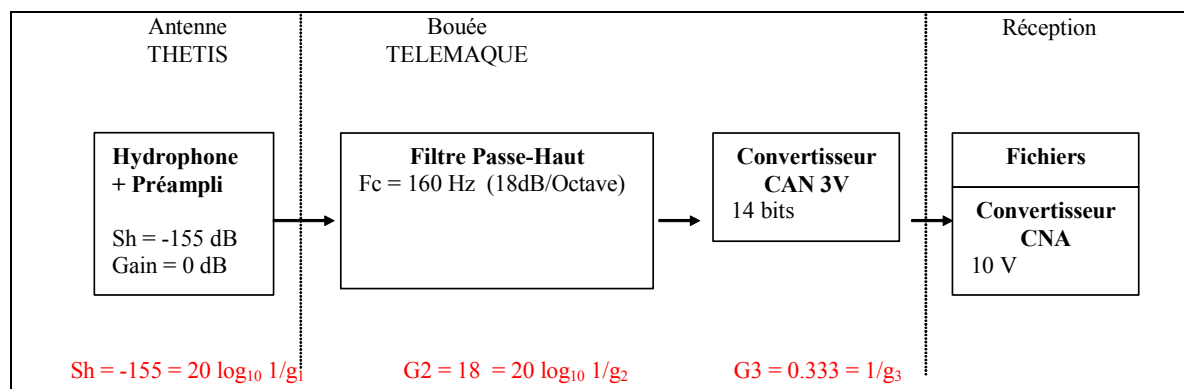


Figure 24 : Gains de la chaîne d'acquisition

Le diagramme de directivité de la source est le suivant :

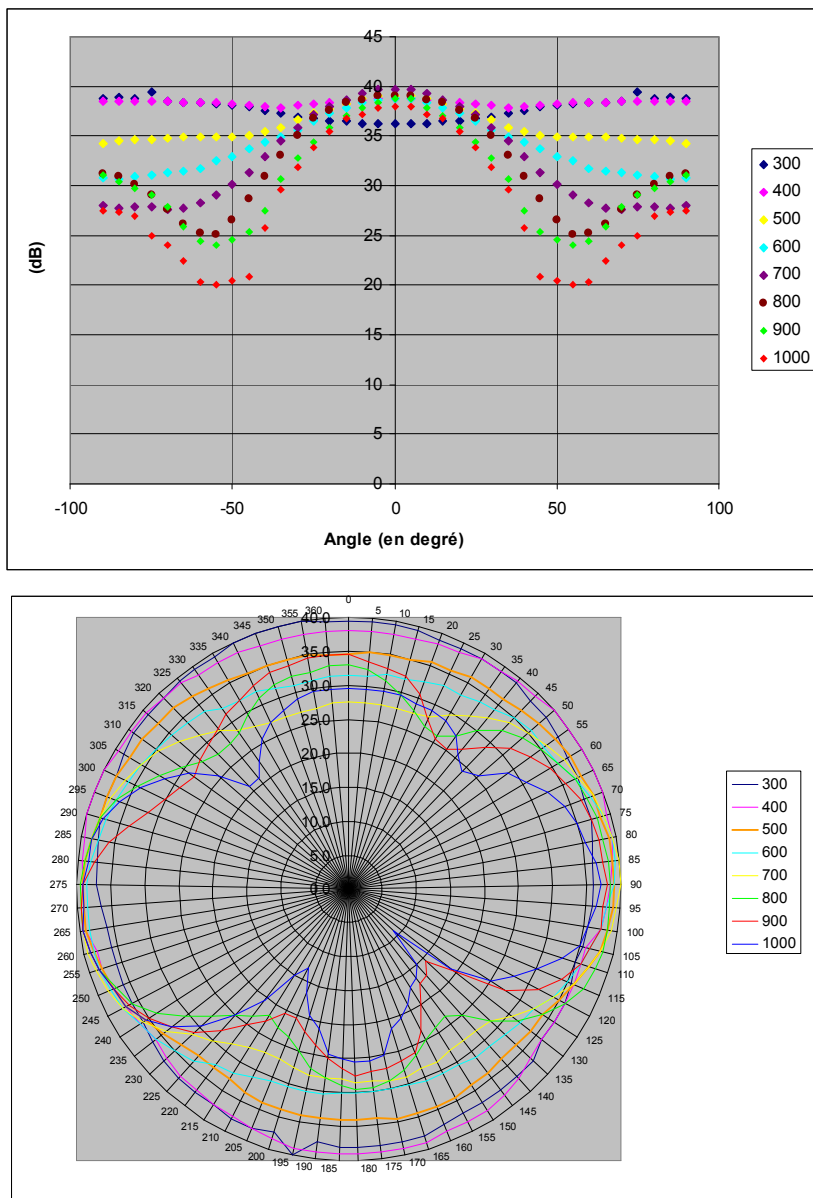


Figure 25 : Sv de la source du CMO

Pour les simulations nous avons utilisé une courbe de Sv qui est la moyenne de la valeur mesurée sur les quatre quadrans. En effet la position de la source n'est pas connue en gisement (elle peut tourner sur elle même), et la position du haut et du bas par rapport à l'étalonnage n'est pas connue. La correction de niveau ayant été faite par rapport à l'hydro étalon et non pas par rapport au niveau d'émission mesuré, nous avons rentré uniquement des atténuations par rapport au niveau reçu en face de la source.

La durée des signaux est de 8s. Ils sont échantillonnés à 4096 Hz.

### 3.1.5. Chaîne de traitement des données

L'architecture du système de traitement des signaux est donnée sur la Figure 26. Nous l'avons développée spécifiquement pour cette campagne. Le flux des données acoustiques constituant la majeure partie des données est représenté en rouge, celui des données environnementales en bleu et des données de simulations en vert.

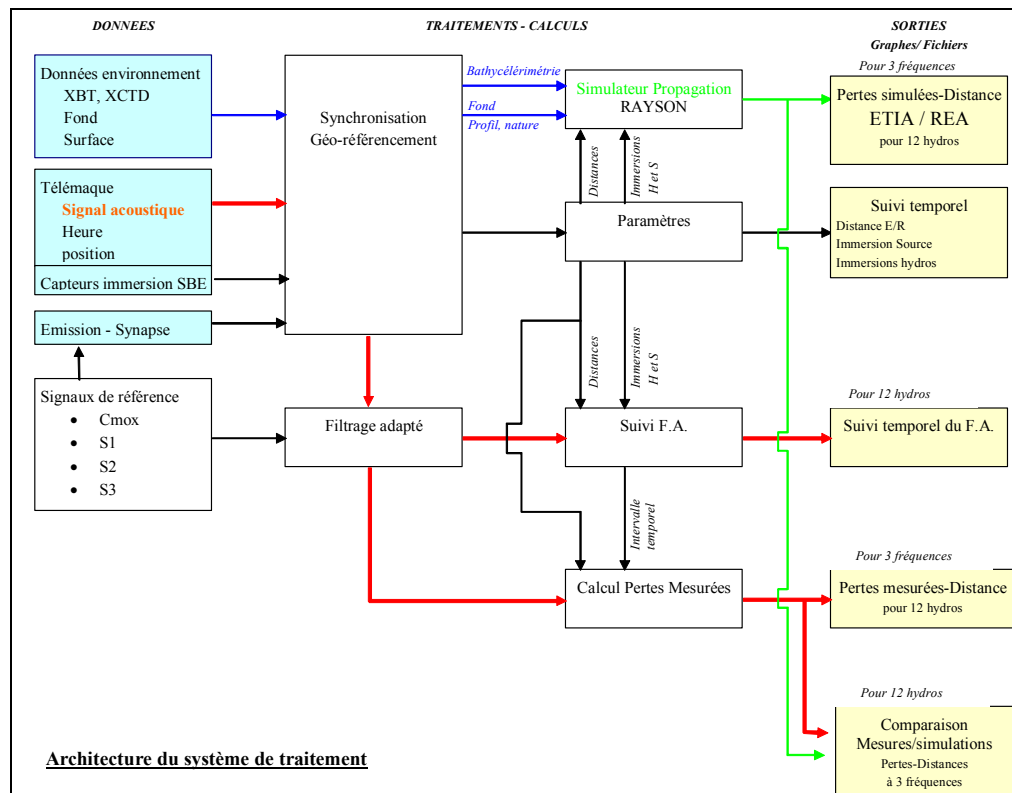


Figure 26 : Architecture de la chaîne de traitement des données

### 3.1.6. Données acoustiques : Sorties de filtrage adapté

Les quatre passes R1, R2, R3 et R4 de la campagne (chacune de 12 h environ) ont été entièrement traitées pour la partie compression d'impulsion et pour les quatre signaux S1, S2, S3 et CMOX, c'est-à-dire que les données acoustiques ont subi démodulation, recalage temporel, filtrage adapté et calibration du niveau.

La Figure 27 montre un exemple de l'évolution temporelle des sorties de filtrage adapté obtenu dans le cas de la radiale R2\_100, avec réception sur H11. On distingue nettement trois types de trajets dans les premier et second paquets d'arrivée en début de radiale. La zone de convergence est mise en évidence par un maximum d'énergie sur le premier paquet juste avant sa disparition. Le rapport signal à bruit est assez bon pour que l'on puisse observer aussi un troisième paquet d'arrivée, dont l'identification pic à pic est par contre plus délicate.

L'analyse des données mesurées met en évidence, surtout pour le signal large bande CMOX, de l'information inversible sur le plan géoacoustique. Les zones de convergence ayant été bien encadrées, on observe nettement la contribution des différents paquets de rayons qui se sont réfléchis sur le fond avec des secteurs angulaires différents.

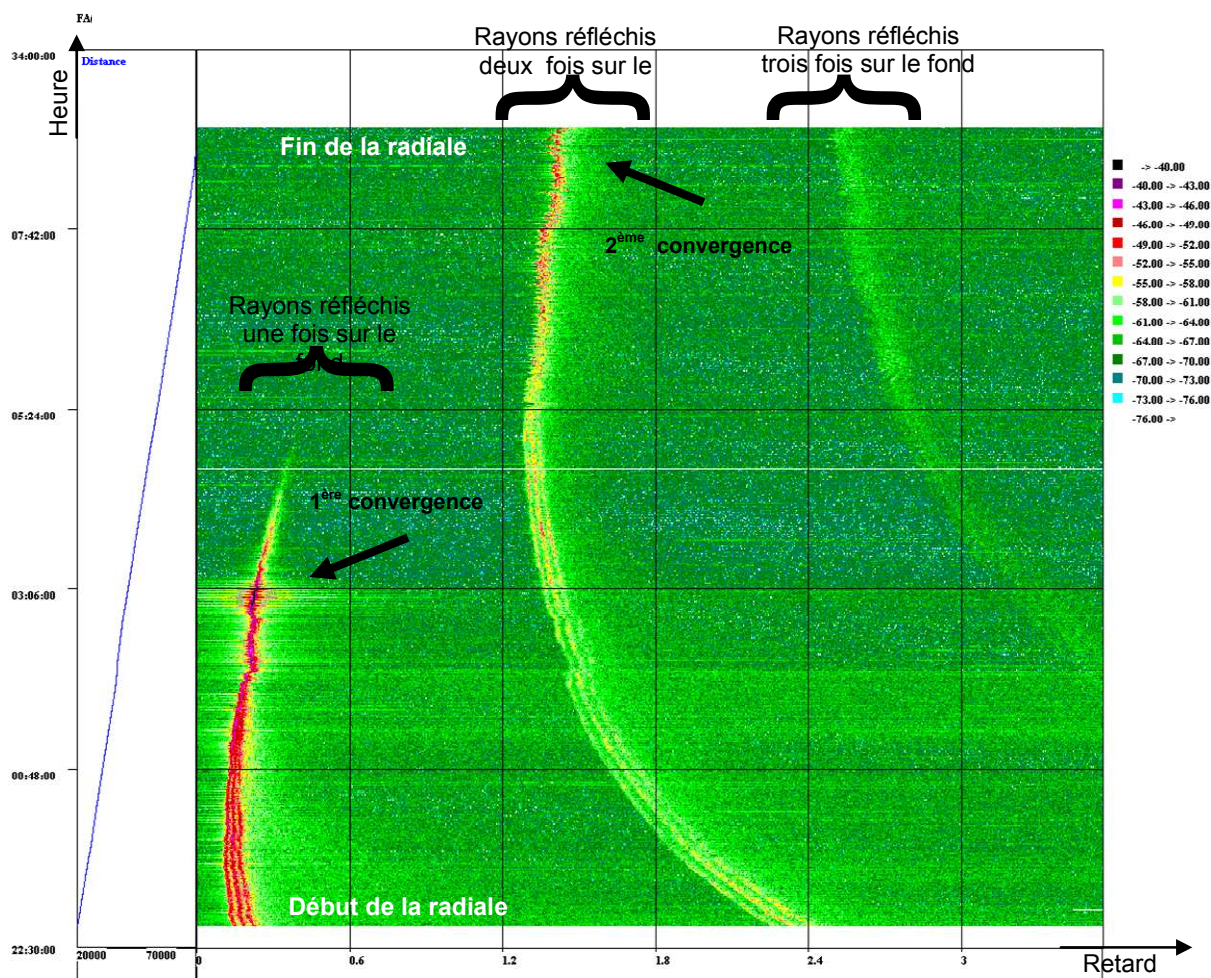


Figure 27 : Sorties de filtrage adapté (cas R2\_100 Réception sur H11) – Signal CMOX. On distingue très nettement les rayons réfléchis sur le fond avec 1, 2 ou 3 réflexions. On repère également aisément les premières et deuxièmes convergences (accroissement de l'énergie en couleur rouge)



## 3.2. Simulations numériques de la propagation sonore océanique

### 3.2.1. Modèle de rayons sonores

#### 3.2.1.1. Logiciel RAYSON

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du code RAYSON de simulation de la propagation du son, en milieu océanique stratifié ou évolutif, développé depuis 1993 en collaboration avec C. Noël [Rayson] [Noël et al 1999] au sein de la société Semantic TS. Ce logiciel RAYSON prédit le champ sonore par une méthode dite de rayons, c'est-à-dire qu'il résout l'équation des rayons, simplification de l'équation de Helmholtz dans le cas des hautes fréquences, donnée par :

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \left( \frac{C_0}{C(x,z)} \frac{dx}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial x} \\ \frac{d}{ds} \left( \frac{C_0}{C(x,z)} \frac{dz}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial z} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} dx = \cos\theta \cdot ds \\ dz = -\sin\theta \cdot ds \end{cases} \quad \text{Equation des rayons} \quad \text{Eq. 2}$$

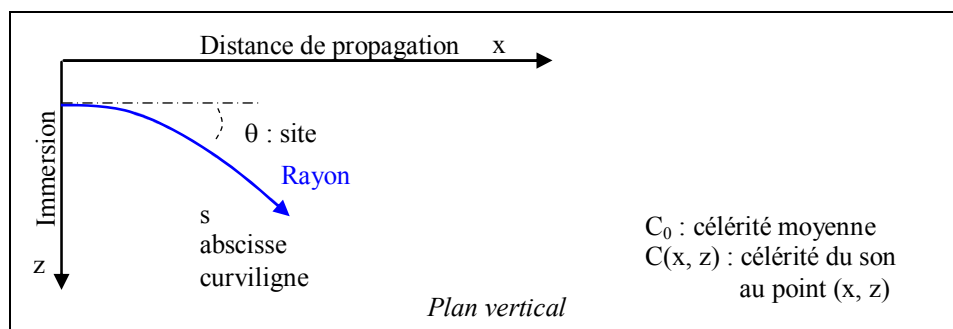


Figure 28 : Notations relatives à l'équation des rayons

Cette équation différentielle exprimant la trajectoire d'un rayon, fait intervenir les valeurs locales de la célérité et de ses dérivées [Etter 1996] [Robinson- Lee 1994]. Lorsque le milieu est stratifié et que la célérité est interpolée linéairement en fonction de la profondeur, elle admet des solutions analytiques qui sont des portions de cercles; lorsqu'il est évolutif, c'est-à-dire que le profil de célérité varie avec la distance de propagation, il n'existe pas de solution analytique générale même pour des lois simples de la célérité  $C(r,z)$ . L'équation des rayons est donc intégrée numériquement à l'aide d'un schéma de Runge-Kutta d'ordre 4 progressant le long de l'axe des distances, mais aussi le long de l'axe des immersions pour la détection des strates horizontales de célérité différente ou encore sur les pentes du fond pour la localisation du point d'impact [Crouzeix-Mignot 1984]. Dans ce cas la célérité est interpolée par une fonction bi-linéaire des coordonnées spatiales. La précision à l'ordre 4 est donc assurée tout le long de la trajectoire. Le programme est réalisé en C++. Une option de calcul permet de modéliser les chenaux de transmission et les communications acoustiques sous-marines [Noël et al 2002] [Viala et al 2004].

Les environnements pris en compte sont les suivants:

- Milieu stratifié ou homogène horizontalement : dans ce cas le logiciel calcule les solutions analytiques et en effectue la discrétisation.

- Milieu évolutif, c'est-à-dire variable avec la distance de propagation. Dans ce cas une description 2D en distance et immersion du champ de célérité est nécessaire afin que le logiciel puisse procéder au calcul numérique des solutions. Le nombre de profils n'est limité que par la mémoire du calculateur.
- Fond évolutif : c'est-à-dire que le profil bathymétrique et la nature du fond sont variables avec la distance de propagation. Dans ce cas une description détaillée du fond en fonction de la distance horizontale est nécessaire. Elle précise la profondeur du fond et le type du fond est sélectionné parmi les fonds suivants: sédiments décrits par la porosité au sens de Hall-Watson, sable, vase, roche au sens de Podeswa, fond fluide, fond fixe (Valeur de la perte constante en dB), fond multicouche. Le logiciel RAYSON a été adapté à la prise en compte de fonds de type mono ou multicouche (ceci est explicité en détails aux paragraphes suivants)
- Surface variable : correspond à la prise en compte d'une surface variant dans l'espace et dans le temps.

Ce logiciel offre les fonctionnalités de suivantes : calcul des trajectoires et des caractéristiques des rayons simples et des rayons propres, pertes le long des rayons, réponse impulsionnelle du milieu ou de sa fonction de transfert, ainsi que le calcul du champ de pertes par sommation cohérente ou incohérente des rayons, ou par rayon d'intensité maximale. Le calcul de la réponse impulsionnelle est ensuite utilisé par la fonction de calcul de signal sonore transmis. (CF 5.2.2. Module Temps-Réel de RAYSON). Il dispose de plus de fonctionnalités pour itérer automatiquement des lancés multiples de calculs, ainsi que des visualisations diverses, curseurs et repères dynamiques.

Les paramètres des calculs sont pris en compte dans RAYSON de façon optimisée en termes de temps de calcul. La façon dont le code est programmé permet en particulier d'effectuer un seul calcul pour toute la gamme de fréquences, pour tous les types de calcul de pertes et pour tous les types de nature de fond. Cette fonctionnalité est cruciale pour respecter les contraintes temps réel de la méthode d'inversion.

De plus le code permet de prendre en compte les paramètres des senseurs ainsi que le diagramme Sv de directivité en site de la source et le diagramme Sh de directivité des hydrophones.

Ces aspects sont détaillés dans les paragraphes suivants.

### 3.2.1.2. Amplitude complexe et perte d'un rayon sonore

Dans l'approche rayons, le champ sonore est représenté par une combinaison d'ondes planes progressives. Chaque front d'onde est défini par son rayon ; la direction du rayon est celle de la normale au plan d'onde et il est caractérisé par son amplitude et sa phase. Les calculs sont effectués dans le domaine complexe et une onde plane admet pour amplitude complexe :  $A e^{i\phi}$  où :

A est l'amplitude de l'onde : elle dépend de la géométrie du rayon, de la nature des obstacles rencontrés, et de l'atténuation de l'onde en fonction de la fréquence.

$\phi$  est la phase de l'onde définie par  $[2 \pi f t - k_x \cdot x - k_y \cdot y + \Delta\phi]$  avec

- f la fréquence
- t le temps de trajet indépendant de la fréquence
- $(k_x, k_y)$  les coordonnées du nombre d'onde

- $\Delta\phi$  les différents déphasages dus aux réflexions sur des obstacles, dépendant ou non de la fréquence selon le type de fond considéré.

L'intensité d'un rayon est définie comme le carré du module de l'amplitude complexe. Si  $I_x$  est l'intensité du rayon à une distance  $x$  de la source et  $I_0$  à 1m de la source, le rapport  $\frac{I_0}{I_x}$  définit la perte du rayon. Les grandeurs de pertes, d'intensité et d'amplitude se déduisent donc l'une de l'autre.

### 3.2.2. Calcul des pertes des rayons sonores

Nous calculons la perte d'un rayon par la somme des contributions suivantes :

- La perte par divergence géométrique : cette grandeur ne dépend pas de la fréquence car la trajectoire des rayons est indépendante de la fréquence.
- La perte par absorption dépendante de la fréquence
- La perte par réflexion sur les obstacles : fond ou surface dépendant de la géométrie et de la fréquence

Différents modèles sont implémentés pour le calcul des pertes par absorption et par réflexion sur les obstacles surface et fond. La figure suivante synthétise les différentes étapes du calcul des pertes d'un rayon.

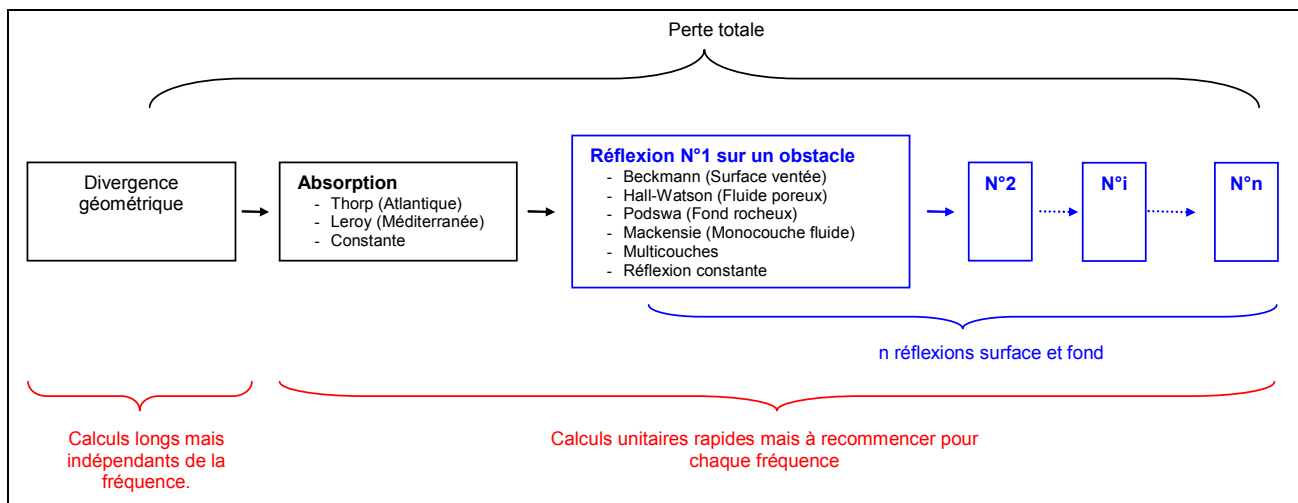


Figure 29 : Etapes du calcul des pertes

3.2.2.1. Perte par divergence géométrique

Pour calculer les pertes par divergence géométrique on utilise le théorème de Gauss relatif à la conservation de l'énergie dans un faisceau volumique: l'intensité sonore  $I_x$  à une distance  $x$  comprise dans le faisceau de surface  $S_x$  est égale à l'intensité sonore  $I_1$  comprise dans le faisceau de surface  $S_1$  à 1 m de la source. Ainsi:  $I_x S_x = I_1 S_1$ .

Ceci est appliqué à la géométrie de notre problème décrite sur la figure suivante:

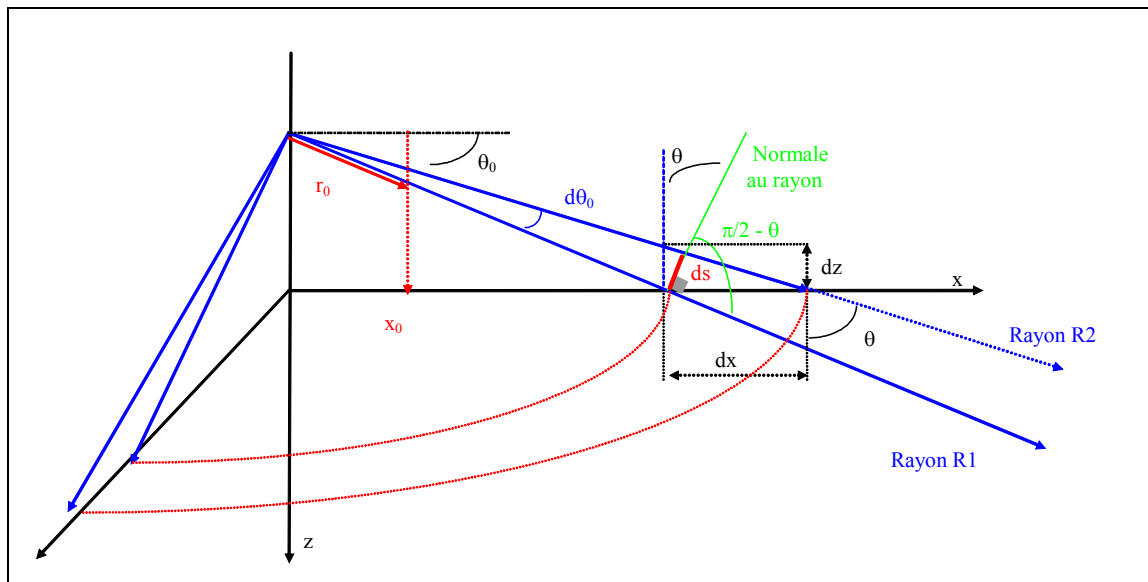


Figure 30 : Notations pour le calcul des pertes par divergence géométrique

Calcul de la surface irradiée en x:

Si dx est petit:

La portion de surface irradiée sur la perpendiculaire aux rayons est:  $ds = dx \cos(\pi/2 - \theta) = dz \cos\theta$

La surface irradiée dans l'espace (3D) est

$$\begin{aligned} S_x &= 2 \pi x ds \\ &= 2 \pi x dx \sin\theta \\ &= 2 \pi x dz \cos\theta \end{aligned}$$

Calcul de la surface irradiée en  $x_0$ :

$$\begin{aligned} S_0 &= 2 \pi x_0 ds_0 \\ &= 2 \pi r_0 \cos\theta_0 r_0 d\theta_0 \\ &= 2 \pi r_0^2 \cos\theta_0 d\theta_0 \end{aligned}$$

Pour  $r_0 = 1$  m:  $S_0 = 2 \pi \cos\theta_0 d\theta_0$

La perte est définie par le rapport des intensités:

$$Pr_t = \frac{I_1}{I_x} = \frac{S_x}{S_1} = \frac{x dz \cos\theta}{\cos\theta_0 d\theta_0} \tag{Eq. 3}$$

ou encore en décibels:

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \left[ \frac{x dz \cos\theta}{\cos\theta_0 d\theta_0} \right] \tag{Eq. 4}$$

### 3.2.2.2. Perte par atténuation fréquentielle

La perte par atténuation ou amortissement correspond à l'absorption due au milieu de propagation lui-même. (On ne tient pas compte ici de l'absorption due aux hétérogénéités du milieu correspondant à l'anomalie de propagation.). Les coefficients suivants sont issus d'études théoriques et expérimentales sur le coefficient d'amortissement du son dans l'eau de mer. Ils tiennent compte de l'absorption pure (viscosité, conductibilité thermique, relaxation moléculaire) et englobent tout ce qui n'est pas divergence géométrique excepté les pertes dues à la surface et au fond.

La perte par atténuation s'exprime en décibels par:  $P_{dB} = \alpha r$

qui peut encore s'écrire:  $P_{dB} = 10 \log_{10} [e^{\alpha r}]$  avec  $\alpha = \frac{\ln 10 \cdot a}{10}$

En Méditerranée on utilise la formule empirique de Leroy valable de 100 Hz à 10 kHz [Leroy 1965]:

$$\begin{aligned} a &= 6.10^{-3} f^2 + 0.16 \frac{f_r f^2}{f_r^2 + f^2} \\ &= \left[ 6.10^{-3} + \frac{0.256}{2.56 + f^2} \right] f^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. 5}$$

où f est exprimée en kHz, a en dB/km et avec  $f_r = 1.6$  kHz

En Atlantique on utilise la formule empirique de Thorp [Thorp 1967]:

$$a = \frac{f^2}{0.9144} \left[ \frac{0.1}{1 + f^2} + \frac{40}{4100 + f^2} \right] \quad \text{Eq. 6}$$

où f est exprimée en kHz.

### 3.2.2.3. Pertes par réflexion sur les obstacles (Surface ou fond)

Les rayons subissent des pertes à la réflexion sur les obstacles fond ou surface. Le logiciel RAYSON est modulaire et plusieurs modèles sont implémentés. Ainsi même si nous avons travaillé par la suite uniquement avec la porosité (modèle de Hall-Watson) ces travaux peuvent repris immédiatement avec une autre modélisation du fond, fond multi-couches par exemple.

### i. Pertes à la réflexion à surface

La perte par réflexion à la surface de la mer, si le modèle de Beckmann est sélectionné, est calculée à l'aide de la formule suivante [Beckmann 1963]:

$$P_{dB} = 20 \log_{10} \left[ \left( 0.3 + \frac{0.7}{1 + \left( \frac{0.0182 V_v^2 f}{40} \right)^2} \right) \sqrt{1-K} \right] \quad \text{Eq. 7}$$

où K prend la valeur minimale entre 0.707 et  $\sin \theta_r + 0.1 \frac{e^{\frac{3.8110^{-2} \theta_r^2}{3 + 2.6 V_v}}}{\sqrt{\frac{5\pi}{3 + 2.6 V_v}}}$

$V_v$  est la vitesse du vent, (On peut admettre généralement que celle-ci est égale à 5 fois la valeur de l'état de mer), f la fréquence est exprimée en kHz et  $\theta_r$  est l'angle de rasance, c'est-à-dire l'angle que fait le rayon avec la surface exprimé en degrés.

### ii. Pertes à la réflexion sur un fond poreux monocouche

Dans cette thèse les routines d'inversion et de traitement des données sont réalisées pour une modélisation simple du fond. Pour chaque type de fond (Roche, ou fluide de porosité P comprise entre 0 et 1), la perte par réflexion au fond est calculée selon différentes formules explicitées ci-après.

Pour un sédiment quelconque que l'on qualifie par sa porosité, la formule utilisée est celle de Hall-Watson [Hall - Watson 1967] faisant intervenir la fréquence et l'angle de rasance, formule relativement fiable par grands fonds:

$$P_{dB} = [3.7 + 17.5(P - 0.27)] F^{1/3} \left\{ \operatorname{tgh} \left[ \left( \frac{\pi \theta_r P}{180.0.24} \right)^{\frac{1.5}{P}} \right] + \frac{1 - \frac{P}{0.27} \left( \frac{\theta_r}{90} \right)^2}{12.5} \right\} \quad \text{Eq. 8}$$

$$= 10 \log_{10} [\operatorname{Pr} t^2]$$

où P est la porosité, f la fréquence en kHz, Prt la perte en valeurs naturelles et  $\theta_r$  l'angle de rasance en degrés.

Le sable et la vase sont des cas particuliers du cas sédiment quelconque pour lesquels la porosité est égale respectivement à 0.4 pour le sable et 0.8 pour la vase.

Pour les fonds rocheux accidentés, où la perte est peu dépendante de la fréquence, la formule utilisée, due à Podeswa est la suivante [CTSN 1995]:

$$P_{dB} = 2.4036 \ln(20.576 \theta_r + 82.44) = 10 \log_{10} [\operatorname{Pr} t^2] \quad \text{Eq. 9}$$

où  $\theta_r$  est l'angle de rasance en degrés et Prt la perte en valeurs naturelles.

### iii. Pertes à la réflexion sur un obstacle monocouche fluide

Dans le cas de la réflexion sur un fond de sédiment monocouche fluide, le coefficient de réflexion est complexe. Le milieu marin est caractérisé par la célérité au fond et la densité de l'eau. Dans le modèle de Mackenzie [Mackenzie 1960], le fond fluide absorbant est caractérisé par:

- la célérité des ondes de compression ( $C_{oc}$  donnée en m/s)
- un coefficient d'absorption de ces ondes ( $\alpha_{oc}$  donné en dB/ $\lambda$ )
- sa densité ( $\rho_f$ )

La célérité complexe du son dans le fond est:

$$C_{oc\ complex} = \frac{C_{oc}}{1 + i \frac{\alpha_{oc}}{2\pi \cdot 8.686}} \quad \text{Eq. 10}$$

Soit  $\theta_f$  l'angle de rasance du rayon heurtant le fond, en appliquant les lois de la réflexion on obtient:

$$\sin \theta_f = \sqrt{\left[ 1 - \left( \cos \theta_r * \frac{C_{oc\ complex}}{C} \right)^2 \right]} \quad \text{Eq. 11}$$

On appelle R le rapport  $R = \frac{\rho_{eau}}{\rho_f} \cdot \frac{C}{C_{oc}} \cdot \frac{\sin \theta_f}{\sin \theta_r} = Rr + iRi$  Eq. 12

et R' le rapport  $R' = \frac{1 - \bar{R}}{1 + R}$  Eq. 13

La perte est définie par le rapport des intensités exprimé en décibels par:

$$P_{dB} = \left| 10 \log_{10} \left[ \arg(R'^2) \right] \right| \quad \text{Eq. 14}$$

Nb : Ce type de modèle est aussi utilisable pour la surface dans le cas de la glace.

### iv. Pertes à la réflexion sur un fond multicouche fluide

Le modèle de fond qui sera utilisé dans la suite des travaux est le modèle de fond fluide monocouche. Ce modèle permet de décrire un milieu équivalent d'un point de vue de l'acoustique, c'est-à-dire un milieu constitué d'une couche homogène fictive, dont les propriétés acoustiques seraient **équivalentes** à celles du fond réel. Dans ce cas la nature géotechnique des fonds sous-marins importe peu ; mais cette méthode fournit une représentation acoustique pertinente des fonds marins.

La méthode que nous avons mise en place fonctionne pour un nombre N de couches de sédiment fluide. Elle est basée sur le calcul du coefficient de réflexion-transmission fluide-fluide [Jensen et al 1994] [Brekhovskikh - Godin 1992]. Elle est décrite en détails en annexe. Elle a été validée en mono-couche par comparaison avec les courbes des ouvrages de référence et en multi-couche par comparaison avec le modèle du CMO développé par JC Legac [Legac 2003].

Le fond est décrit par un fichier d'extension \*.mcf contenant les valeurs des paramètres célérité, densité, atténuation et épaisseur pour chaque couche, ainsi que célérité et atténuation de cisaillement dans la dernière couche si elle est dure. (CF Annexe)

#### 3.2.2.4. Optimisation du calcul des pertes

Nous procédons de la façon suivante :

- Pour chaque rayon et pour chaque réflexion sur les interfaces, nous stockons les caractéristiques liées à la géométrie, c'est-à-dire les valeurs des angles de rasance en ces lieux. Nous stockons aussi la valeur de la perte par divergence géométrique. Ces termes sont longs à calculer. Ils ne dépendent pas de la fréquence, et une fois stockés il peuvent être réutilisés pour les différentes fréquences.
- Ensuite, dans une seconde phase, nous faisons varier la fréquence et calculons d'une part les pertes liées à l'atténuation fréquentielle. Connaissant les angles de rasance nous pouvons d'autre part déterminer alors rapidement les pertes dues aux réflexions fond et surface. Ces étapes ont nécessité au préalable un travail soigneux de spécifications dans des unités homogènes des différents coefficients usuellement définis dans la littérature en dB-intensité.

Remarque : si ces calculs sont devenus plus rapides, car la géométrie n'a pas à être recalculée pour chaque fréquence, ils n'en demeurent pas moins relativement longs car les fonctions empiriques définissant les coefficients sont définies à l'aide de fonctions logarithmes ou exponentielles coûteuses en temps de calcul. Nous avons essayé de remplacer ces fonctions analytiques par d'autres plus rapides à calculer. Ainsi nous avons découpé l'intervalle des fréquences et approché les formules de Thorp et de Leroy par des polynômes par morceaux, donnant les mêmes valeurs numériques mais étant plus rapides à calculer. Ces formules sont données valables par leurs auteurs entre 100 Hz et 10 kHz ; au delà ou avant les polynômes sont extrapolés afin de fournir des valeurs réalistes. Par exemple pour Leroy, l'expression analytique du polynôme sous sa forme de Horner<sup>3</sup> est la suivante (avec FkHz la fréquence exprimée en kHz) :

$$\text{Si FkHz} \leq 0.5 \quad A = ((-0.0146 \cdot \text{FkHz} + 0.1077) \cdot \text{FkHz} - 0.00006) \cdot \text{FkHz}$$

$$\text{Si FkHz} > 0.5 \text{ et } \text{FkHz} < 40 \quad A = ((0.00016684 \cdot \text{FkHz} - 0.00027969) \cdot \text{FkHz} + 0.072638) \cdot \text{FkHz}$$

$$\text{Si FkHz} \geq 40 \quad A = 15$$

Cependant le gain en temps de calcul obtenu est négligeable. De plus, les fonctions individuelles par morceaux devenant alors compliquées, on s'éloigne de la philosophie de développement du code qui impose modularité et donc adaptation aisée à différents modèles de calcul des pertes au fond, en surface ou par atténuation. Nous avons donc repris les fonctions analytiques sous leur forme initiale.

<sup>3</sup> L'approximation polynomiale du coefficient d'atténuation s'exprime de la façon suivante sous forme classique :  $a(f) = a f^3 + b f^2 + c f$  et sous forme de Horner :  $a(f) = f (c + f (b + f (a)))$



### 3.2.3. Modèle large bande : Calcul de la réponse impulsionnelle

Afin de modéliser la propagation d'un signal non plus monochromatique, mais large bande, nous avons introduit un module de calcul de la réponse impulsionnelle.

#### 3.2.3.1. Rayons propres

Le calcul de la réponse impulsionnelle nécessite au préalable celui des rayons propres. Pour un couple (source, récepteur) donné, les rayons propres sont les rayons particuliers qui connectent la source au récepteur ; ils définissent les chemins d'accès du son depuis la source vers le récepteur ; on parle de propagation par trajets multiples. Ils correspondent à des angles de tir particuliers et sont caractérisés par leur style. Le style d'un rayon selon la nomenclature internationale est défini de la façon suivante : +/-  $[n_1, n_2, n_3, n_4]$  avec:

+/-	Signe de l'angle d'émission du rayon
$n_1$	Nombre de réflexions en surface
$n_2$	Nombre de réfractions en bas
$n_3$	Nombre de réfractions en haut
$n_4$	Nombre de réflexions sur le fond

Il caractérise un front d'onde.

Le problème de la recherche des rayons propres est résolu en cherchant parmi l'ensemble des trajectoires possibles celles qui atteignent le récepteur, c'est-à-dire par une méthode de tir. La procédure de recherche des rayons propres autorise une erreur sur l'immersion à l'arrivée. Elle commence par effectuer une séquence de tirs d'initialisation. Elle conserve en mémoire les angles successifs  $\theta$  et  $\theta + \Delta\theta$  tels que les rayons encadrent le récepteur. Elle explore alors l'intervalle  $[\theta, \theta + \Delta\theta]$  par dichotomie et interpolation linéaire afin de trouver l'angle  $\theta_0$  pour lequel le rayon arrive sur le récepteur avec l'erreur admissible. Deux rayons propres sont différents s'ils présentent des styles différents c'est-à-dire s'ils appartiennent à des fronts d'ondes différents.

La Figure 31 présente un exemple de tracé de rayons propres pour les 11 couples émetteur-récepteurs de la configuration expérimentale.

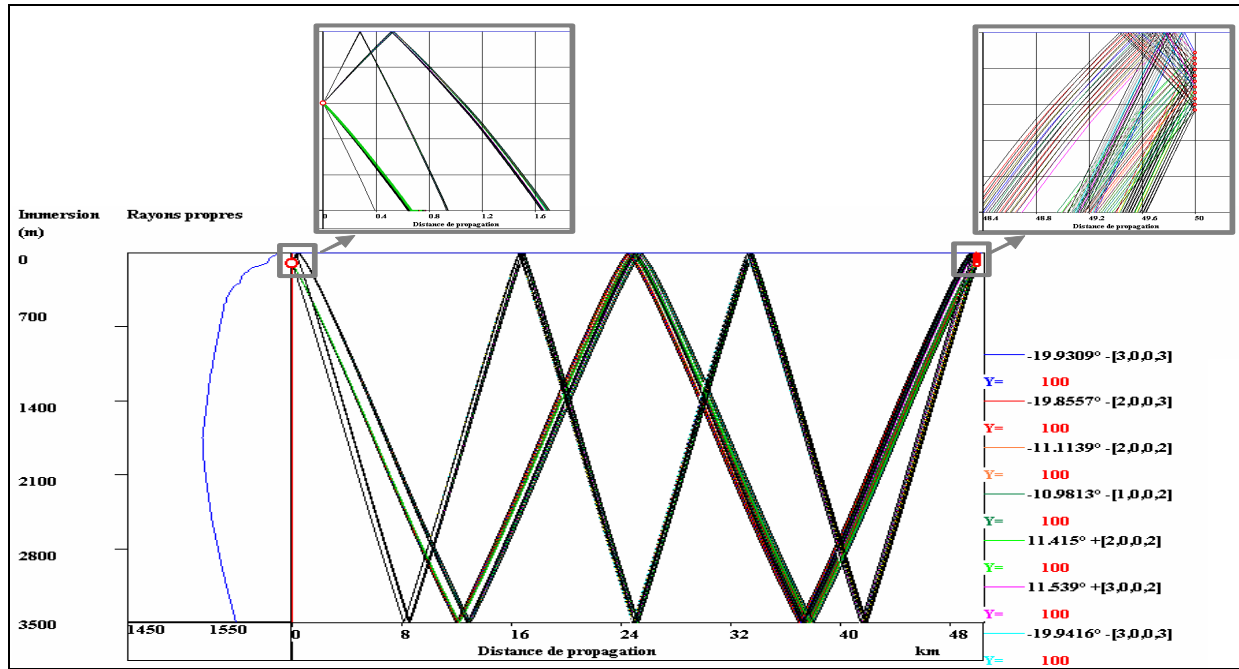


Figure 31 : Exemple de tracé de rayons propres (i.e. reliant la source et le récepteur) dans la configuration de la campagne HERACLES. On observe les trajectoires des deux premiers paquets de rayons de la réponse impulsionnelle.

Le son émis par la source emprunte les trajectoires définies par les rayons propres pour atteindre le récepteur. Il traverse des zones où la célérité est importante, où il sera accéléré, et des zones où la célérité est plus faible, où il sera ralenti. Le temps mis par le signal varie donc selon le rayon propre emprunté. Le temps de trajet relatif au  $n^{\text{ième}}$  rayon propre, lorsque le courant est négligeable, est défini par [Granvaux 1985] [Munk – Wunsch 1979]:

$$t_n = \int_{\Gamma_n} \frac{ds}{c(r, z)} \quad \text{Eq. 15}$$

où  $\Gamma_n$  est la trajectoire du rayon,  $s$  l'abscisse curviligne le long du rayon.

Il correspond à l'intégrale le long du rayon de sa lenteur (inverse de la célérité). Les angles d'arrivée des rayons apportent une information supplémentaire qui permet de différencier deux rayons de même temps de trajet.

La méthode des rayons permet de déterminer les temps de trajet et les trajectoires des  $N$  rayons propres, ainsi que leurs angles et leurs amplitudes :  $\{(t_n, \Gamma_n, \theta_n, a_n), n = 1, N\}$

### 3.2.3.2. Insuffisance de la pseudo-réponse impulsionnelle et nécessité d'un modèle large bande

L'atténuation de l'énergie le long du rayon se calcule en sommant les pertes par réflexion au fond et en surface, les pertes par atténuation dans le milieu marin et les pertes géométriques. Pour une fréquence donnée d'émission,  $F$ , on peut déterminer l'amplitude et le temps de propagation de chaque rayon propre ; on peut alors construire la pseudo-réponse impulsionnelle :

$$\tilde{h}(t) = \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - t_n) \quad \text{Eq. 16}$$

où  $a_n$  est l'amplitude du  $n^{\text{ième}}$  rayon propre et  $\delta$  la fonction de Dirac. Si elle donne une bonne approximation, couramment utilisée, de la réponse du milieu à une impulsion centrée autour de  $F$ , cette méthode ne fournit pas une description suffisamment précise de la réponse impulsionnelle dans une problématique d'inversion, et un modèle large bande doit être utilisé.

3.2.3.3. Réponse impulsionnelle

Si le signal émis est large bande et il faut alors déterminer la réponse impulsionnelle du milieu qui tient compte du fait que l’amplitude du rayon varie avec sa fréquence ce qui n’est pas le cas du temps de trajet. La réponse impulsionnelle est la réponse du milieu à une impulsion sonore. Soit  $e(t)$  le signal émis,  $h(t)$  la réponse impulsionnelle du milieu pour un couple émetteur/récepteur donné. Le signal reçu  $p(t)$  peut s’écrire :

$$p(t) = (e * h)(t) \tag{Eq. 17}$$

où \* représente le produit de convolution.

3.2.3.4. Calcul de la réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle s’obtient selon les étapes suivantes schématisées sur la Figure 32:

- 1<sup>ère</sup> étape : Détermination des temps de trajets des rayons propres
  - Pour chaque fréquence
    - Détermination de l’amplitude des rayons propres
    - Sommation cohérente des énergies des différents rayons propres
  - Obtention de la fonction de transfert du milieu
- 2<sup>ème</sup> étape : Transformée de Fourier inverse de la fonction de transfert du milieu

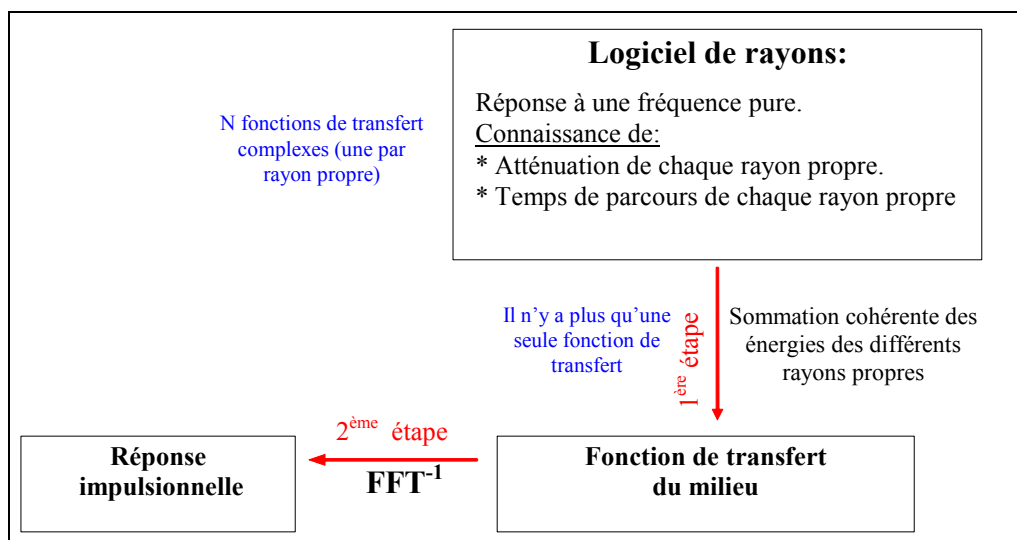


Figure 32 : Schéma présentant la méthode de calcul de la réponse impulsionnelle: Du logiciel de rayons à l’obtention de la réponse impulsionnelle

Une première phase a consisté à calculer la réponse impulsionnelle sur l’intégralité du support temporel, c’est-à-dire, comme l’illustre la Figure 33, de 0 à  $T_{RI}$ .

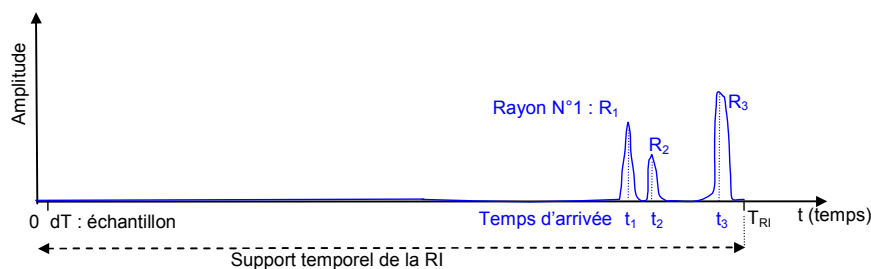


Figure 33 : Illustration : Support temporel de la réponse impulsionnelle

Dans l'exemple de la Figure 33, on obtient la fonction de transfert du signal en sommant dans le domaine complexe les trois fonctions de transfert complexe relatives à chaque rayon propre.

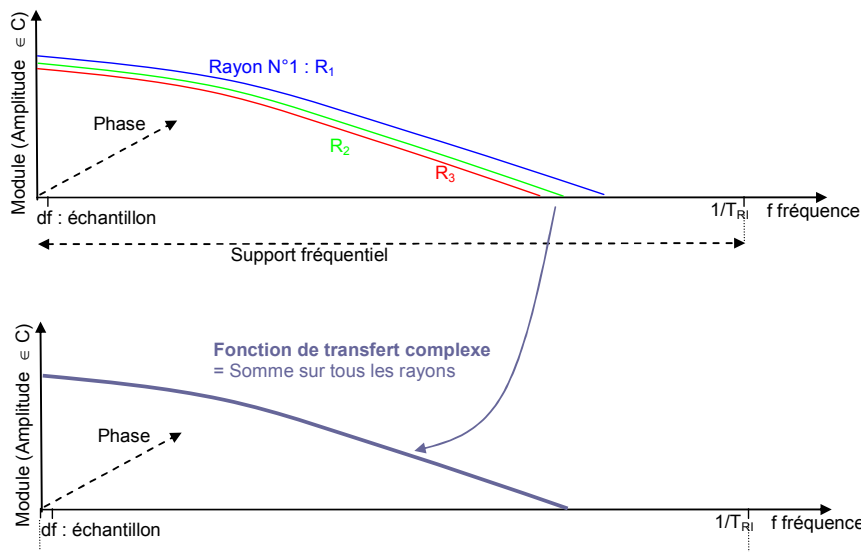


Figure 34 : Illustration de la sommation cohérente des fonctions de transfert de chaque rayon

Si on s'intéresse par exemple à des signaux aux fréquences allant jusqu'à 2 kHz, alors la fréquence de numérisation est, suite à l'application du théorème de Shannon,  $F_{Num} = 4096$  Hz.

Si la propagation a lieu sur 45 km, le support temporel de la réponse impulsionnelle est  $T_{RI} = 30$  s.

L'ordre de grandeur du nombre de points pour le calcul de la  $FFT^{-1}$  est :  $30 \times 4096 = 120\ 000$  points, à doubler pour la gestion numérique des fréquences négatives, soit 240 000 points.

Cependant nous effectuons des calculs de « FFT inverse réelle ». Dans ce cas, on suppose que le signal obtenu après la FFT inverse de la fonction de transfert est un signal réel, et le signal fréquentiel doit présenter une symétrie hermitienne. L'algorithme de la FFT réelle inverse peut alors se faire sur n points (au lieu de 2n points si on avait effectué les calculs avec la FFT complexe) [Max 1985] [Le Chevalier 1989].

	Cas général	Dans notre exemple
<b>Calcul de la RI sur l'intégralité du support temporel</b>	N : Nombre de rayons propres $T_{RI}$ = temps de propagation $F_{num}$ = fréquence d'échantillonnage	$N_p = 3$ rayons $T_{RI} = 30$ s (Propagation sur 45 km) $F_{num} = 4096$ Hz ( $F_{max} = 2$ kHz)
Nombre de points d'amplitude complexe à calculer	$N \times T_{RI} \times F_{num}$	$3 \times 30 \times 4096 = 360\ 000$
FFT inverse	1 sur $T_{RI} \times F_{num}$	1 sur 120 000 points

Figure 35 : Caractéristiques du calcul de la RI sur l'intégralité du support temporel

Si le calcul de la réponse impulsionnelle est correct, à ce stade il est trop long pour envisager une application en REA.

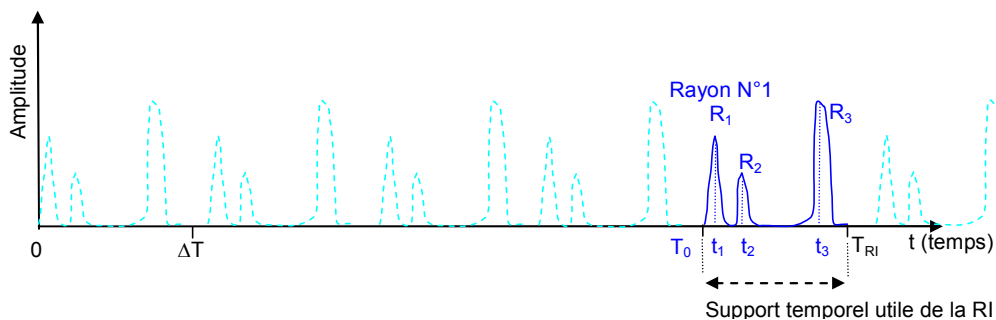
3.2.3.5. Optimisation du calcul de la réponse impulsionnelle

**i. Calcul de la RI sur le support temporel « utile »**

La seconde idée a consisté à travailler sur l'intervalle utile de la réponse impulsionnelle, défini par

$$\Delta T = [ T_0, T_{RI} ] \text{ où } T_0 \text{ est le pied de raie correspondant au premier rayon RI}$$

Dans ce cas la théorie du traitement du signal nous indique que la transformée de Fourier peut être effectuée avec un fréquence d'échantillonnage plus faible, égale à 2 fois la bande du signal, soit  $2/\Delta T$ . [Max 1985]. La FFT inverse fournit alors un signal temporel périodisé, de période  $\Delta T$ , mais dont on connaît l'intervalle réel d'observation de  $T_0$  à  $T_{RI}$ , puisque l'on connaît les instants d'arrivée des premier et dernier rayons propres.



**Figure 36 : Illustration : Support temporel utile de la réponse impulsionnelle**

La gestion du repliement est effectuée par une fonction modulo liée à la périodicité, qui a pour finalité de conserver les valeurs obtenues que dans l'intervalle d'observation [Kunt 1980].

Dans le cas de notre exemple précédent, au lieu de calculer une FFT sur une durée de 30 s et à 4096 Hz, nous ramenons le problème à un calcul sur un support temporel de 1s mais en gérant le problème du repliement.

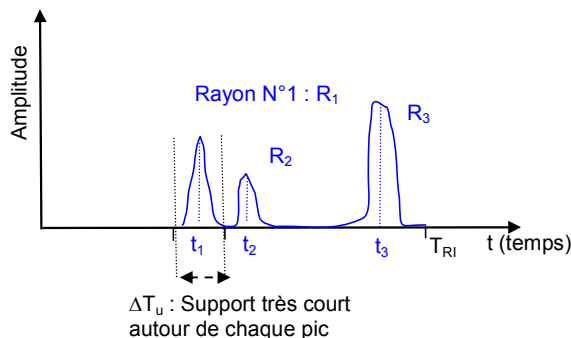
Calcul de la RI sur le support temporel	Cas général	Dans notre exemple
	N : Nombre de rayons propres $\Delta T = [ T_0, T_{RI} ]$ : support utile $F_{num}$ = fréquence d'échantillonnage	$N_p = 3$ rayons $\Delta T = 1$ s $F_{num} = 4096$ Hz ( $F_{max} = 2$ kHz)
Nombre de points d'amplitude complexe à calculer	$N \times \Delta T \times F_{num}$	$3 \times 1 \times 4096 = 12\ 288$
FFT inverse	1 sur $\Delta T \times F_{num}$	1 sur 4096 points

**Figure 37 : Caractéristiques du calcul de la RI sur le support temporel utile**

Si le gain est important, car le calcul de la RI est 30 fois plus rapide que précédemment, il est encore insuffisant pour une application en REA opérationnel.

## ii. Calcul de la RI par sommation des RI unitaires

Dans un troisième temps nous exploitons la linéarité de la transformée de Fourier. Ainsi, la FFT inverse de la somme des fonctions de transfert de chaque rayon est égale à la somme des FFT inverses des fonctions de transfert des rayons :  $\sum_i [FFT^{-1}[FT_i]] = FFT^{-1}\left[\sum_i FT_i\right]$ . On définit alors un intervalle très court autour de chaque arrivée de rayon (comme l'illustre la Figure 38) sur lequel on calcule une réponse impulsionnelle unitaire pour chaque rayon propre.



**Figure 38 : Illustration : Support temporel très court autour de chaque pic de la RI**

Dans notre exemple numérique, le calcul précédent est remplacé par le calcul de 3 FFT inverses sur 128 points sur un intervalle de l'ordre de grandeur de 10 à 20 ms.

Nous avons donc remplacé une FFT inverse sur 4096 points par 3 FFT inverses sur 128 points.

	<b>Cas général</b>	<b>Dans notre exemple</b>
<b>Calcul de la RI par sommation des RI unitaires</b>	N : Nombre de rayons propres $\Delta T_u$ : support unitaire $F_{num}$ = fréquence d'échantillonnage	$N_p = 3$ rayons $\Delta T_u = 20$ ms $F_{num} = 4096$ Hz ( $F_{max} = 2$ kHz)
Nombre de points d'amplitude complexe à calculer	$N \times \Delta T_u \times F_{num}$	$3 \times 0.02 \times 4096 = 246$
FFT inverse	N sur $\Delta T_u \times F_{num}$	3 sur 128 points

**Figure 39 : Caractéristiques du calcul de la RI par sommation des RI unitaires**

Le gain obtenu est considérable. Il est dans un rapport 50 avec la méthode précédente et 1500 avec la méthode classique. L'algorithmie de traitement du signal mise en place permet à présent des applications de type REA opérationnel.

### 3.2.3.6. Remarque

Le modèle de rayons n'étant pas valable à basses fréquences, la partie BF de la fonction de transfert est mal modélisée. Cependant ceci n'est en pratique pas gênant dans la mesure où l'on utilise des signaux impulsionnels ne présentant pas d'énergie en BF ; la partie mal modélisée de la RI est convoluée par un signal nul et n'a donc pas d'impact.

### 3.2.3.7. Lien entre réponse impulsionnelle et sortie de filtrage adapté

En réalité les signaux mesurés sont des sorties de filtrage adapté. Si on veut pouvoir les comparer à des simulations il faut déterminer, à partir des réponses impulsionnelles calculées, des « équivalents » au filtrage adapté. En effet ne sachant pas réaliser l'opération de déconvolution qui nous permettrait de passer de la sortie de filtrage adapté mesuré à la réponse impulsionnelle mesurée, nous dégradons la réponse impulsionnelle simulée afin de générer une sortie de filtrage adaptée simulée.

On rappelle la définition de  $f(t)$ , réponse après filtrage adapté :

$$f(t) = (p \otimes e)(t) \quad \text{Eq. 18}$$

où  $\otimes$  représente le produit de corrélation, et  $e(t)$  le signal émis

$f(t)$ , peut également s'écrire :

$$f(t) = (p * \hat{e})(t), \quad \text{avec } \hat{e}(t) = e(-t) \quad \text{Eq. 19}$$

où  $*$  représente le produit de convolution.

En notant  $\varphi_e$  la fonction d'autocorrélation de  $e(t)$ , on montre que l'on obtient théoriquement le signal après filtrage adapté en convoluant la réponse impulsionnelle  $h(t)$  du milieu avec l'autocorrélation du signal émis.

$$f(t) = (e * h * \hat{e})(t) = (h * \varphi_e)(t) \quad \text{Eq. 20}$$

Numériquement la convolution de  $h$  avec  $\varphi_e$  est réalisée en prenant la transformée de Fourier inverse du produit des transformées de Fourier :

$$f(t) = \text{FFT}^{-1} [ \text{FFT}(h) \cdot \text{FFT}(\varphi_e) ] \quad \text{Eq. 21}$$

En réalité, le calcul étant réalisé (CF paragraphe précédent) par sommation des RI unitaires sur support très court de chaque rayon propre, cette équation devient :

$$f(t) = \sum_{n=1 \text{ à } N} \left\{ \text{FFT}^{-1} \left[ \underbrace{\text{FFT}(h_n)}_{\substack{\text{Fonction de transfert} \\ \text{relative au nième} \\ \text{Rayon propre calculée} \\ \text{au § précédent}}} \cdot \underbrace{\text{FFT}(\varphi_e)_n}_{\substack{\text{Assimilable à une} \\ \text{fonction de correction} \\ \text{pour le nième rayon,} \\ \text{propre}}} \right] \right\}$$

Sortie de filtrage adapté

Eq. 22

Dans la phase précédente, on multiplie alors chaque fonction de transfert unitaire par une fonction de correction ( $\text{FFT}(\varphi_e)$ ) avant d'en prendre la FFT inverse comme auparavant.

### 3.2.3.8. Remarque : prise en compte de la directivité

Comme le calcul précédent est réalisé rayon par rayon, les angles d'émission et de réception sont connus ; la fonction de correction peut donc dépendre de ces deux angles. La prise en compte d'un diagramme de directivité à l'émission et à la réception est donc non seulement possible dans ce formalisme, son coût en temps de calcul est négligeable. Si la FFT avait été calculée sur l'intégralité du support temporel on obtiendrait une RI globale, pour laquelle les informations angulaires auraient été perdues. La prise en compte de la directivité serait impossible.

### 3.2.4. Traitements complémentaires aux simulations de la réponse impulsionnelle

L'objectif étant d'obtenir des données simulées comparables aux données mesurées, nous avons choisi, comme cela est habituellement fait dans le domaine, de travailler sur la sortie de filtrage adapté. Par conséquent nous avons été amenés à mettre en place des traitements complémentaires spécifiques aux simulations numériques des réponses impulsionnelles, afin de générer des signaux les plus proches possibles des sorties de filtrage adapté. Ces traitements, décrits ci-après, se sont révélés numériquement plus performants que le traitement théorique proposé au paragraphe précédent. Ils permettent d'obtenir une fonction  $r(t)$  proche de la sortie de filtrage adapté. Dans la suite du texte, et comme cela est généralement fait dans le domaine, la terminologie de réponse impulsionnelle désigne indifféremment la sortie de filtrage adapté  $f(t)$  lorsqu'il s'agit de données réelles, ou la réponse impulsionnelle simulée après traitements spécifiques  $r(t)$ .

Tout d'abord, les fonctions de transfert sont filtrées sur une bande correspondant au signal émis afin de prendre en compte la directivité de la source Janus Helmholtz du CMO (JH400), pour une émission à 200 dB. Les fonctions de transfert sont ensuite translatées d'une valeur égale à la fréquence centrale du signal afin de réaliser l'opération de démodulation. On obtient ainsi une réponse impulsionnelle plus proche du filtrage adapté, ce qui permet de diminuer la fonction de coût.

Une troisième étape d'amélioration empirique, consistant à itérer manuellement des traitements d'optimisation du niveau de la source, est ensuite mise en place afin d'affiner la description du signal émis. En effet, compte tenu de la complexité de la chaîne d'acquisition, du spectre du signal émis, du  $S_v'$  de la source, de l'accord entre les différents amplificateurs, on ne connaît pas exactement la densité spectrale émise dans le canal. Pour ce faire nous avons mis en place une procédure d'optimisation pour laquelle nous exploitons les résultats d'un algorithme du Simplex (même algorithme que celui décrit au 4.1.3. Développement d'une méthode d'inversion de type MIR Simplex) ajustant le niveau angulaire de la source, pour chaque fréquence. Cet algorithme est appliqué aux passes de calibration pour lesquelles il n'y a qu'un trajet direct et pour lesquelles la distance de propagation est inférieure à 300 m. La Figure 40 montre une configuration typique de la passe de calibration sur laquelle les traitements spécifiques ont été accordés.

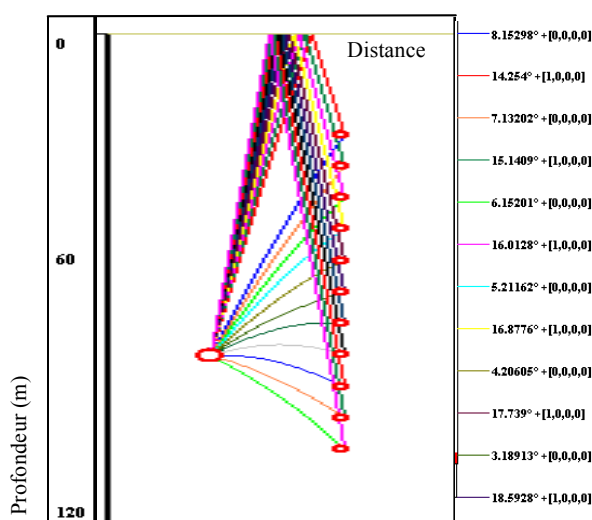
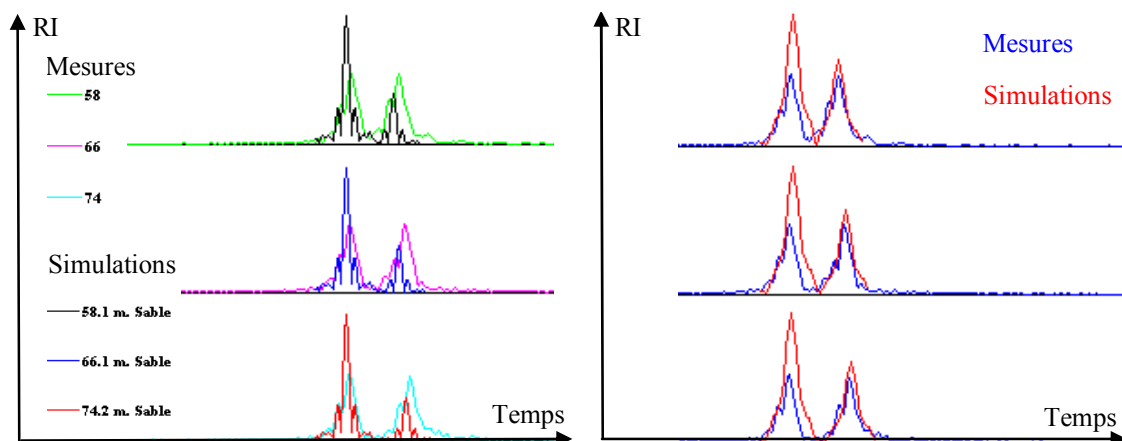


Figure 40 : Configuration typique de la passe de calibration (Ping 23\_19\_01\_00) sur laquelle les traitements spécifiques ont été accordés



La Figure 41 montre un exemple de l'allure de la réponse impulsionnelle simulée avant et après traitements spécifiques.



**Figure 41 : Comparaison des allures temporelles des mesures (sorties de filtrage adapté) et simulations (réponse impulsionnelle) pour la passe de calibration (Ping 23\_19\_01\_00). A gauche : avant traitements spécifiques - A droite : après traitements spécifiques**

Ces traitements spécifiques mis en place ont permis d'améliorer de façon significative les résultats des inversions ; un gain global de 20% sur la fonction de coût a été enregistré.

### **3.2.5. Génération et lecture des réponses impulsionnelles**

Le code de rayons existant a été amélioré afin de prendre en compte un fond fluide mono ou multicouche et les caractéristiques instrumentales. La directivité du transducteur est prise en compte à la source. Le récepteur est quant à lui supposé omnidirectionnel. Des traitements spécifiques, basés essentiellement sur l'optimisation du niveau en fréquence de la source, ont permis d'améliorer la ressemblance entre les réponses impulsionnelles simulées et les sorties de filtrage adapté mesurées. Le code de rayons permet de générer à la demande pour chaque impulsion, des séquences de simulations sur l'ensemble des 11 hydrophones et pour des fonds correspondant à différents types (fond rocheux, fond fluide de porosité comprise dans l'intervalle  $[0, 1]$  avec un pas de 0.1, fond fluide mono ou multicouche).

Des améliorations conséquentes ont de plus été apportées à la structure du code de propagation, en terme de mémoire et de séquençement des calculs. Etant donné qu'une radiale dure typiquement 12 h avec une récurrence d'émission de 60s et qu'il y a 11 hydrophones, traiter une radiale revient à simuler la réponse impulsionnelle dans environ 8000 configurations source/récepteur différentes, soient pour quatre radiales aller-retour un total de 32000 configurations. La quantité importante de données à traiter a justifié d'une part le développement de routines de génération des fichiers de configurations et de lancement séquentiel des simulations, et d'autre part des optimisations en terme de temps de calcul.

D'autre part le code de propagation a été préparé à l'intégration de la fonction d'inversion. D'un point de vue informatique cela signifie que le code a été modifié afin de pouvoir être appelé « à la demande » par la routine d'inversion. Ces aspects sont détaillés au Chapitre 4 .

Notons de plus, que des simulations du signal propagé ont été réalisées en utilisant le module temps-réel de RAYSON. Elles visent à simuler des données synthétiques de signaux propagés. Ces simulations sont décrites en détails au Chapitre 5 Inversion de données synthétiques.

### 3.3. Outils d'analyse et d'identification des réponses impulsionnelles

Compte tenu de la quantité potentielle importante de données, nous avons été amenés à mettre en place des outils d'analyse spécifiques au calcul et à la lecture des réponses impulsionnelles et d'aide à l'identification. Les travaux suivants ont ainsi été réalisés au cours de cette étude :

- Une procédure a été développée afin de pouvoir, à un instant  $t$  donné, charger le signal contenant la RI mesurée et effectuer une série de calculs de RI pour différentes natures de fond.
- Cette fonctionnalité a ensuite été étendue à la prise en compte des 11 hydrophones simultanés c'est-à-dire que pour les données de la campagne HERACLES, une fonction a été développée afin, à un instant  $t$  donné, de charger les RI mesurées sur les 11 hydrophones et d'effectuer une série de calculs de RI simulées pour différentes natures de fond, sur les 11 hydrophones simultanément. Cette étape était nécessaire avant la mise en place de la méthode de fusion multicapteur.
- Des outils d'aide à l'identification ont été développés ; il est en particulier possible sur la courbe de la réponse impulsionnelle, d'identifier manuellement à l'aide de la souris les différents trajets et d'en connaître les caractéristiques. Ce type d'outil s'est révélé extrêmement efficace pour l'analyse des données et a permis de mettre en évidence les problèmes lors des différentes itérations de cette étude, et de proposer des améliorations pertinentes. La Figure 42 illustre cette fonctionnalité.

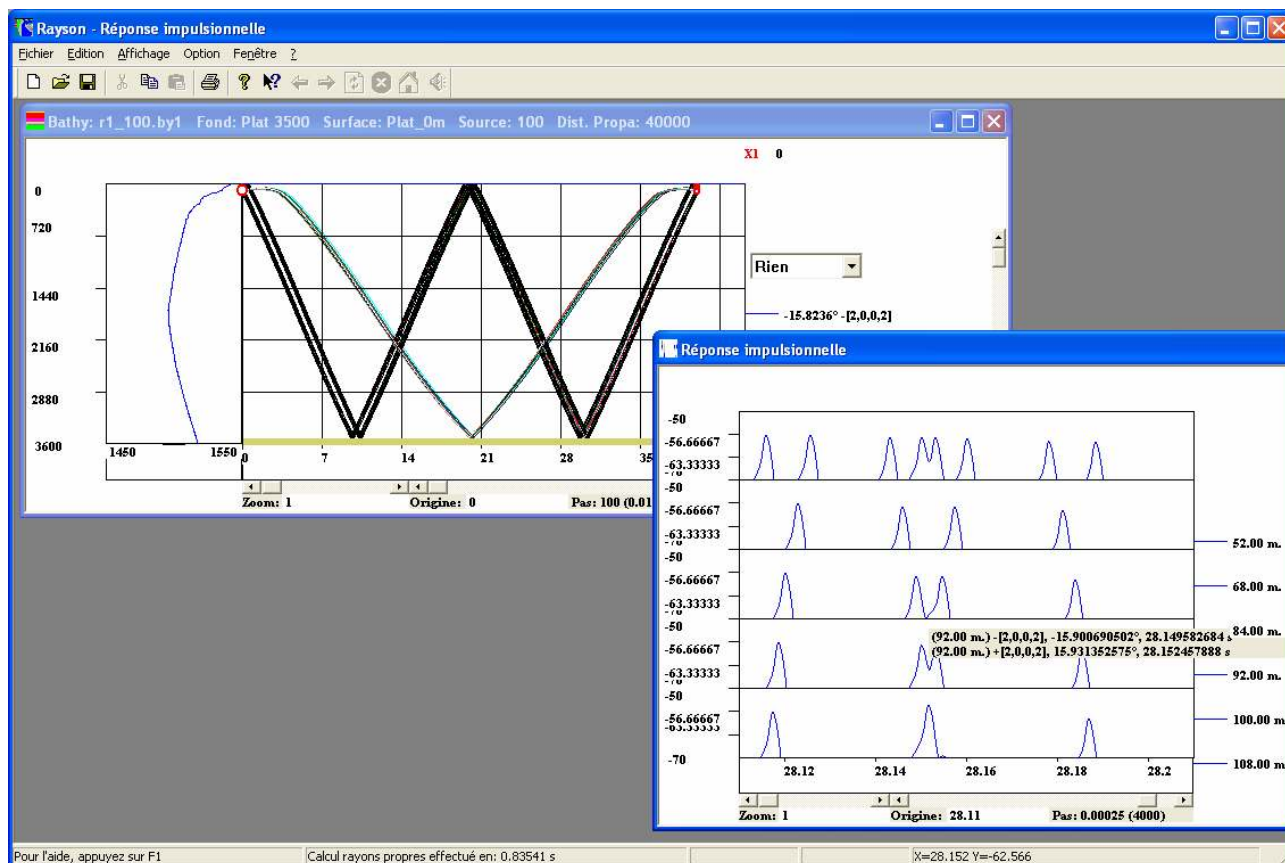


Figure 42 : Copie d'écran montrant la fenêtre de propagation avec les rayons propres et la fenêtre contenant les réponses impulsionnelles correspondantes. La souris permet d'afficher le contenu des pics de la réponse impulsionnelle. Une étiquette renseigne sur les caractéristiques des rayons propres : type du rayon, angle d'arrivée et temps de propagation.

- Enfin le « recalcul » d'une réponse impulsionnelle est rendu possible sans recalculer les rayons propres dès lors que l'on modifie les paramètres sans incidence sur la trajectoires des rayons : amortissement, type de fond, surface ...

### 3.4. Conclusions

---

Ce chapitre nous a permis de définir la nature physique des données observées et simulées. A ce stade de l'étude, nous disposons d'une part d'un ensemble de données réelles observées accessibles sous la forme de réponses impulsionnelles mesurées  $f(t)$ . Un travail spécifique de traitement des données mesurées a été réalisé afin de disposer de données de qualité, c'est-à-dire calibrées, géo et temporellement référencées le mieux possible. L'objectif étant de traiter le problème de l'inversion dans sa globalité, l'accent a été mis sur la gestion de radiales intégrales, correspondant à des séquences de 12 heures environ. Le nombre de données étant très important (32000 émissions à gérer), des techniques d'archivage et des traitements séquentiel des données ont été mis en place dans ce but afin de pouvoir accéder de façon fiable et rapide à la donnée observée.

D'autre part, nous avons développé, à partir de notre code de propagation RAYSON, un outil adapté pour générer le pendant des données observées en terme de simulations. Cet outil est capable, pour une configuration instrumentale et environnementale donnée, de générer, à la demande d'un processus d'inversion, la réponse impulsionnelle simulée ( $r(t)$ ), c'est-à-dire la donnée estimée. Cet outil a été spécifiquement optimisé en terme de temps de calcul et de gestion de la mémoire afin de servir nos objectifs d'inversion en temps-réel.

Disposant d'un jeu propre, organisé et accessible de données observées, et d'un outil de génération de données estimées, nous développons au chapitre suivant une méthode globale d'inversion, que nous testons tout d'abord sur des données synthétiques, puis sur le jeu de données réelles.

## Chapitre 4      Méthodologie globale d'inversion

La méthode d'inversion développée pour retrouver le paramètre de porosité caractérisant le fond marin est basée sur l'ajustement des réponses impulsionnelles. Ce type de méthode est nommée Matched Impulse Response (MIR dans la suite du texte). La méthodologie employée a consisté à se focaliser sur la mise en place de la structure algorithmique, explorant un faible nombre de paramètres, avec une méthode d'inversion basique. Ainsi la méthode globale peut être tout d'abord testée, puis une fois l'algorithmie mise en place, les objectifs sont d'améliorer les routines d'inversion et d'augmenter le domaine d'exploration des solutions. Les développements relatifs à cette méthodologie sont détaillés dans ce chapitre.

Cette phase de l'étude a débuté par la mise en place d'une fonction de coût. Elle est définie comme étant l'aire normalisée entre la courbe de la sortie de filtrage adapté mesuré et la réponse impulsionnelle simulée.

Dans un premier temps nous avons mis au point une méthode d'inversion de type Matched Impulse Response, consistant à réaliser une exploration exhaustive de l'espace du paramètre porosité. Cette méthode est nommée MIR EE dans ce document. Elle a servi à valider le traitement des données mesurées et simulées. Elle a permis d'inverser un fond homogène décrit par sa porosité en tenant compte d'un récepteur unique. Ceci est réalisé en inversant le couple de paramètres : distance de propagation  $D$  et porosité  $P$ . Deux phases d'inversion se sont avérées nécessaires. Une phase d'inversion de la distance de propagation fournit une estimation grossière de  $D$  ; une phase d'inversion de la nature du fond affine ensuite la valeur de  $D$  et détermine celle de  $P$ , fournissant une estimation du couple  $(D, P)$ . Puis, dans un objectif de fusion des informations (multi-réponse impulsionnelle et multicapteur), elle a ensuite été adaptée à la prise en compte des mesures sur les 11 récepteurs simultanément.

On exploite les informations contenues dans les rayons propres reliant les 11 couples émetteur-récepteur. Toutes les RI sont calculées pour tous les types de fond, pour tous les hydrophones. Des tests globaux d'inversion ont été effectués sur les radiales R1 et R2. Ces résultats préliminaires ont donné lieu à la publication d'un article scientifique intitulé « Real-time geoacoustic inversion of large band signals » à l'occasion de la conférence OCEANS 2005 [Viala et al 2005].

Dans une seconde phase la méthode d'inversion a été améliorée par la mise en place d'un schéma d'inversion plus évolué de type Simplex. Cette méthode heuristique explore de façon intelligente un espace plus vaste de paramètres. L'algorithme du Downhill Simplex a été programmé, testé et validé. Les résultats de cette méthode nommée MIR Simplex ont été évalués et comparés à celle de la méthode de recherche des solutions par MIR EE. Une étude de sensibilité a été conduite en analysant des valeurs enregistrées de la fonction de coût.

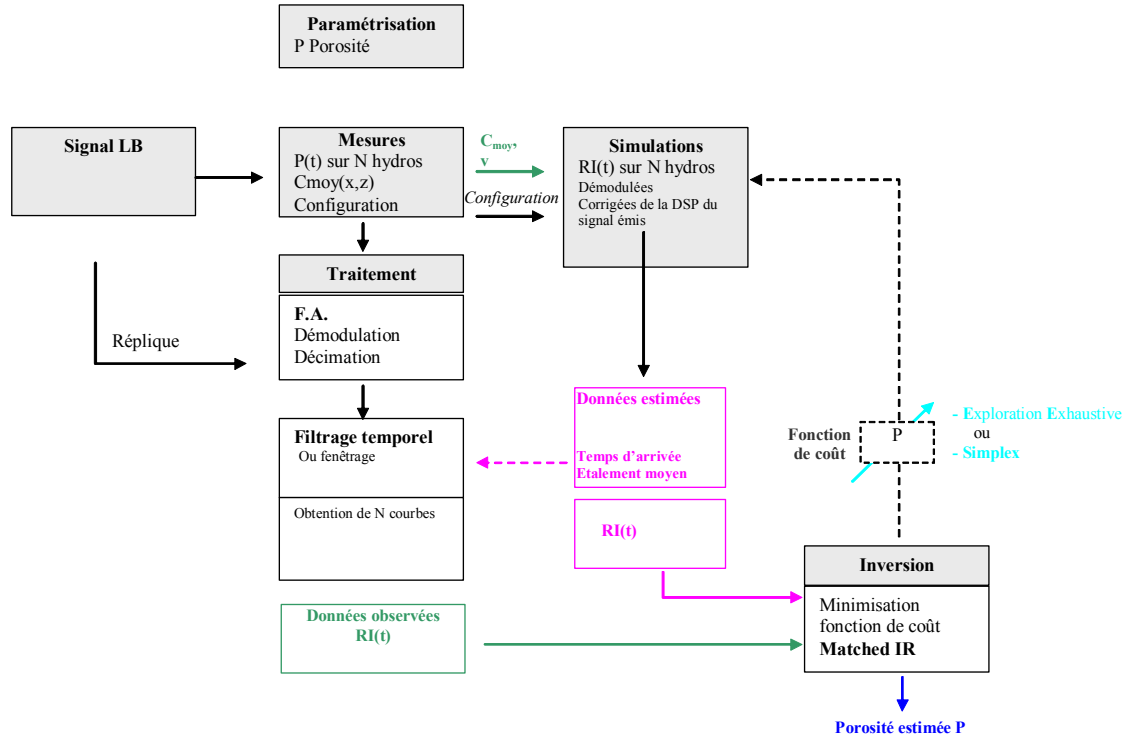
Enfin des améliorations complémentaires ont été effectuées. La prise en compte d'un MNT a été réalisée. Elle permet de répartir des informations issues de radiales sur un maillage numérique donné du terrain et présente l'intérêt majeur de synthétiser les informations produites par la routine d'inversion et de faciliter l'analyse des résultats. Nous avons ensuite procédé à l'extension au cas d'un fond variable en distance horizontale avec un pas de discrétisation correspondant à la maille du MNT. Les informations obtenues en fond variable peuvent ainsi être synthétisées en élaborant le MNT nature des fonds. Enfin, un modèle multicouche a été implémenté bien qu'il n'ait pas été utilisé dans ces travaux.

Ce chapitre décrit tout d'abord la méthode basique d'inversion utilisée de type MIR EE, puis celle plus évoluée de type MIR Simplex. Les résultats comparés des porosités déterminées par ces deux méthodes sont ensuite commentés avant de présenter la prise en compte d'un MNT de synthèse dans une hypothèse de fond monocouche homogène ou monocouche évolutive en fonction de la distance. Ce chapitre traite enfin de la maquette logicielle et explore le dossier numérique de résultats qu'elle permet d'établir.

### 4.1. Principe de la méthode globale d'inversion

Les modules d'inversion mis au point ici relèvent d'une méthode d'optimisation globale soit de type recherche exhaustive effectuée par exploration exhaustive (EE), soit de type méthode heuristique effectuée par une exploration intelligente (Simplex).

La méthode d'inversion que nous avons développée est basée sur le schéma de principe général de la Figure 43.



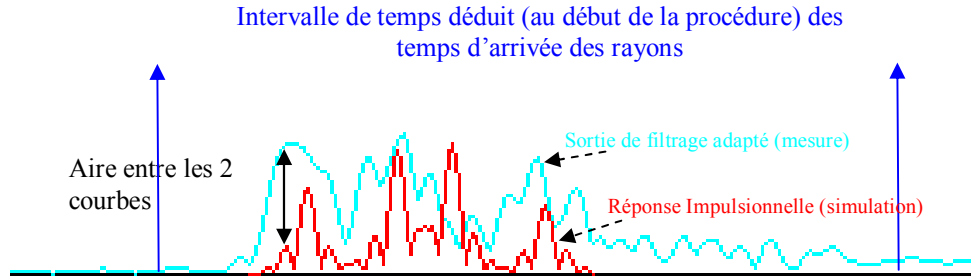
**Figure 43 : Principe de la méthode globale d'inversion. Le module d'inversion ajuste le paramètre de porosité P, de telle sorte que la réponse impulsionnelle simulée ressemble le mieux à la réponse impulsionnelle observée.**

La source sonore émet une impulsion large bande. Ce signal est mesuré sur  $N_H$  hydrophones, puis traité par filtrage adapté à l'aide d'une réplique du signal émis. Les données après filtrage adapté sont filtrées temporellement afin de ne conserver que les séquences contenant la partie utile de la RI. Le module d'inversion ajuste le paramètre de porosité P en pilotant le module de simulations, de telle sorte que la réponse impulsionnelle simulée ressemble le mieux à la réponse impulsionnelle observée. Pour cela il explore pour l'ensemble des valeurs possibles de la porosité.

Ce schéma suppose une hypothèse de paramétrisation du milieu pour laquelle l'inconnue est le champ de porosité P. L'intérêt de travailler uniquement sur la porosité est de pouvoir qualifier facilement la méthode d'inversion. Notons que la porosité a pour action de « brider » l'inversion en diminuant le nombre de degrés de liberté, en groupant les effets de la célérité dans le fluide et de son atténuation. Le travail sur le couple (célérité, atténuation) risquerait de ce fait de perdre en cohérence, car la méthode mathématique pourra préférer un couple moins physique que la solution théorique mais au comportement acoustique équivalent et pour lequel la fonction de coût sera minimale. C'est pour cette raison, que bien qu'ayant été mis en place, la paramétrisation monocouche fluide n'a pas été utilisée au delà des validation du module.

**4.1.1. Fonction de coût des méthodes MIR**

Une fonction de coût simple a été implémentée afin de pouvoir mettre en place les algorithmes d'inversion. Cette fonction de coût est définie pour un couple émetteur-récepteur, comme étant l'aire normalisée localisée entre la courbe de la sortie de filtrage adapté et la réponse impulsionnelle dans un intervalle de temps dit « utile » défini dès le début de la procédure d'inversion.



**Figure 44 : Définition de la fonction de coût**

La fonction de coût est donc

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} |f(t) - r(t)|^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt} = \frac{\|f - r\|_{L_2(t_1, t_2)}}{\|f\|_{L_2(t_1, t_2)}} \tag{Eq. 23}$$

où :  $f(t)$  est la sortie de filtrage adapté (issue de la mesure)  
 $r(t)$  est la réponse impulsionnelle (issue des simulations numériques)

Pour les  $N_H$  récepteurs la fonction de coût devient :

$$\frac{\sum_{n=1}^{N_H} \int_{t_1}^{t_2} |f_n(t) - r_n(t)|^2 dt}{\sum_{n=1}^{N_H} \int_{t_1}^{t_2} |f_n(t)|^2 dt} = \frac{\sum_{n=1}^{N_H} \|f_n(t) - r_n(t)\|_{L_2(t_1, t_2)}}{\sum_{n=1}^{N_H} \|f_n(t)\|_{L_2(t_1, t_2)}} \tag{Eq. 24}$$

Des traitements visant à améliorer la fonction de coût ont ensuite été réalisés. Ces traitements avaient pour but d'améliorer la ressemblance entre simulations et mesures. Ils ont consisté à corriger la réponse impulsionnelle de la DSP du signal émis.

#### **4.1.2. Méthode d'inversion de type Matched Impulse Response par Exploration Exhaustive (MIR EE)**

Dans un premier temps nous avons mis au point une méthode d'inversion de type Matched Impulse Response, consistant à réaliser une exploration exhaustive de l'espace des paramètres  $P$ , contenant  $N_p$  valeurs de la porosité à explorer. Cette méthode simple et robuste n'a d'inconvénient que son temps de calcul. Sa précision, dépendante du pas d'exploration, sera donc directement liée au temps de calcul. Elle constitue la solution de référence du problème. L'algorithme de cette méthode d'inversion est basé sur deux phases successives.

Une première phase inspirée de [Porter et al 1998] réalise l'inversion de la distance de propagation pour aboutir à une estimation grossière de  $D$ . Elle fonctionne en ajustant les temps d'arrivée des premiers fronts montants des RI mesurées et simulées pour différentes distances  $D$  possibles et elle s'affranchit du calcul des rayons propres. Cette méthode est plus simple que d'ajuster l'ensemble de la réponse impulsionnelle mais ne peut fonctionner correctement que si le premier pic de la RI est bien détecté, c'est-à-dire s'il sort bien du bruit de fond. Pour ce faire elle mesure et enregistre tout d'abord le temps, correspondant au front montant du premier pic de la RI sur les signaux réels de chaque récepteur. Elle extrait ensuite le plus petit temps d'arrivée de tous les rayons simples arrivant au voisinage des récepteurs, c'est-à-dire pour  $N_D$  échantillons en distance autour de la position initiale donnée par les GPS. Typiquement l'excursion de la distance  $D$  est effectuée entre +/- 300 m de cette position initiale avec un pas de 5 m. Cette extraction est réalisée sous l'hypothèse que le temps d'arrivée du rayon dépend peu de l'immersion du récepteur. Nous travaillons sur le rayon simple le plus proche du rayon propre à considérer. Le gain en temps de calcul est important car les rayons simples sont beaucoup plus rapides à calculer que les rayons propres.

Elle recherche enfin la distance  $D$  qui donne un temps du front montant de la RI simulée le plus proche de celui donné par la RI mesurée.

Cette méthode permet de réduire le temps d'exploration dans un rapport 5 à 16 par rapport à une méthode classique de MIR sur la distance  $D$  avec une RI issue du calcul des rayons propres. Le temps de calcul nécessaire pour inverser un ping est alors ramené en moyenne de 10 mn à 1 mn.

Une seconde phase réalise l'inversion de la nature du fond pour aboutir à une estimation affinée de  $D$  et la détermination de  $P$ . Elle fonctionne cette fois en ajustant les enveloppes des réponses impulsionnelles simulées, selon la fonction de coût (Eq. 11) décrite au 4.1.1. Fonction de coût des méthodes MIR Elle calcule les paquets de rayons propres pour un nombre  $N_D$  d'intervalles en distance. Typiquement l'excursion de la distance  $D$  est effectuée entre +/- 25 m de la position précédemment estimée avec un pas de 5 m. Pour chaque fond possible décrit par une valeur de la porosité, elle calcule les  $N_H$  réponses impulsionnelles et la fonction de coût globale. Elle minimise ensuite cette fonction de coût pour les  $N_H$  hydrophones, parmi  $N_D$  distances horizontales et  $N_p$  types de fond possibles, afin d'obtenir le couple  $(D, T)$  qui minimise la fonction de coût globale. Typiquement l'intervalle  $[0, 1]$  de la porosité est exploré avec un pas de 0.1 et  $N_p$  est égal à 10.

L'observation des données mesurées montre que les rayons propres sont parfois amenés à disparaître. Cela est en particulier souvent le cas sur l'hydrophone H1 situé le plus près de la surface. Dans ce cas la méthode



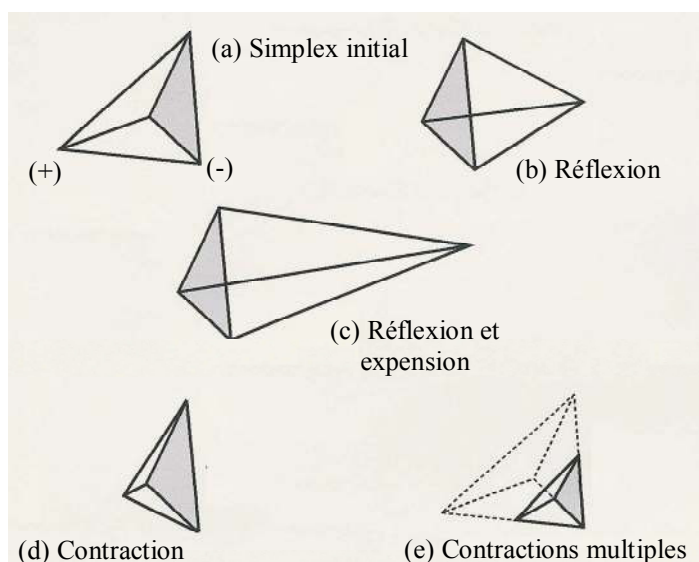
d'inversion appliquée à H1 seul ne fonctionne pas toujours puisque l'information reçue sur cet hydrophone n'est pas stable. Par contre elle est disponible sur les capteurs plus profonds. Dans ce cas, la méthode multicapteur développée, en permettant de prendre en compte les courbes de la fonction de coût sur plusieurs récepteurs, donc la fusion d'informations, continue d'inverser.

Des calculs d'inversion ont été réalisés avec la routine de MIR EE sur un jeu de valeurs pour la porosité. Les calculs ont été réalisés sur une station PC aux caractéristiques suivantes : Athlon 64 3500+ - 2 Go RAM - 210 Go. L'ordre de grandeur du temps de calcul moyen est de 1 mn par ping pour chacune des deux phases précédentes, le temps de calcul allant de 0.5 mn en début de radiale à 3 mn par ping en fin de radiale.

Le temps moyen d'inversion est de 2 mn par ping. Avant l'optimisation de la phase 1, le temps nécessaire au traitement d'un ping avec 11 hydros était de 40 mn. La contrainte temps réel est donc respectée.

#### 4.1.3. Développement d'une méthode d'inversion de type MIR Simplex

Dans une seconde phase la méthode d'inversion a été améliorée par la mise en place d'un schéma d'inversion de type Downhill Simplex. Celui-ci explore de façon intelligente l'espace des paramètres. La méthode du Downhill Simplex est une procédure d'optimisation locale dans un espace de paramètres à plusieurs dimensions. Issue des travaux de Nelder et Mead [Nelder – Mead 1965], cette méthode est basée sur une interprétation géométrique du problème d'optimisation. Dans un espace à N dimensions, un simplexe est une figure géométrique constituée de N+1 sommets, des segments joignant ces sommets, des faces polygonales ... Chaque sommet est représenté par un vecteur à N dimensions. La Figure 45 présente une illustration de simplexe dans un espace à 3 dimensions. L'intérêt principal de la méthode du Downhill Simplex est que, contrairement aux méthodes du Gradient ou de Newton, elle ne nécessite pas de calculer les dérivées partielles de la fonction coût à minimiser, mais uniquement d'évaluer cette fonction.



**Figure 45: Evolutions possibles lors d'une étape de l'algorithme du Downhill Simplex dans le cas d'un espace à 3 dimensions. L'indication (+) indique le sommet qui maximise la fonction coût, l'indication (-) celui qui la minimise.**

Le principe de fonctionnement de l'algorithme est le suivant. A partir d'un simplexe initial, l'algorithme tente d'améliorer le sommet le moins bon, c'est-à-dire celui dont la valeur de la fonction coût est la plus élevée, en le

réfléchissant par rapport à la face opposée du simplexe. Si ce nouveau sommet possède la plus faible valeur de la fonction coût, alors une expansion d'un facteur 2 est réalisée dans la même direction. Dans le cas où la valeur prise par la fonction coût pour ce sommet serait toujours la plus élevée, la réflexion est rejetée et une contraction d'un facteur 2 en direction de la face du simplexe est réalisée. Si à l'issue de ces étapes aucun sommet dont la valeur serait inférieure à la seconde valeur la plus forte n'est trouvé, alors une contraction multiple autour du meilleur sommet (toujours au sens de la fonction coût) est réalisée. Ce processus est répété de façon itérative jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit respecté. L'algorithme implémenté est celui proposé dans « Numerical Recipes in C++, version 2.11 » [Press et al 1992].

L'algorithme a été validé, dans le cas d'un espace à explorer restreint, par comparaison avec l'exploration exhaustive, cette dernière étant considérée comme la référence et sont présentés au paragraphe suivant.

#### 4.1.3.1. Temps de calcul

Des calculs d'inversion ont été réalisés avec une routine de MIR Simplex sur un jeu de valeurs pour la porosité. Les temps de calcul sont d'environ 2 mn par ping. Ils sont comparables environ à ceux de la méthode MIR EE, mais ils permettent d'explorer un nombre de paramètres beaucoup plus grand. Typiquement au lieu d'explorer 10 types de fonds homogènes décrit par  $N_p = 10$  valeurs de la porosité, ils permettent d'explorer un milieu évolutif découpé en  $N_M = 5$  mailles horizontales, avec  $N_p = 10$  possibilités dans chacune pour la porosité, soit  $10^5$  cas.

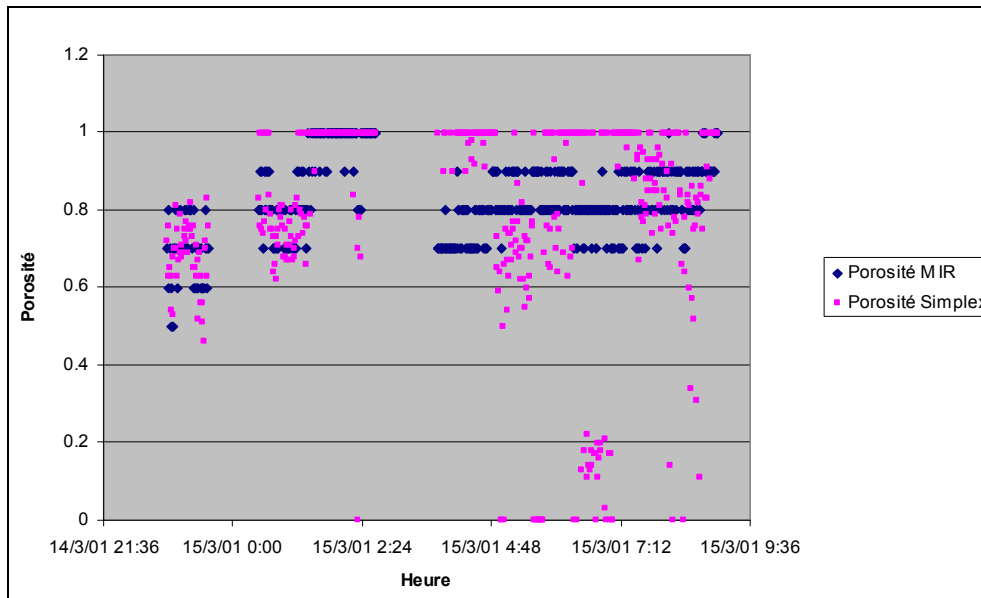
#### 4.1.3.2. Remarque : intérêts respectifs des méthodes MIR EE et MIR Simplex

L'intérêt de l'usage d'une méthode MIR EE réside dans sa simplicité, celle du MIR Simplex dans sa rapidité à effectuer les calculs. En effet si le nombre de types de fond est inférieur à 100, le MIR EE est une méthode d'inversion qui fonctionne bien car c'est le calcul des rayons propres qui est long. Par contre pour un nombre de types de fond important, typiquement supérieur à 100, il devient intéressant d'améliorer l'inversion avec le simplexe (MIR Simplex) ou une autre méthode plus évoluée.

Cette remarque valide l'intérêt d'avoir déjà mis en place la structure algorithmique, pour un faible nombre de types de fond, avec une méthode d'inversion basique. A présent que l'algorithmie est en place, les objectifs sont d'améliorer les routines d'inversion et d'augmenter le domaine d'exploration des solutions.

**4.1.4. Comparaison MIR EE et MIR Simplex le long de la radiale R2**

La Figure 46 présente les résultats comparés des porosités déterminées par MIR EE et par le MIR Simplex. La méthode MIR EE explore l'intervalle [0, 1] avec un pas de 0.1. La méthode MIR Simplex n'a pas de pas particulier d'exploration.



**Figure 46 : Porosités déterminées par MIR EE Couche homogène (en bleu) et par le MIR Simplex Couche évolutive (en Magenta) le long de la radiale R2**

Les cas d'indétermination surviennent en même temps pour le MIR EE et le MIR Simplex. Quelques pings ne sont pas solutionnés par le MIR Simplex et le sont par le MIR EE, typiquement une dizaine sur un nombre total de 613 pour la radiale R2). Nous observons sur la Figure 46 les pas de discrétisation du Simplex programmé pour une exploration de l'intervalle des porosités avec un pas de 0.1.

En début de radiale MIR Simplex et MIR EE fournissent les mêmes types de résultats ; puis les résultats du Simplex divergent et hésitent entre les valeurs 1 et 0. Ceci s'explique par le fait que pendant la première partie de la radiale il n'existe qu'une seule famille de rayons correspondant à une réflexion sur le fond, donc renseignant le fond en une seule zone au milieu de la radiale. Ensuite on observe l'apparition d'une seconde famille de rayons, ayant mémorisé l'histoire du fond en deux lieux différents. Dans ce cas le Simplex ne sait comment attribuer la porosité, plusieurs solutions étant possibles.

Notons aussi que finissent par apparaître des rayons ayant heurté la surface et étant donc soumis à un état de mer probablement différent de celui pris en compte dans la simulation (état de mer constant avec vent nul). La modélisation non optimale de l'écho surface peut être responsable des écarts observés.

#### 4.1.5. Analyse de la fonction de coût

Une étude de sensibilité a été conduite suite à l'implémentation d'une fonction d'enregistrement des valeurs de la fonction de coût. Les valeurs de celle-ci sont représentées ci-dessous, pour la radiale R2 dans le cas du MIR EE et du MIR Simplex.

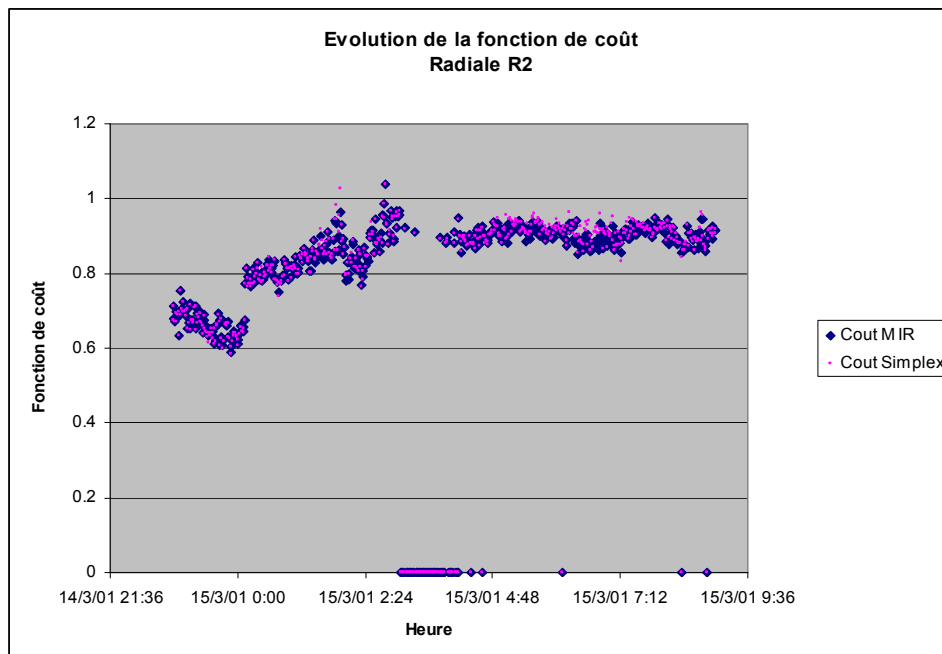


Figure 47 : Evolution de la fonction de coût relative au MIR EE et au MIR Simplex le long de la radiale R2

Le MIR EE étant considéré comme la référence, cette figure montre la convergence du Simplex.

#### 4.1.6. Améliorations à envisager

La fonction de coût définie est très simple et pourrait être améliorée ; le travail n'est cependant pas prioritaire car les résultats obtenus ne mettent pas en évidence d'anomalie. Les fonctions de coût basées sur la corrélation entre les RI mesurées et simulées varient dans un intervalle  $[0.6, 0.9]$ , ce qui est similaire aux valeurs trouvées ici. Plus généralement, l'expérience issue des études précédentes menées par le CMO lors d'inversions sur des données réelles, est que la fonction de coût est très plate.

Par compte il serait nécessaire d'ajuster la fenêtre temporelle d'analyse afin d'éliminer les rayons faiblement énergétiques. Si le filtrage des rayons n'est pas possible temporellement, il peut être effectué angulairement, en paramétrant un nombre de réflexions minimale et maximale pour les rayons propres à considérer.

## 4.2. Description du MNT de synthèse

### 4.2.1. Rôle du MNT : synthèse des résultats

La prise en compte d'un MNT a été réalisée. Cette amélioration permet de répartir les informations issues de l'inversion le long des radiales sur un maillage numérique donné du terrain. Elle présente avant tout l'intérêt de synthétiser les informations produites par la routine d'inversion et de faciliter l'analyse des résultats. Elle permet l'analyse des résultats pour un milieu supposé homogène horizontalement. Nous procédons ensuite à l'extension au cas d'un fond variable en distance horizontale. La dimension des cases est choisie à 5 Nm, puis 1 Nm.

Les paragraphes suivants explicitent les méthodes mises en place dans le cas d'un milieu décrit par une couche homogène ou décrit par une couche évolutive, c'est-à-dire variable avec la distance horizontale.

Les deux fonctionnalités MNT développées peuvent être utilisées avec la méthode MIR EE ou la méthode MIR Simplex, la seule limitation est la contrainte en temps de calcul.

### 4.2.2. Hypothèse Couche Homogène

Dans l'hypothèse d'un fond de couche homogène, le milieu est maillé horizontalement et nous supposons que le long d'une radiale source-récepteur, la porosité est constante. Cependant cette méthode ne stocke les porosités qu'aux lieux d'impact des rayons

L'intérêt de cette méthode à hypothèse forte, et réaliste localement, est de permettre de synthétiser les résultats de l'inversion de l'ensemble des données d'une radiale dans le MNT.

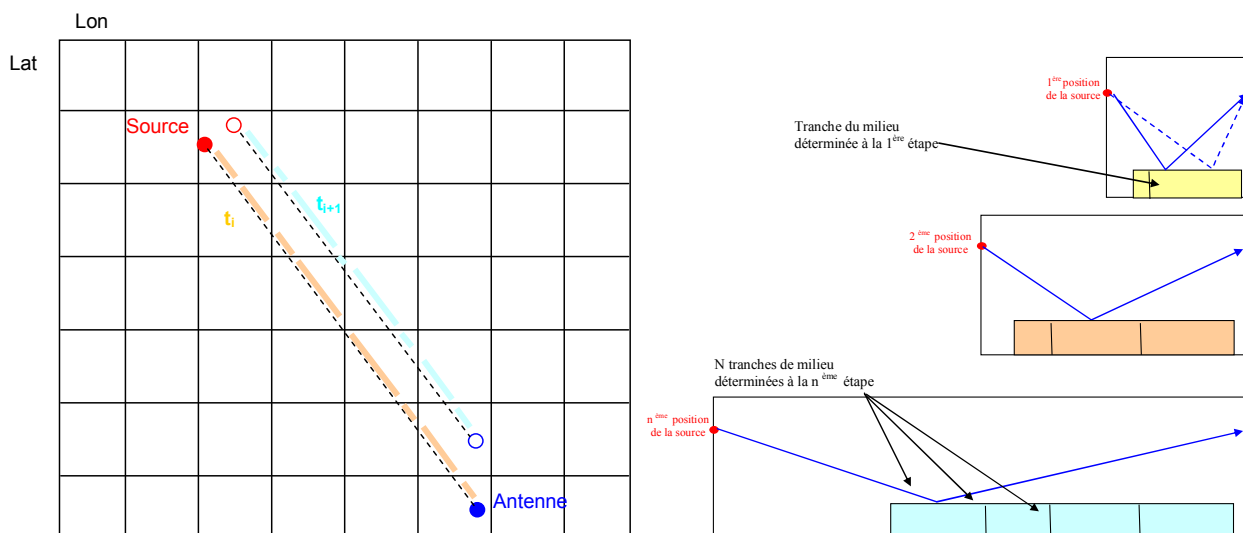


Figure 48 : Illustration du principe de remplissage du MNT à partir des données inversées dans l'hypothèse d'un fond de couche homogène en distance. Pour 2 configurations élémentaires successives (2 pings successifs) : la porosité est supposée constante le long de la radiale. A gauche : Vue de dessus – A droite : tranches verticales de l'océan

4.2.3. **Couche Evolutive (en fonction de la distance)**

Dans l'hypothèse d'un fond de couche évolutive, le milieu est maillé horizontalement et nous supposons que dans chaque maille la porosité est constante, mais celle-ci varie le long de chaque radiale. A chaque ping on détermine, pour chaque case traversée et dans laquelle des rayons ont heurté le fond, une valeur de la porosité.

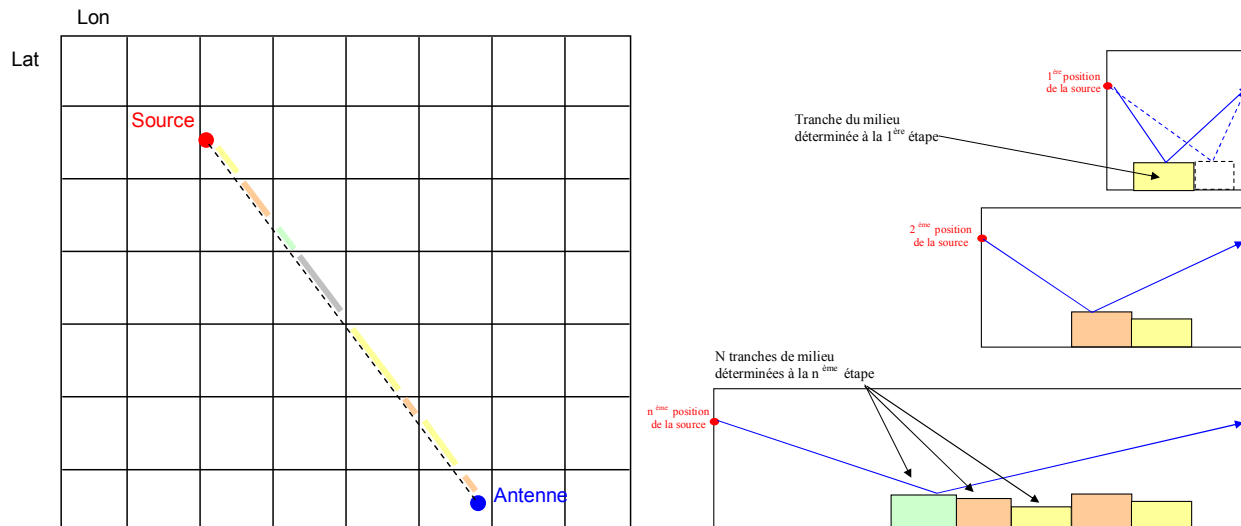


Figure 49 : Illustration du principe de remplissage du MNT à partir des données inversées dans l'hypothèse d'un fond de couche évolutif en distance. Pour une configuration élémentaire correspondant à un ping : Représentation des mailles pour lesquelles la porosité est déterminée. A gauche : Vue de dessus – A droite : tranches verticales de l'océan

Le nombre de cas explorés est égal à  $(N_p)^{N_M}$ , où  $N_M$  est le nombre de mailles traversées entre la source et le récepteur. Si l'intervalle d'exploration de la porosité est  $[0, 1]$  avec un pas de 0.1, soit  $N_p = 10$  valeurs.

Le pas en distance est de l'ordre de 5 Nm, sur des distances maximales totales de l'ordre de 55 Nm, soit  $N_M = 11$  cases.

L'ordre de grandeur du nombre de cas explorés à chaque ping est  $10^{11}$ .

Dans ce cas, nous constatons qu'il est impossible d'utiliser la méthode MIR EE en raison d'un espace de paramètres trop vaste.

Pour valider la méthode MIR Simplex, nous avons utilisé la méthode MIR EE en tolérant des durées de calcul importantes pour  $N_p = 5$ . Au-delà il n'est plus raisonnable d'utiliser cette méthode.

Notons que cette méthode a aussi été appliquée avec la méthode MIR Simplex avec un pas en distance de 1 Nm, soit  $N_M = 55$  cases à renseigner pour chaque radiale, ce qui correspond à  $10^{55}$  cas explorés.

### 4.2.4. Illustration des méthodes en milieu monocouche homogène ou évolutive

La figure suivante illustre les méthodes développées en milieu monocouche homogène ou évolutive.

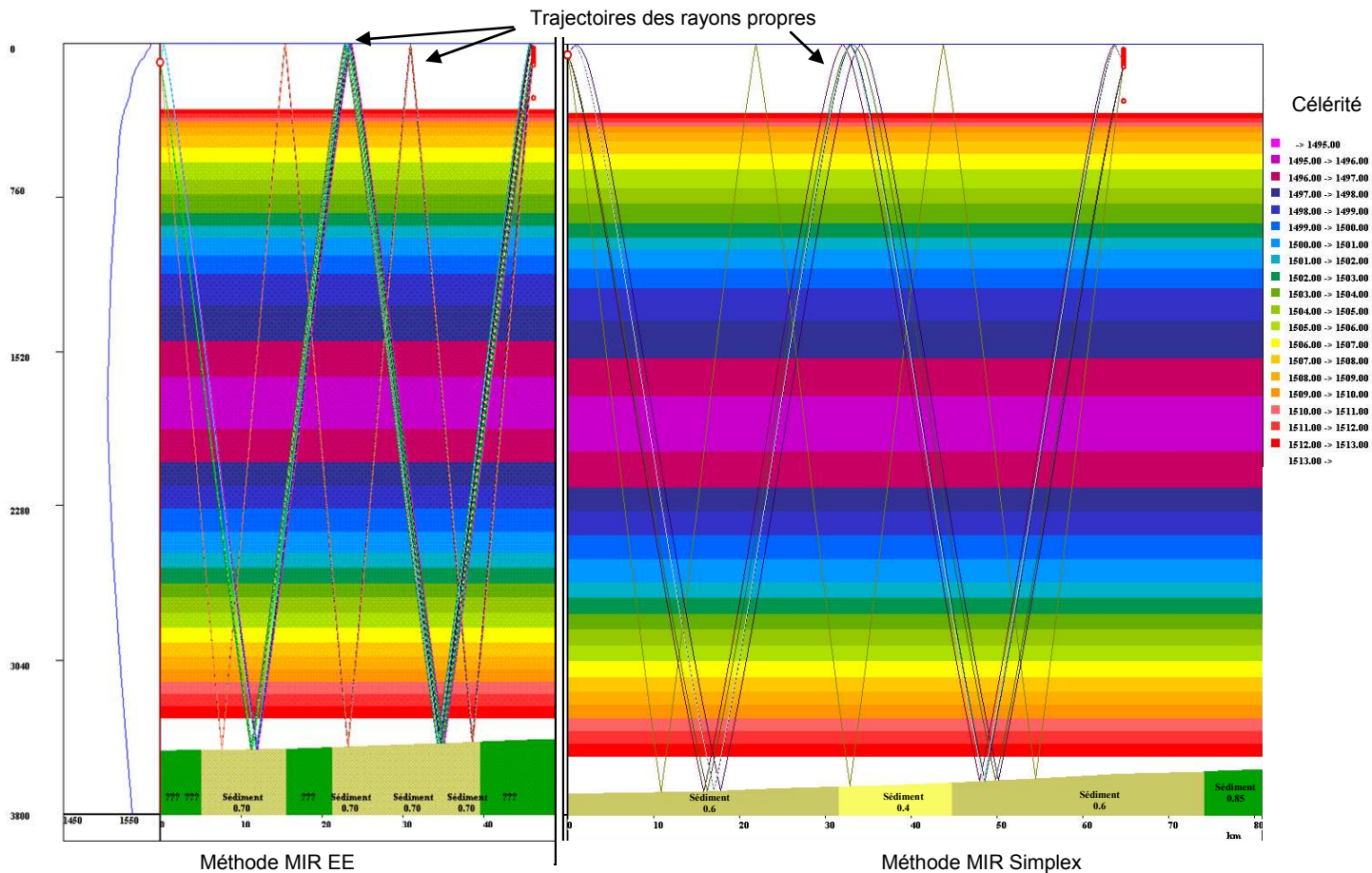


Figure 50 : Illustration des résultats obtenus par l'inversion avec hypothèse couche homogène (à gauche) résolue par MIR EE ou couche évolutive (à droite) résolue par MIR Simplex. La valeur inversée de la porosité est indiquée dans chaque maille horizontale. Les points d'interrogation indiquent qu'aucune valeur n'a pu être fournie par la routine d'inversion.

Sur cet exemple la méthode couche homogène-MIR-EE permet de retrouver, aux lieux des points d'impacts des rayons sur le fond, un milieu homogène de porosité 0.7. La méthode couche évolutive-MIR-Simplex donne quant à elle un milieu évolutif en distance, constitué de tranches de sédiment de porosité variable entre 0.4 et 0.6.

### 4.3. Maquette logicielle et dossier numérique de résultats

Une maquette logicielle a été développée dans cette étude. Les contraintes liées à l'analyse de la faisabilité de la méthode d'inversion en terme de temps de calcul ont en effet imposé le développement de routines robustes et surtout optimisées. Elles ont été écrites en langage C++. La maquette permet de compiler les résultats des simulations numériques et des calculs d'inversion de façon conviviale dans le dossier numérique.

Un site de résultat a été généré afin de présenter l'ensemble des résultats des méthodes d'inversion MIR EE et MIR Simplex appliquées aux données réelles des radiales R1, R2, R3 et R4, ou par la suite aux données synthétiques. La Figure 52 présente les informations disponibles dans le dossier numérique.

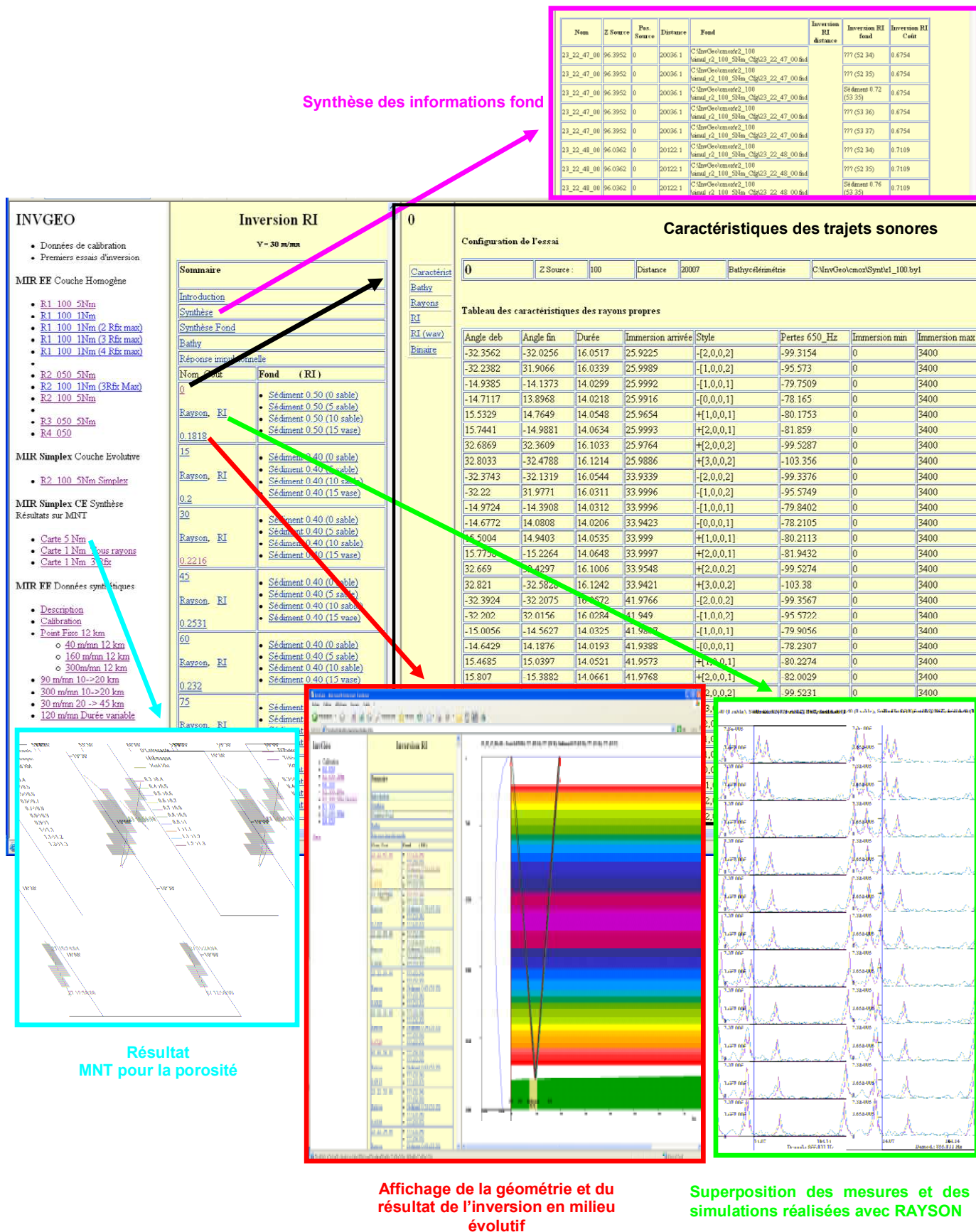


Figure 51 : Description des informations compilées dans le dossier Numérique de l'étude. Les flèches symbolisent un click de souris et l'obtention d'une nouvelle fenêtre de présentation des résultats. Ceux-ci sont de type graphique, texte ou binaire.



Comme l'illustre la Figure 52, ces informations sont accessibles sous plusieurs formes :

- sous forme de graphiques de type « Tracé de rayons », « Représentation de MNT du fond » ou encore « Tracé des réponses impulsionnelles mesurées et simulées » ;
- sous forme texte, dans des tableaux, afin de pouvoir réutiliser l'information dans un tableur lors de phase d'analyse des résultats. Il s'agit des caractéristiques des rayons propres, des paramètres des configurations expérimentales, ou de la synthèse des informations obtenues sur le fond ;
- ou encore sous forme de liens vers des fichiers binaires de RAYSON afin de pouvoir recharger la configuration de calcul de des simulations.

Les résultats de la synthèse de l'inversion s'affichent synthétiquement par ping et par case, et pour la fonction MNT, ainsi que la fonction de coût.

Des modifications et améliorations ont été ensuite apportées à l'archivage des résultats afin d'autoriser le rejeu automatisé de la simulation des rayons avec RAYSON. Le paramétrage du rejeu des simulations a été rendu possible par la sauvegarde binaire des différents objets : configuration, environnement, caractéristiques des rayons propres et simples .... Le calcul des rayons propres ayant été stocké, le rejeu des simulations peut être extrêmement rapide. Cette fonctionnalité a permis d'optimiser le temps passé à l'analyse et la compréhension des résultats de l'inversion, et surtout de procéder à une analyse organisée, c'est-à-dire constructive, mémorisée et précise.

#### **4.4. Conclusions**

---

Nous avons mis au point une méthode globale d'inversion qui permet de traiter une radiale dans son intégralité en respectant à la fois les contraintes de paramétrisation et de temps-réel du REA. Cette méthode permet de prendre en compte un milieu évolutif. Afin d'analyser et de synthétiser le nombre important de résultats issu d'une inversion, nous avons développé des outils spécifiques de présentation des résultats sous forme de modèle numérique de terrain. Nous nous proposons à présent de valider au chapitre suivant la méthode d'inversion développée, en la testant sur des données synthétiques.

## Chapitre 5      Inversion de données synthétiques

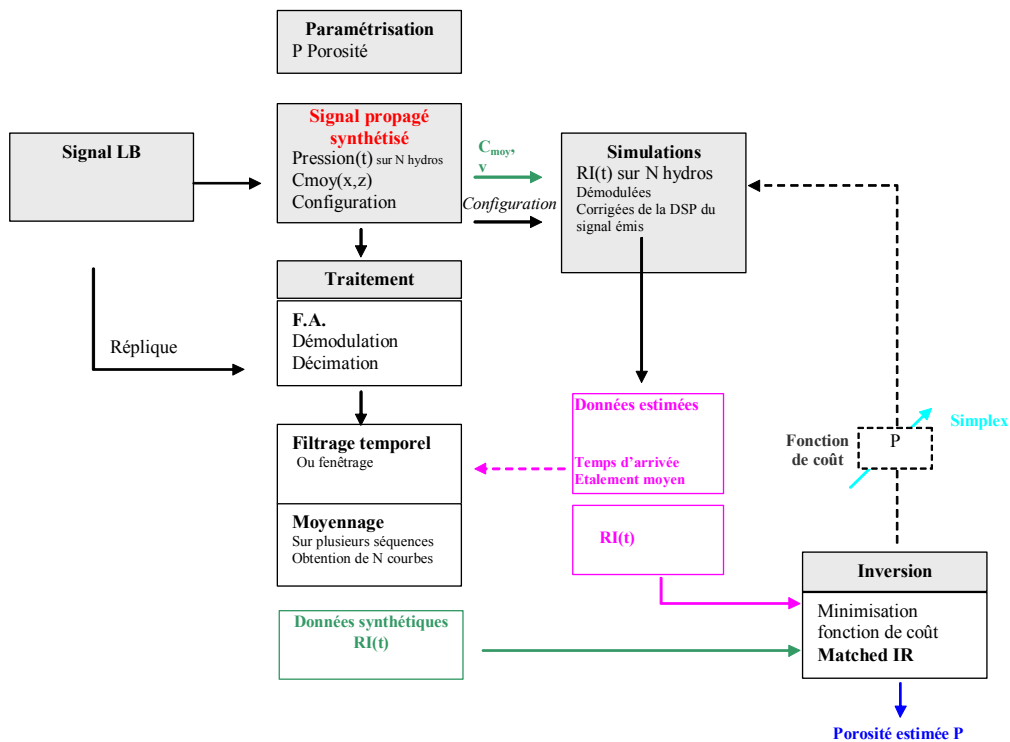
L'objectif des travaux menés dans ce chapitre est de tester la méthode d'inversion sur des données synthétiques, afin de caractériser les performances intrinsèques de la méthode développée. Le but de ces travaux est donc de vérifier que la routine d'inversion permet de retrouver le milieu marin défini.

Les objectifs initiaux étaient de mettre en évidence deux zones de caractéristiques sédimentaires différentes. Pour cela, ces travaux ont débuté par le choix d'une tranche verticale de l'océan typique de notre problème, c'est-à-dire présentant des trajets caractéristiques pour lesquels on peut nettement observer quatre rayons bien séparés dans le 1<sup>er</sup> pic de la réponse impulsionnelle. Nous avons ensuite procédé à la définition de radiales de porosité constante, puis présentant une rupture horizontale. L'environnement est décrit par la bathycélérimétrie moyenne de la campagne et un fond plat. Les simulations numériques de la propagation ont été réalisées. Elles ont consisté à simuler non pas simplement une réponse impulsionnelle, mais le signal acoustique transmis dans le milieu. Pour cela nous utilisons le module temps-réel du logiciel RAYSON qui modélise la transmission acoustique sous-marine en temps réel. Les signaux sonores simulés sont des champs temporels de pression reçus sur les hydrophones ; ils sont considérés comme des mesures à inverser et servent d'entrée à la méthode d'inversion.

Nous présentons la méthode de génération des signaux synthétiques, avant de montrer les résultats de l'inversion dans le cas d'une radiale homogène, puis évolutive (présentant une rupture horizontale). Ces résultats sont importants puisqu'ils permettent de valider la faisabilité de la méthode. Cette étape de validation permet en outre d'analyser l'impact de l'effet Doppler dû aux déplacements conjoints du navire émetteur et de l'antenne réceptrice sur le procédé d'inversion. Elle aboutit à un autre résultat majeur en montrant un problème lié à l'effet Doppler et une limitation de la méthode d'inversion, lors de l'usage de signaux de durée d'émission longue et lorsque le déplacement relatif source/récepteur est important.

### 5.1. Principe du test de la méthode d'inversion sur données synthétiques

Le principe du test de la méthode d'inversion sur données synthétiques est donné sur la figure ci-dessous :



**Figure 52 : Principe du test de la méthode d'inversion sur données synthétiques. Dans ce cas le champ de pression  $P(t)$  reçus sur les hydrophones est simulé à l'aide du module temps-réel du logiciel RAYSON. Ce test permet de tester non pas uniquement le module d'inversion mais l'ensemble de la procédure globale d'inversion, incluant la chaîne de traitement des signaux et l'impact du chenal acoustique et des configurations émetteurs-récepteurs**

Ce test consiste, après avoir généré un fichier \*.wav contenant le signal propagé simulé, à le considérer comme une mesure. Il permet de tester non pas uniquement le module d'inversion, comme cela est habituellement fait, mais l'ensemble de la procédure globale d'inversion, incluant la chaîne de traitement des signaux et l'impact du chenal acoustique et des configurations émetteurs-récepteurs.

Nous détaillons dans les paragraphes suivants la méthode de génération des signaux synthétiques.

## 5.2. Méthode de génération des signaux synthétiques

### 5.2.1. Principe

Le principe de la génération de signaux synthétiques est d'exploiter un module temps-réel de simulation de la propagation, afin de prédire le signal propagé, comme représenté sur la Figure 53:

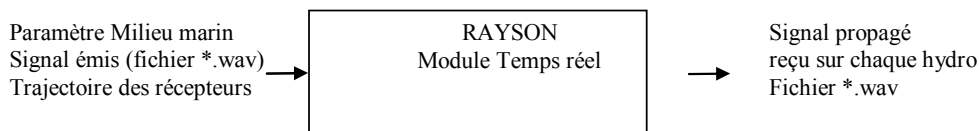


Figure 53 : Principe de la génération de signaux synthétiques

La prédiction du signal propagé nécessite la connaissance des paramètres du milieu marin, c'est-à-dire ses caractéristiques bathycélérimétriques, son profil de fond et son état de surface, ainsi que les positions et directivités des senseurs. La source est supposée fixe et les hydrophones sont supposés mobiles et décrits par leur trajectoire. Le signal propagé reçu sur chaque hydrophone est ensuite traité comme s'il s'agissait d'un signal mesuré.

Nous avons développé le module temps-réel lors de travaux réalisés en collaboration avec le GESMA Groupe d'Etudes Sous-Marine de l'Atlantique à Brest. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications [Noël et al 2002] [Viala et al 2004]. Ils ont notamment servi à plusieurs reprises pour simuler des signaux de trajectographies, afin de valider, sans sortie à la mer, les logiciels opérationnels de positionnement et de trajectographie de sous-marins.

### 5.2.2. Module Temps-Réel de RAYSON

Le module temps-réel de RAYSON permet de calculer, pour un signal émis donné, le signal transmis par le canal de propagation. Les signaux émis et transmis sont décrits dans un fichier au format \*.wav. [Viala et al 2004] [Lapierre et al 2001].

La méthode de calcul du signal propagé est la suivante : dans le cas où le récepteur est mobile, le signal transmis est calculé le long de la trajectoire du récepteur. Dans le cas présent les trajectoires des 11 récepteurs de l'antenne verticale sont décrites dans un fichier ascii. La figure ci-dessous montre les trajectoires des 11 hydrophones dans le plan vertical ( $y$  = immersion ;  $x$  = distance de propagation).

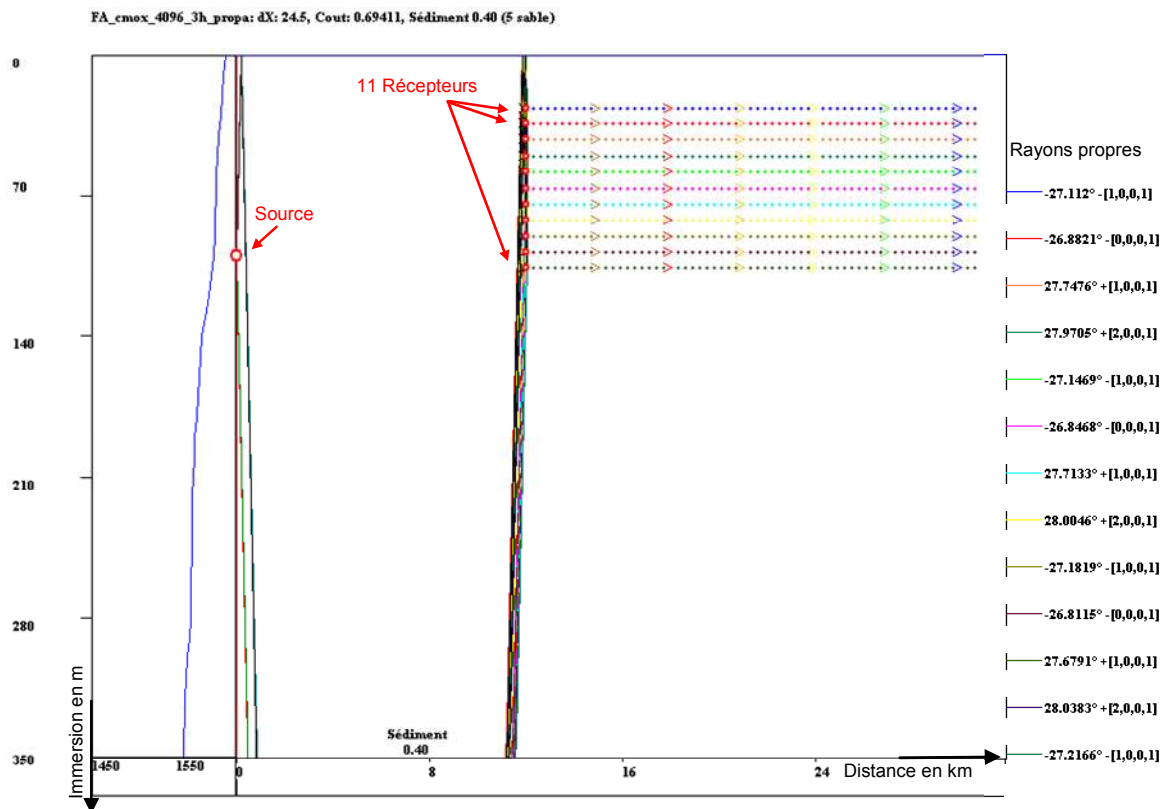


Figure 54 : Trajectoires des 11 hydrophones pour la radiale R2. La trajectoire des récepteurs est représentée par une croix donnant la position du récepteur toutes les 6s ou 1s (selon la durée totale du signal émis) et par une flèche de couleur toutes les 10 croix (les couleurs étant attribuées selon la convention des électroniciens; l'orientation de la flèche étant celle du déplacement du récepteur).

Le module temps-réel permet de générer le signal propagé ; il réalise les étapes de calcul suivantes :

- Prise en compte du signal à transmettre
- Paramétrisation de la directivité de l'émetteur (celle de la source Janus Helmholtz du CMO)
- Prise en compte de la trajectoire des récepteurs
- Paramétrisation de la directivité des récepteurs
- Calcul de la réponse impulsionnelle non stationnaire du canal de propagation
- Calcul du signal transmis

Ces étapes sont représentées sur la Figure 55:

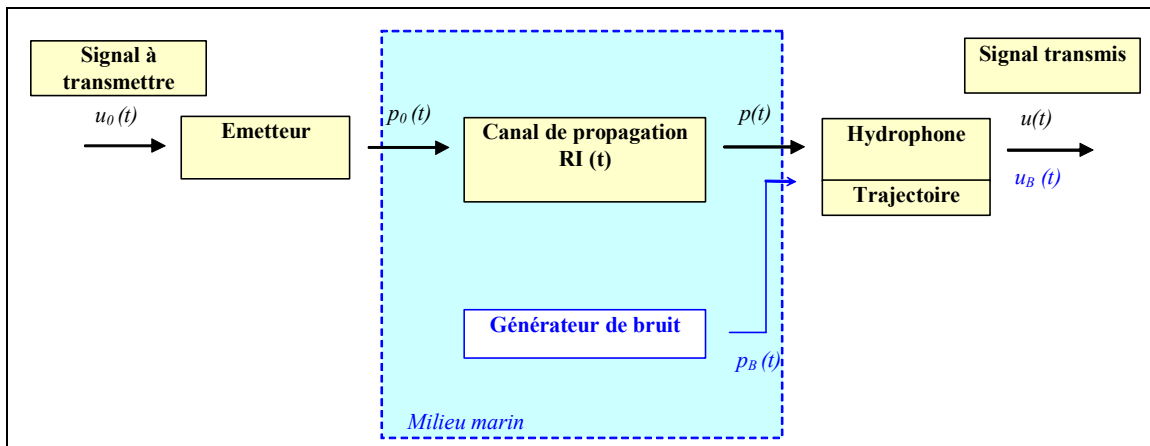


Figure 55 : Synoptique des fonctionnalités du module de canal

La difficulté majeure de la modélisation de la réponse impulsionnelle en réception sur des hydrophones en mouvement est que celle-ci n'est plus stationnaire. Le principe du calcul de la RI pour une trajectoire de récepteur est illustré sur la figure suivante :

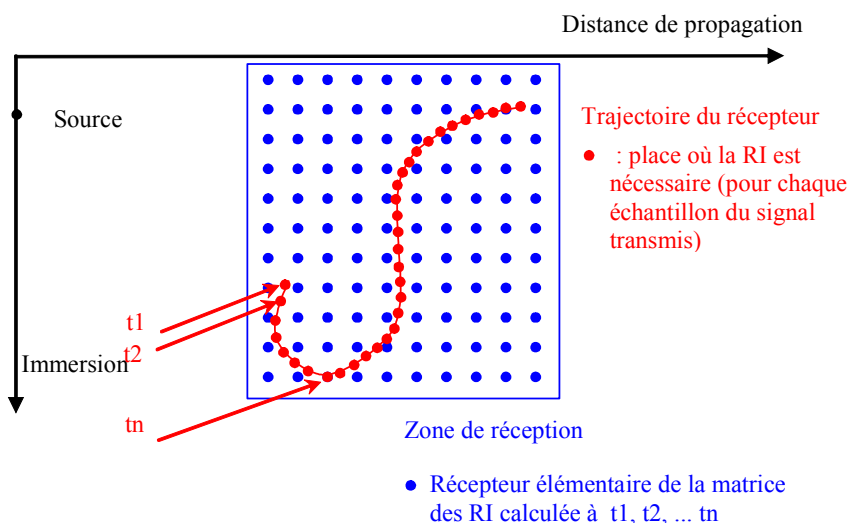


Figure 56 : Trajectoire du récepteur (en rouge) et définition de la matrice des RI (en bleu)

Le domaine de réception englobant la trajectoire du récepteur est maillé et on calcule initialement la RI en chaque point du maillage et à chaque échantillon temporel, sur la durée de l'intervalle utile. Le calcul de l'intervalle utile pour les retards est lié au support temporel du signal transmis  $p(t)$ .

On obtient donc une matrice de RI variable dans le temps. Ainsi pour chaque point de la trajectoire du récepteur (point rouge sur la Figure 56) on cherche à déterminer à un instant  $t$ , la réponse impulsionnelle (courbe rouge de la Figure 57) connaissant les RI pour les instants  $t_1, t_2, \dots, t_n$  aux quatre coins de la maille. Le problème que nous avons solutionné réalise une interpolation particulière de la RI à la fois spatiale et temporelle.

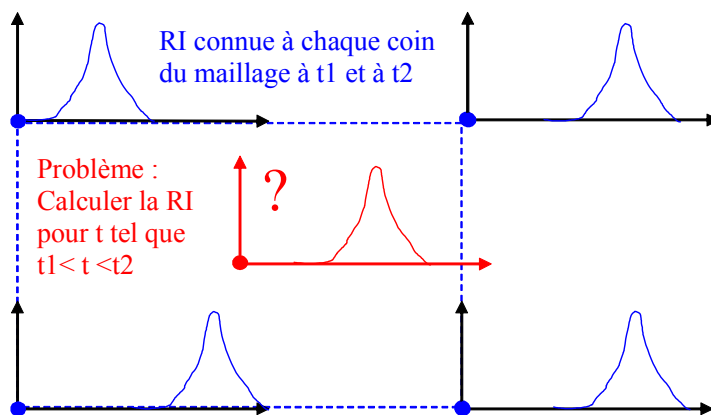


Figure 57 : RI connues (en bleu) et RI à déterminer (en rouge) dans une maille élémentaire de la zone de réception.

Le calcul de la réponse impulsionnelle non stationnaire interpolée est effectué au lieu du récepteur  $(X, Z)$  pour chaque lieu  $(X, Z)$  et pour chaque échantillon de temps  $t$ . Le signal transmis est ensuite déterminé par convolution du signal émis et de la réponse impulsionnelle non stationnaire. Cette convolution est calculée échantillon par échantillon, en faisant l'hypothèse que la RI reste stationnaire sur la durée d'un échantillon.

Ce module est utilisé pour prédire les signaux propagés dans le milieu marin synthétique.

### 5.2.3. Paramètres du milieu marin synthétique

Le fond marin synthétique est supposé plat avec une profondeur de 3400 m ; il simule une rupture sédimentaire horizontale : il admet un fond sédimentaire sable de porosité 0.4 jusqu'à 15 km, puis un fond vaseux de porosité 0.7 au-delà de 15 km.

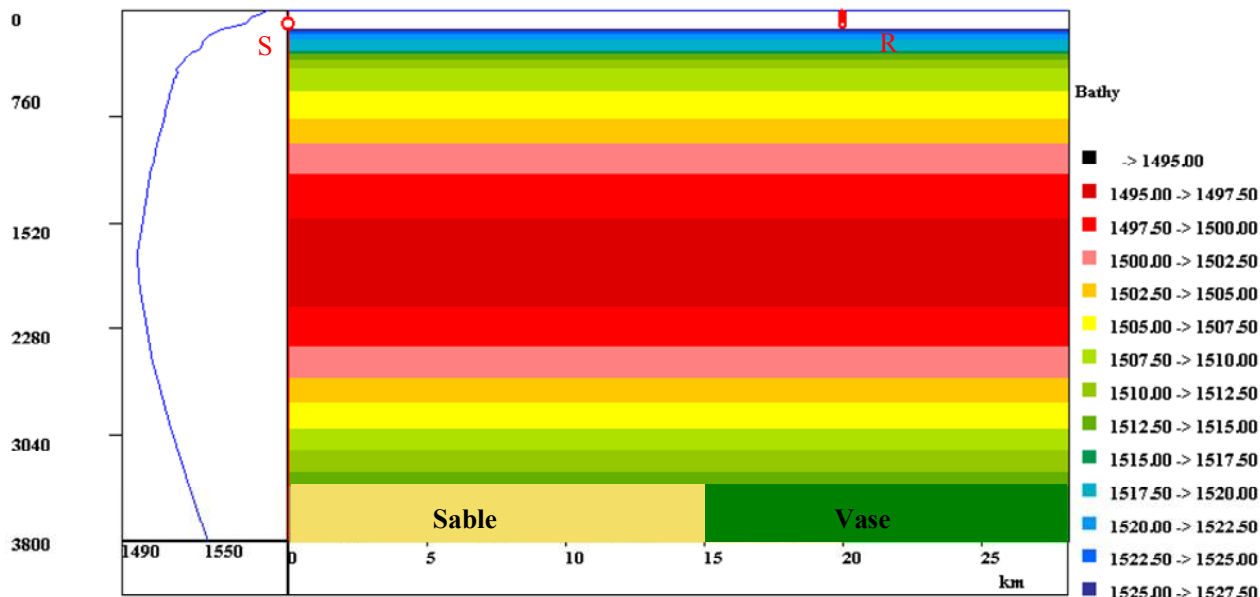


Figure 58 : Description du milieu synthétique marin simulant une rupture sédimentaire horizontale. Le fond est plat (3400 m) ; il est constitué de sable ( $P = 0.4$ ) jusqu'à 15 km, puis de vase ( $P = 0.7$ ) au-delà.

Le profil de célérité est le profil moyen prélevé durant la campagne HERACLES. Les simulations numériques sont réalisées pour le signal CMOX échantillonné à 4096 Hz.

Nous réalisons des simulations qui consistent à éloigner le récepteur de la source pour une distance allant de 15 à 45 km. Dans un premier temps les réflexions sonores ont lieu dans la zone homogène sableuse, puis à mesure que la distance augmente, elles atteignent le fond vaseux.

La première partie de la radiale synthétique permet de valider la méthode en milieu homogène, l'ensemble de la radiale en milieu évolutif.

### 5.2.4. Calibration du calcul du signal propagé

De la même façon que pour les données mesurées, nous procédons à la calibration du calcul du signal propagé. Cette phase permet d'obtenir une source « équivalente » dont le spectre utile est différent du spectre mesuré en lac, mais qui permet d'avoir un signal dit « équivalent » plus ressemblant à la sortie du FA. Ainsi la sortie de filtrage adapté du signal propagé synthétique, sera plus proche de la simulation numérique de la RI, et la fonction de coût présentera une meilleure dynamique.

Pour cela, nous plaçons les récepteurs à une distance de 100 m de la source et à vitesse nulle. La configuration géométrique est représentée sur la figure ci-après :

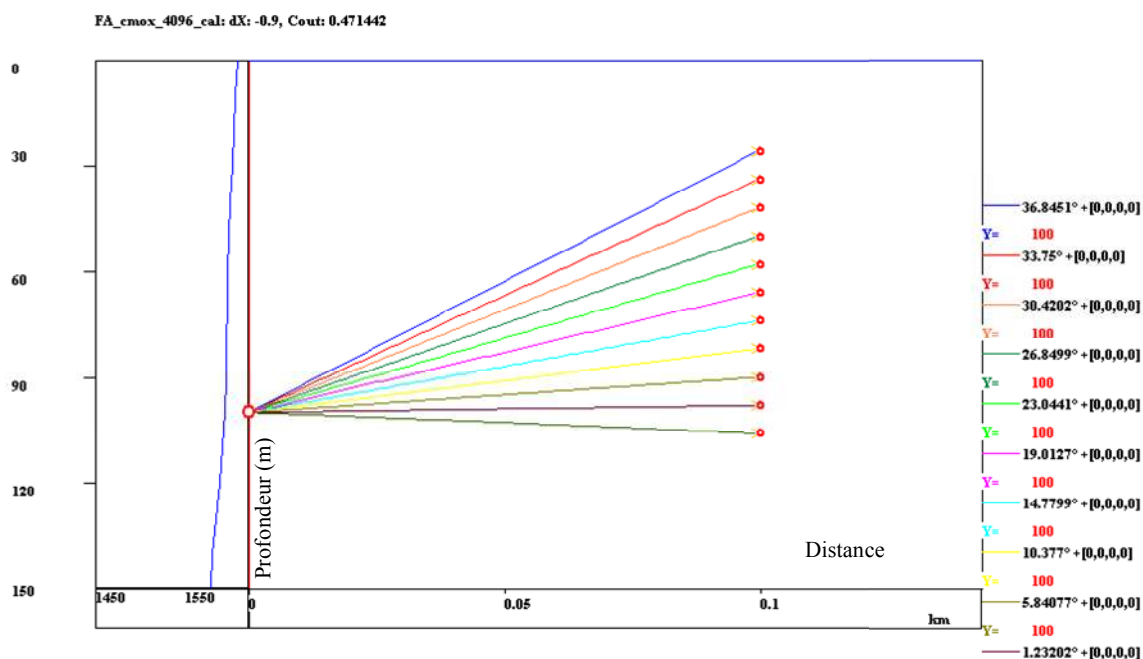


Figure 59 : Configuration pour la calibration du signal propagé synthétique. Cette étape permet d'obtenir un signal équivalent à la sortie du FA

Cette phase de calibration est réalisée à l'aide d'un schéma d'optimisation de type Simplex sur la densité spectrale de la source. La fonction de coût utilisée est celle de (Eq. 11). Les calculs sont instantanés.



La figure suivante montre les signaux obtenus à l'issue de la routine d'inversion de la densité spectrale de la source pour le FA du signal propagé (en bleu) ; y sont superposées (en rouge) les réponses impulsionnelles simulées. Cette phase a permis un bon ajustement des niveaux des deux types de données.

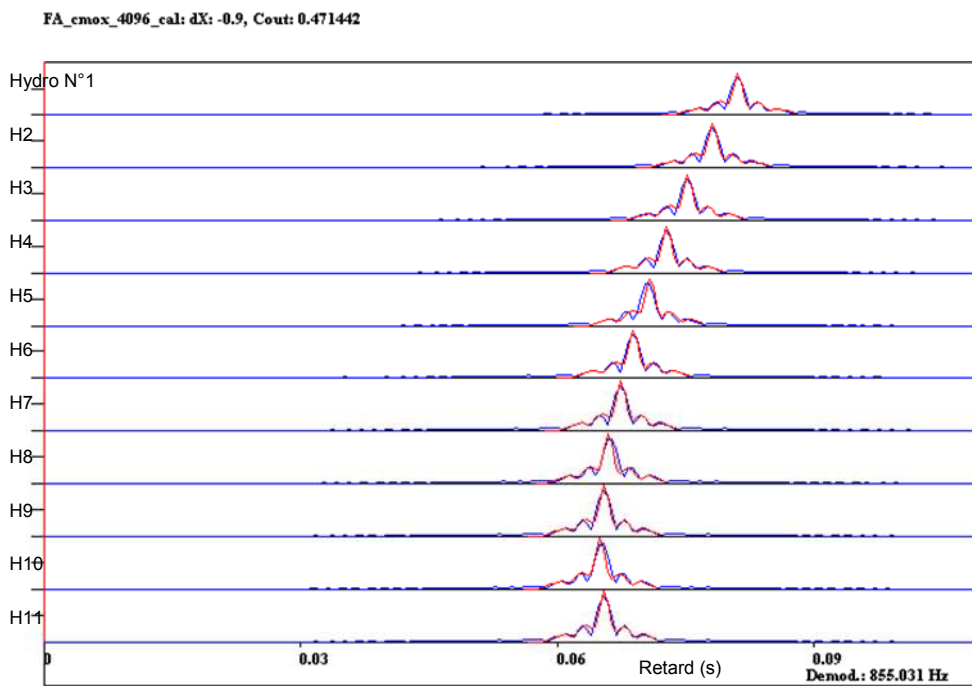


Figure 60 : En bleu : FA du signal propagé sur données synthétiques (en sortie de routine d'inversion de la DSP) -  
 En rouge : Réponse impulsionnelle simulée.

### 5.3. Résultats de l'inversion des données synthétiques

#### 5.3.1. Résultats de l'inversion des données synthétiques en point fixe

Une phase d'inversion en point fixe a ensuite été réalisée afin de valider la procédure. Elle a été testée pour une distance de 12 km, sur fond de sable. La géométrie est représentée ci-dessous :

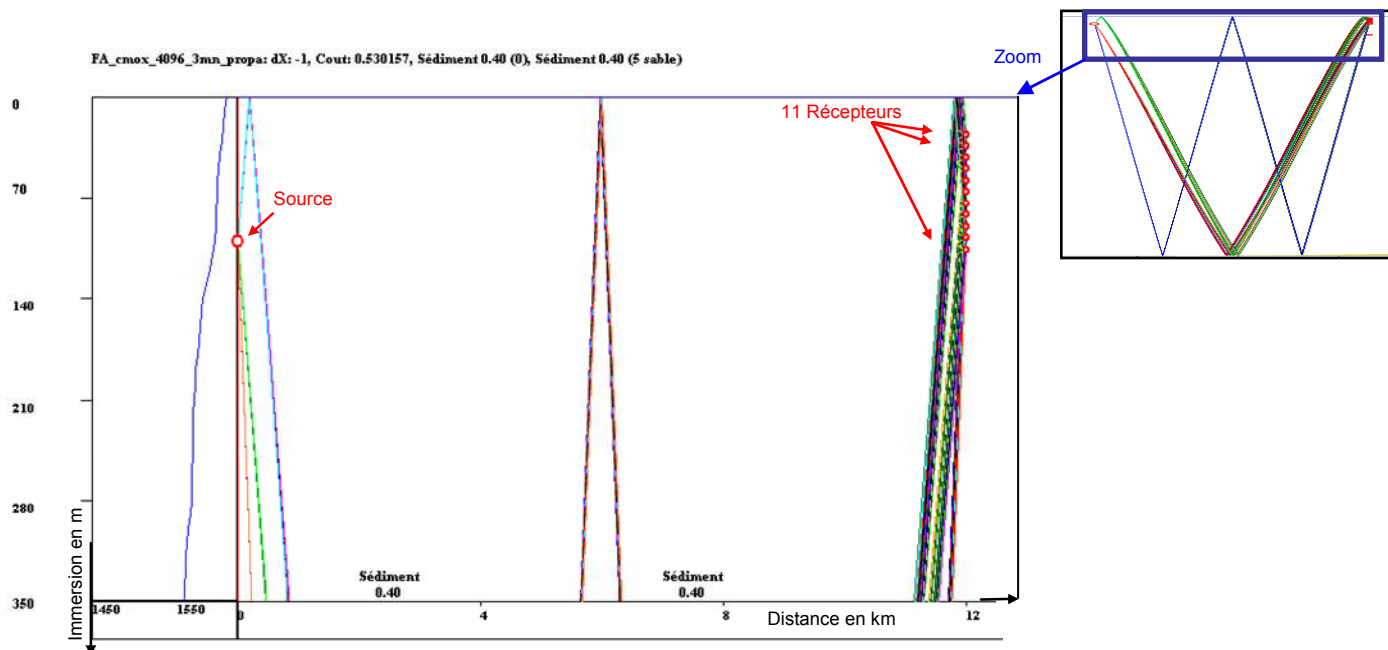


Figure 61 : Configuration géométrique du test d'inversion en point fixe (D = 12 km) sur fond de sable

Comme le montre la figure suivante, l'inversion est correcte et permet de retrouver une porosité caractéristique d'un fond de sable.

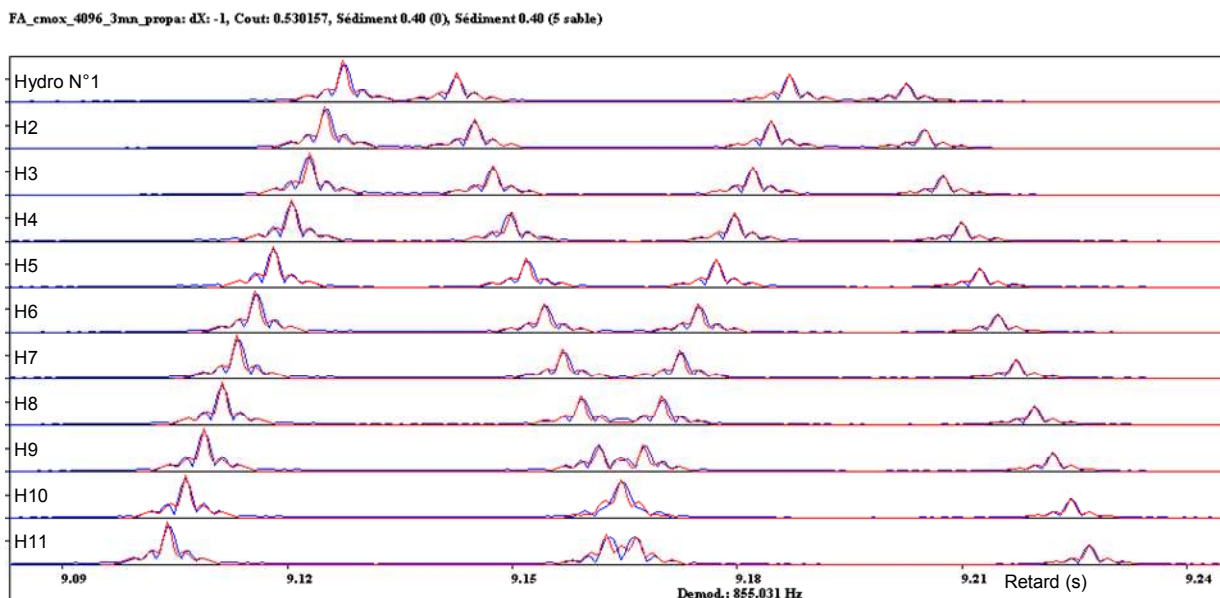


Figure 62 : Résultat de l'inversion en point fixe (D = 12 km) sur fond de sable. La valeur initiale est celle du milieu de l'intervalle d'exploration de la porosité. Les réponses impulsionnelles simulées et mesurées s'ajustent parfaitement à l'issue de la routine d'inversion. Celle-ci retrouve le fond synthétique de sable.

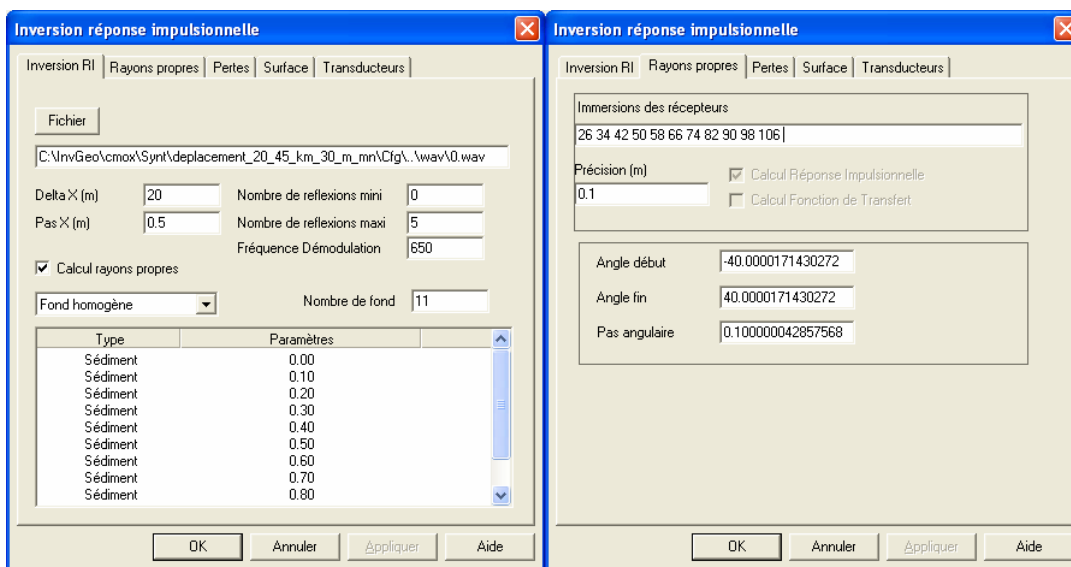
**5.3.2. Description des simulations numériques en mouvement**

Nous avons dans un premier temps généré des données synthétiques pour une vitesse supérieure à la vitesse réelle du navire, afin, en augmentant la récurrence, de diminuer les temps de calcul des simulations. La récurrence des émissions était de 15 s. La vitesse relative des récepteurs par rapport à la source était de 10 Nd environ, soit 300 m/mn.

Un fichier contenant le signal émis durant la durée de la radiale a été généré ; ce fichier est traité par le simulateur temps-réel qui fourni un fichier contenant le signal propagé sur chacun des hydrophones.

La directivité de la source est prise en compte par l'intermédiaire d'un fichier décrivant son niveau fréquentiel en fonction de l'angle d'émission (Fichier \*.sv).

Les paramètres de l'inversion et des calculs de la propagation sont donnés ci-dessous :

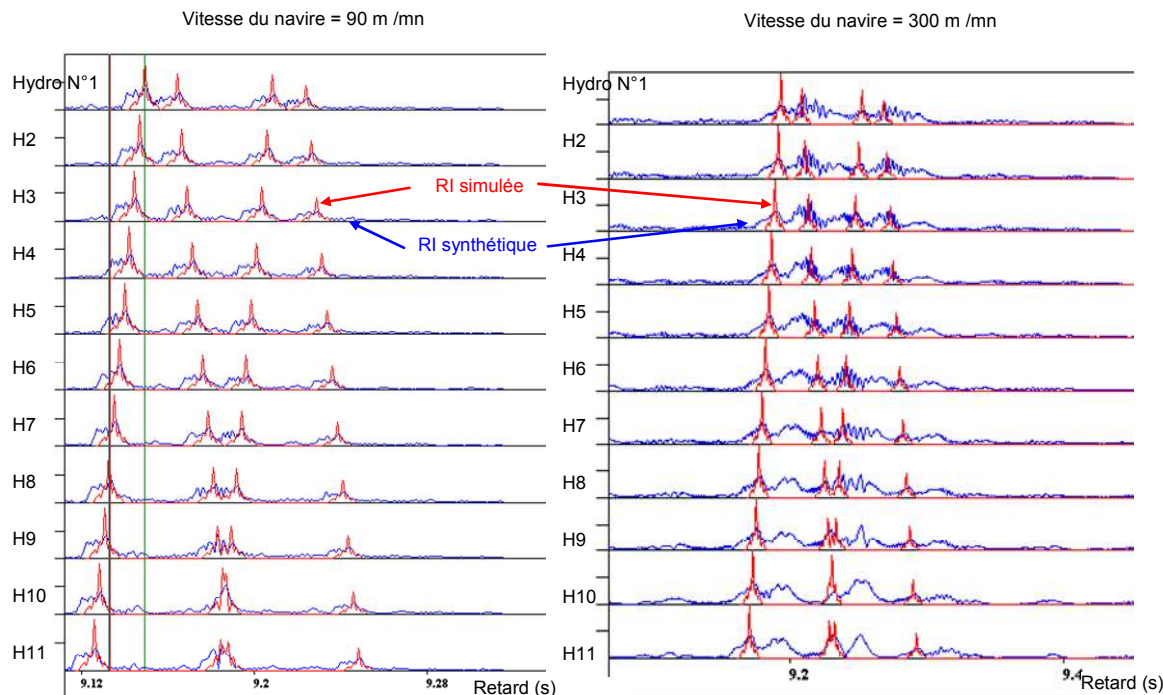


**Figure 63 : Paramètres des calculs pour l'inversion des données synthétiques**

D'importantes difficultés sont apparues dans cette phase des travaux en raison d'une part des temps de calcul extrêmement longs, de la complexité de la gestion des données et enfin du volume de données très important.

**5.3.3. Analyse comparative des RI synthétiques et simulées**

L'analyse des résultats pour une vitesse de 10 Nd a mis en évidence un problème essentiel. En effet, comme le montre la figure suivante, la sortie de filtrage adapté du signal propagé, diffère de la RI simulée à mesure que l'effet Doppler augmente.



**Figure 64 : Comparaison entre réponse impulsionnelle simulée (en rouge) et réponse impulsionnelle synthétique (en bleu) – A Gauche vitesse du navire = 90 m/mn (3 Nd), à droite : 300 m/mn (10 Nd).**

Quand la vitesse relative de la source et des récepteurs est trop importante, l'effet Doppler distord les signaux qui ressemblent moins au signal émis. Les sorties de filtrage adapté ont alors un niveau plus faible que les simulations.

Nous avons réalisé des simulations numériques en points fixes, puis en déplacement de 10 à 20 km, puis de 20 à 45 km, en diminuant la vitesse relative des engins jusqu'à ce que les RI simulées et synthétiques soient accordées. Les cas suivants ont été traités : 300 m/mn, 160 m/mn, 90 m/mn, 40 m/mn et 30 m/mn, soit une exploration de 10 Nd à 1 Nd.

Finalement il a fallu diminuer la vitesse à 30 m/min soit environ # 1 Nd, avec une durée d'émission des signaux de 8 s. Les calculs réalisés, correspondant uniquement à la vitesse de 1 Nd, ont duré 4 jours de calcul sur une station de travail Athlon 64 4000 + - 2 Go RAM.

Les résultats de l'inversion de ces données synthétiques sont présentés au paragraphe suivant.

**5.3.4. Résultats de l'inversion des données synthétiques en mouvement**

La récurrence des émissions était de 15 s. La durée totale de la passe simulée est de 44535 secondes, ce qui correspond à environ 12 heures de mesures. Dans ce cas la vitesse simulée du navire est de 30 m par mn (1 Nd). La distance de propagation décrite parcourt l'intervalle 20 km à 45 km. Ces données synthétiques comportent 4 fois plus de points qu'en réalité.

La méthode d'inversion testée est le MIR EE ; notons qu'elle ne renseigne que sur les tronçons du fond insonifiés, en supposant que le fond est constitué d'une couche homogène. Les figures qui suivent présentent 5 exemples de résultats extraits parmi les résultats des 3000 pings disponibles.

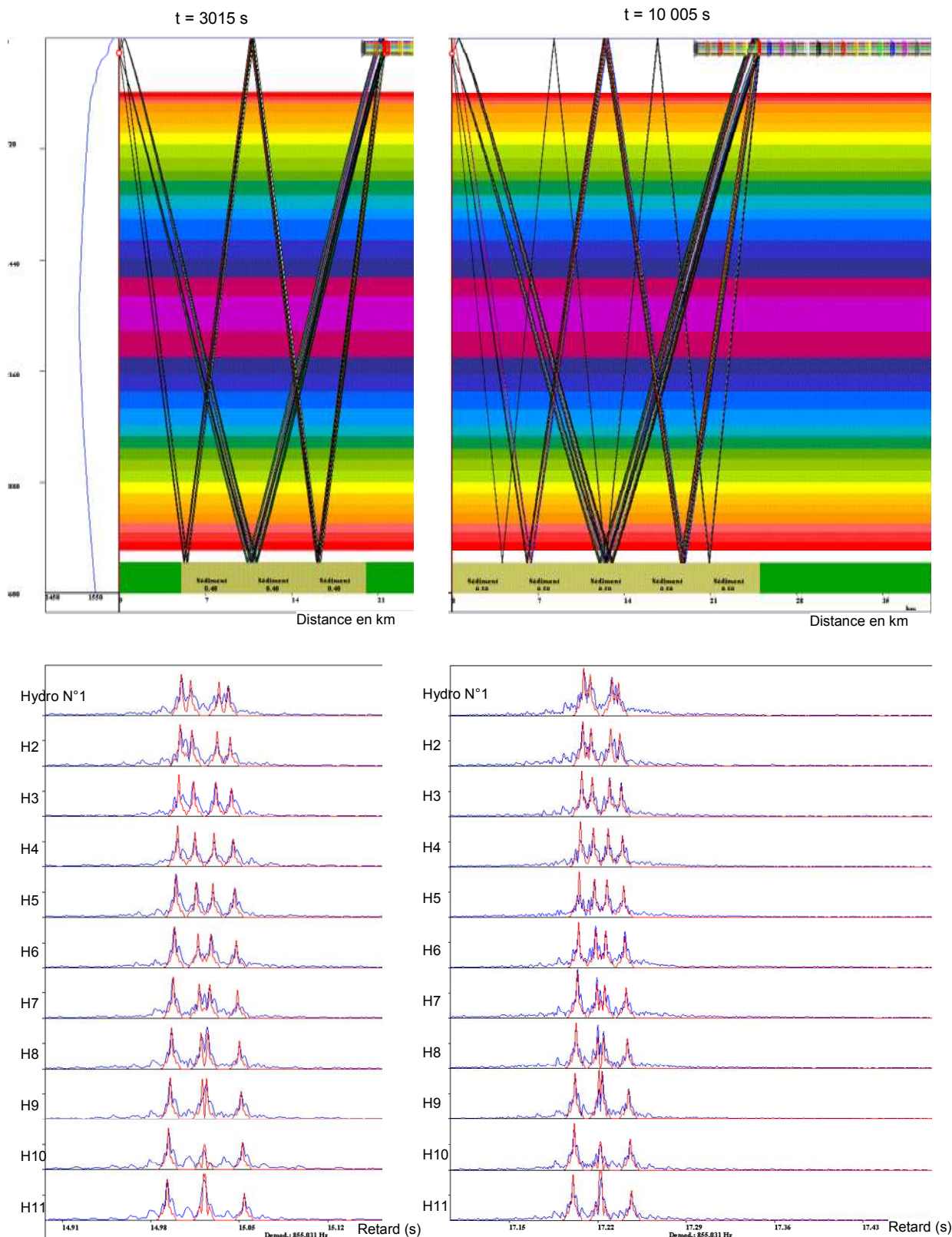


Figure 65 : En Haut : Configuration géométrique et résultat de l'inversion – En Bas : RI simulée (rouge) et synthétique (bleu) - A gauche à t = 3105 s – A droite à t = 10005 s

RI simulées et RI synthétisées sont comparables. La valeur de la porosité inversée est de 0.4 puis passe à 0.5 à mesure que des rayons viennent heurter un fond de vase.

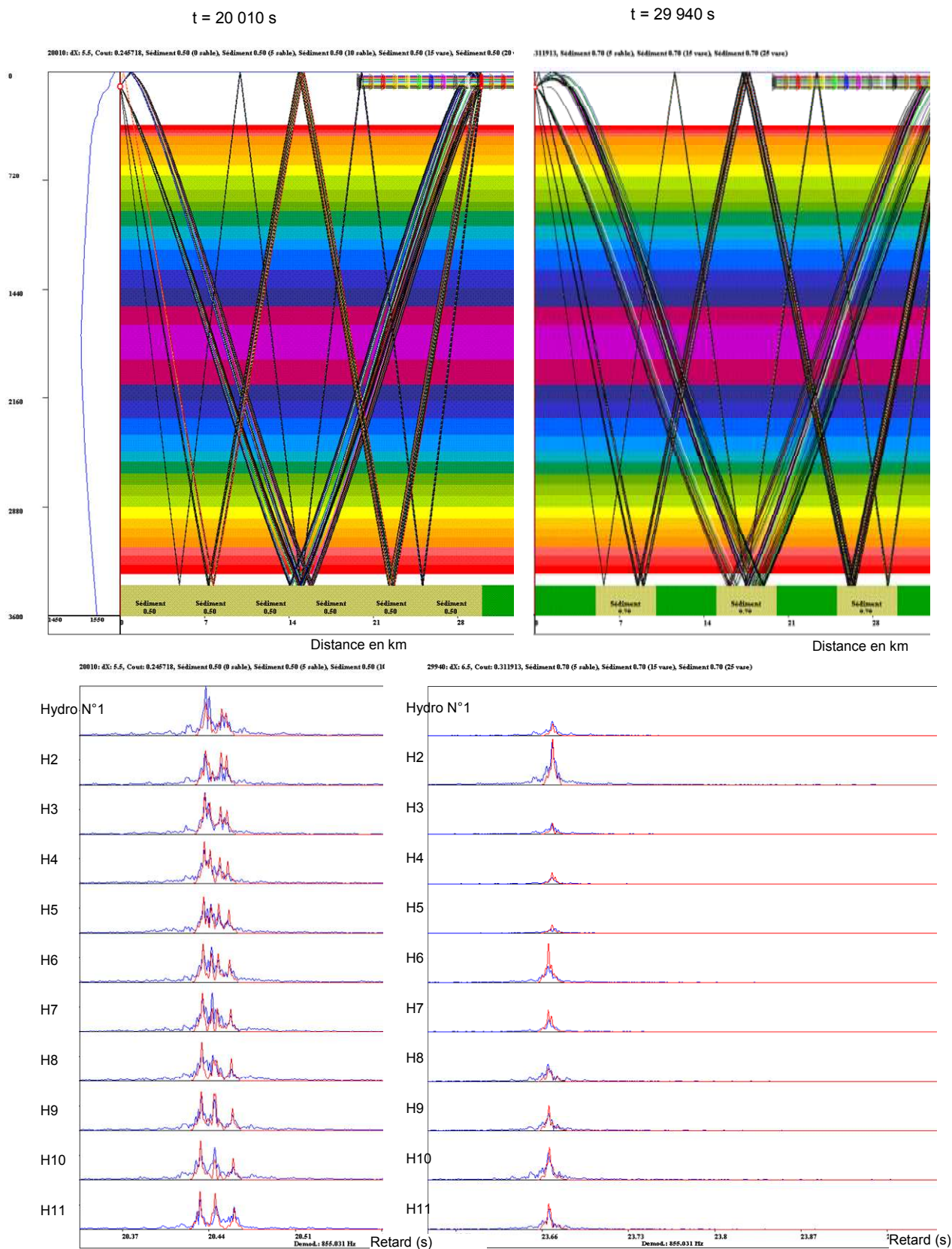


Figure 66 : En Haut : Configuration géométrique et résultat de l'inversion – En Bas : RI simulée (rouge) et synthétique (bleu) - A gauche à  $t=20010$  s – A droite à  $t = 29940$  s

La porosité passe de 0.5 à 0.7 à mesure que le nombre de réflexions sur la vase augmente.

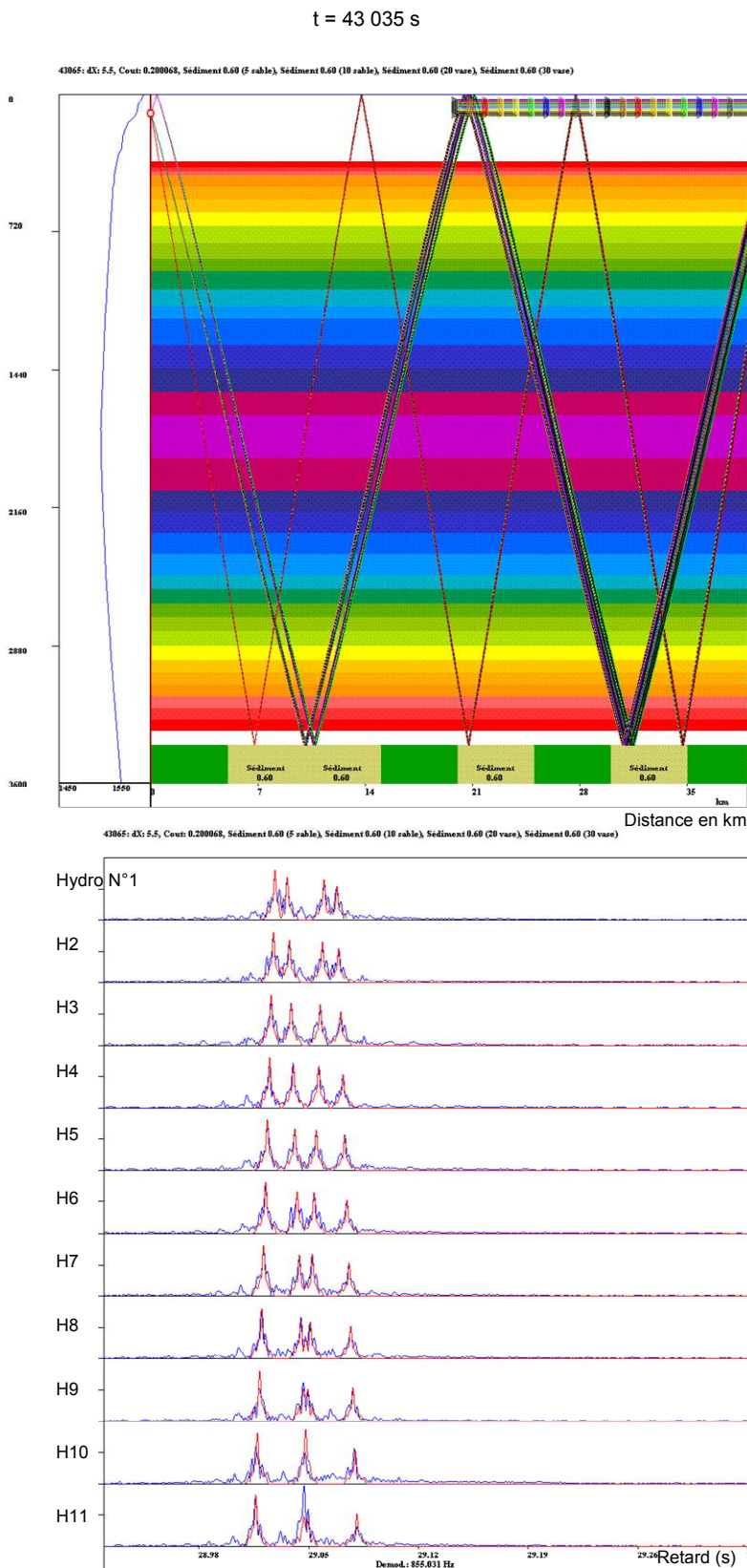


Figure 67 : En Haut : Configuration géométrique et résultat de l'inversion – En Bas : RI simulée (rouge) et synthétique (bleu) - pour t = 43035 s, en fin de radiale

La Figure 68 montre l'évolution de la fonction de coût moyennée au cours du temps. N'ont été conservés que les résultats pour lesquels celle-ci est inférieure à 0.3.

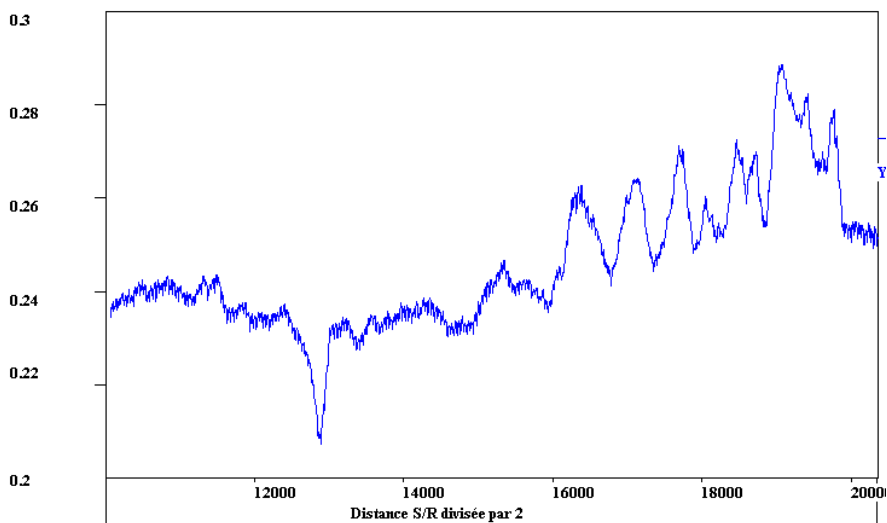


Figure 68 : Evolution de la fonction de coût au cours de la radiale

L'évolution de la porosité le long de la radiale est représentée sur la Figure 69. Elle montre une augmentation des valeurs de la porosité, passant de 0.4 à des valeurs comprises entre 0.6 et 0.8 en fin de radiale.

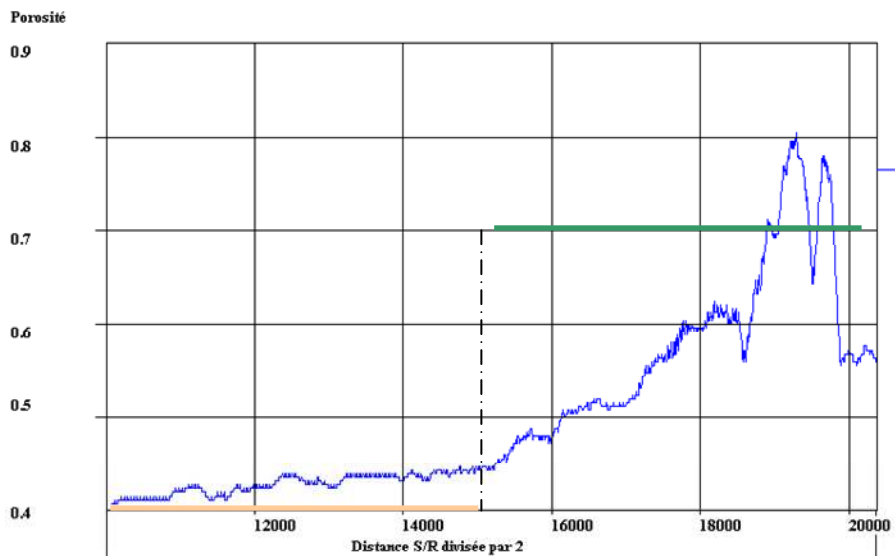


Figure 69 : Evolution de la valeur inversée de la porosité au cours de la radiale, les valeurs attendues sont 0.4 (Sable) jusqu'à 15 km puis 0.7 (Vase).

Nous concluons, et c'est un résultat majeur de cette étude, que la méthode permet de détecter une transition horizontale des propriétés acoustiques du fond marin.



### 5.3.5. Analyse complémentaire de l'impact de l'effet Doppler

Avant de mettre en place des méthodes d'inversion trop complexes il a été entrepris de dépouiller l'ensemble de la campagne avec la porosité, et d'interpréter physiquement les résultats par comparaison avec les données sédimentologiques prélevées in-situ. Compte tenu des résultats obtenus, des analyses complémentaires relatives à l'impact de l'effet Doppler des signaux ont été menées.

Suite à ces conclusions le CMO souhaitait avoir une évaluation de la déformation des signaux après filtrage adapté pour une vitesse nominale de déplacement relatif source/récepteurs et en fonction de la durée des signaux. Nous avons réalisé des simulations numériques sur une distance de 20 km et pour une vitesse de  $4 Nd$ . Les signaux émis présentaient les durées suivantes : 0.5 s, 1 s, 2 s, 4 s et 8 s.

La figure ci-après présente les résultats de sorties de filtrage adapté obtenues après filtrage adapté du signal propagé dans un milieu synthétique, pour les différentes durées du signal émis. On observe la dégradation du signal en fonction de la vitesse relative des engins. On constate, dans cette configuration de propagation, une dégradation importante des signaux pour la durée d'émission de 8 s, ce qui explique les difficultés que nous rencontrons lors de l'inversion des données réelles et en particulier lors de la phase de confrontation des données simulées (sans prise en compte de l'effet Doppler) et des données mesurées.

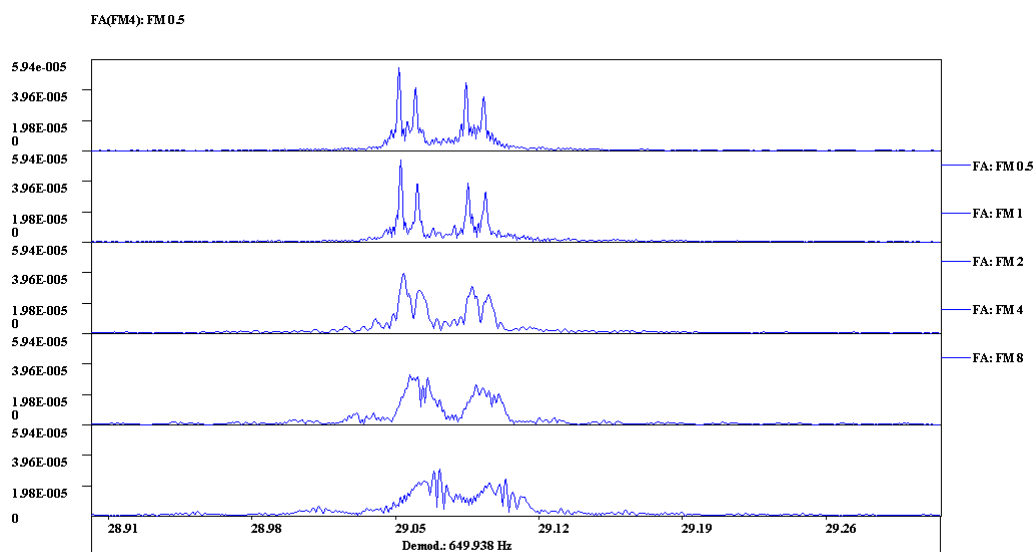


Figure 70 : Sorties de filtrage adapté, obtenues après filtrage adapté du signal propagé dans un milieu synthétique, pour différentes durées du signal émis. Vitesse  $E/R = 4 Nd$ .

Notons que les signaux utilisés (FM) sont pourtant indiqués comme étant tolérants à l'effet Doppler [Altes 1970] [Millet 1991], sont préconisés dans le cas de traitement par corrélation pour lesquels ils sont optimaux au sens de la fonction d'ambiguïté [Mamode 1981] [Mamode - Escudié 1987] et sont utilisés couramment dans ce type d'application sans qu'un problème majeur n'ait été détecté [Bouhier 1986] [Arzelies et al 1987]. Il s'agit donc d'effets du second ordre, dus à la longueur du support temporel du signal, qui ont pu être modélisés et appréhendés grâce à la précision du modèle direct.

## 5.4. Conclusions

---

La méthode d'inversion développée permet de détecter une transition horizontale des propriétés acoustiques du fond marin. Ces essais sur données synthétiques mettent en évidence un problème lié à l'effet Doppler et une limitation de la méthode d'inversion, lors de l'usage de signaux de durée d'émission longue et lorsque le déplacement relatif source/récepteur est important.

## Chapitre 6      Inversion de données réelles

Ce chapitre présente les résultats des inversions des données réelles relatives aux quatre radiales de la campagne HERACLES. Dans un premier temps on discute les résultats obtenus avec la méthode MIR EE couche homogène. Si les résultats sont intéressants car ils fournissent des valeurs de la porosité cohérentes avec les observations in situ et permettent de valider la faisabilité de traiter en temps réel (à l'échelle du REA) l'intégralité de la campagne, ils démontrent la nécessité d'un outil de synthèse et montrent l'intérêt de l'approche MNT.

Celle-ci est utilisée sur l'ensemble de la campagne avec la méthode MIR Simplex couche évolutive pour une maille de MNT de 5 Nm. Les porosités inversées sont en accord avec les valeurs observées bien que sur-estimées ; les écarts constatés sont expliqués. Ce chapitre présente enfin les résultats obtenus en affinant le MNT (maille de 1 Nm de côté), puis en ne considérant que les rayons se réfléchissant moins de quatre fois sur les interfaces. Une analyse statistique des données obtenues est effectuée dans chaque maille avant de conclure sur les performances de la méthode d'inversion mise en place.

## 6.1. Résultats de l'inversion de données réelles avec la méthode MIR EE

Les résultats d'inversion sur données réelles obtenus avec la méthode MIR EE Couche Homogène sont présentés et discutés dans ce paragraphe en ce qui concerne les radiales R1\_100 et R2\_100. Les résultats relatifs à cette dernière ont fait l'objet d'un article lors de la conférence OCEANS 2005 [Viala et al 2005].

### 6.1.1. Vérité terrain de la Radiale R1\_100

La Figure 71 présente la trajectoire de la radiale R1\_100 superposée à la connaissance sédimentaire. L'antenne dérive vers de nord ouest de 12 h à 20 h, tandis que pendant ce temps la source s'éloigne de la position initiale vers le nord est. Les segments source-antenne sont situés sur une zone homogène pratiquement tout le long de la radiale, constituée de sédiment de type KS04. En fin de radiale l'antenne dérivant vers le Nord-Est se retrouve sur un fond de sédiment de type KS02.

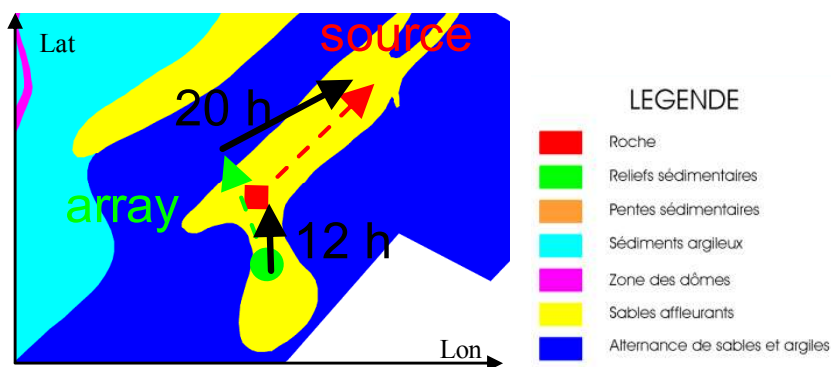


Figure 71 : Connaissance sédimentaire et radiale le long de la radiale R1\_100

La Figure 72 représente les trajectoires du premier paquet de rayons pour une distance D de 45 km et l'évolution le long de la radiale de l'angle de rasance relatif à la réflexion au fond du premier paquet de rayons. Ces valeurs sont issues des simulations numériques. Les angles de rasance varient globalement entre 5° et 20° durant une radiale.

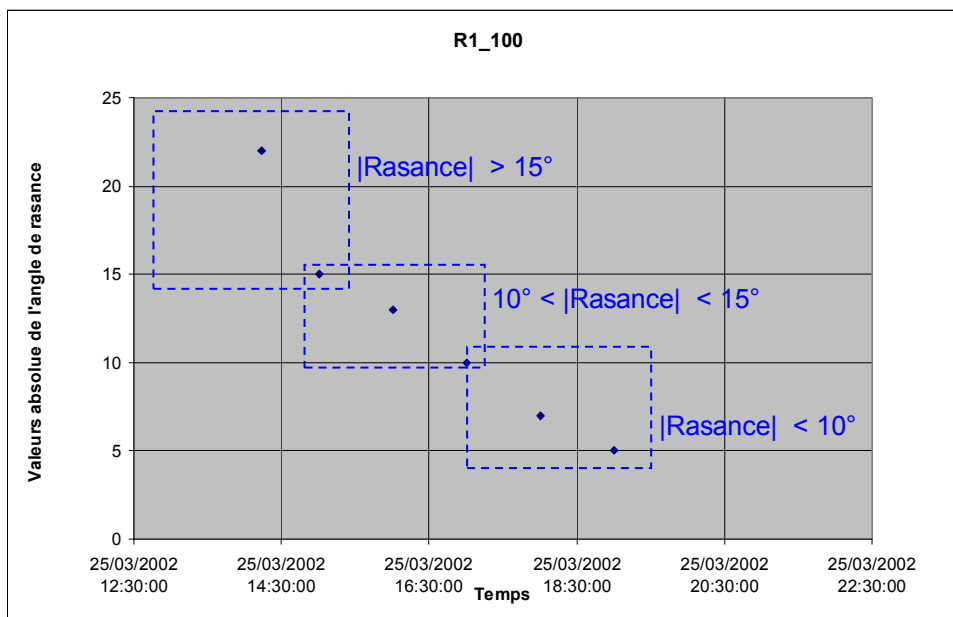


Figure 72 : Trajectoires du premier de rayons pour une distance D de 45 km. Evolution de l'angle de rasance le long de la radiale R1\_100

Nous avons tenté sur la Figure 73 de synthétiser la connaissance sédimentaire dans la zone de réflexion du premier paquet de rayons le long de la radiale. Celle-ci est obtenue pour les angles de rasance relatifs à la configuration de mesure. Les engins se déplaçant, la radiale source-antenne ne reste pas dans un plan vertical ; il n'est alors pas possible sans modèle numérique de terrain, c'est-à-dire sans un géoréférencement précis des trajectoires des radiales et des lieux d'impact des rayons de tracer une évolution sédimentaire le long d'une radiale. La représentation de la Figure 73 tente de décrire l'évolution au cours du temps du lieu d'impact « moyen » des rayons, c'est-à-dire la connaissance sédimentaire à mi-radiale.

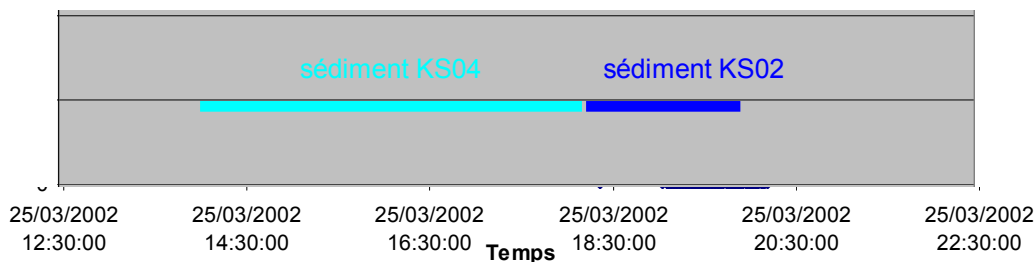


Figure 73 : Tentative de synthèse de la connaissance sédimentaire le long de la radiale R1\_100. Cette figure décrit l'évolution au cours du temps de la connaissance sédimentaire à mi-radiale

La Figure 74 rappelle l'évolution des coefficients de réflexion pour les structures sédimentaires des points de carottage et les compare avec les coefficients utilisés dans ETIA pour des valeurs type du sable et de la vase.

Les propriétés acoustiques des 5 carottages sont données sur la Figure 74 :

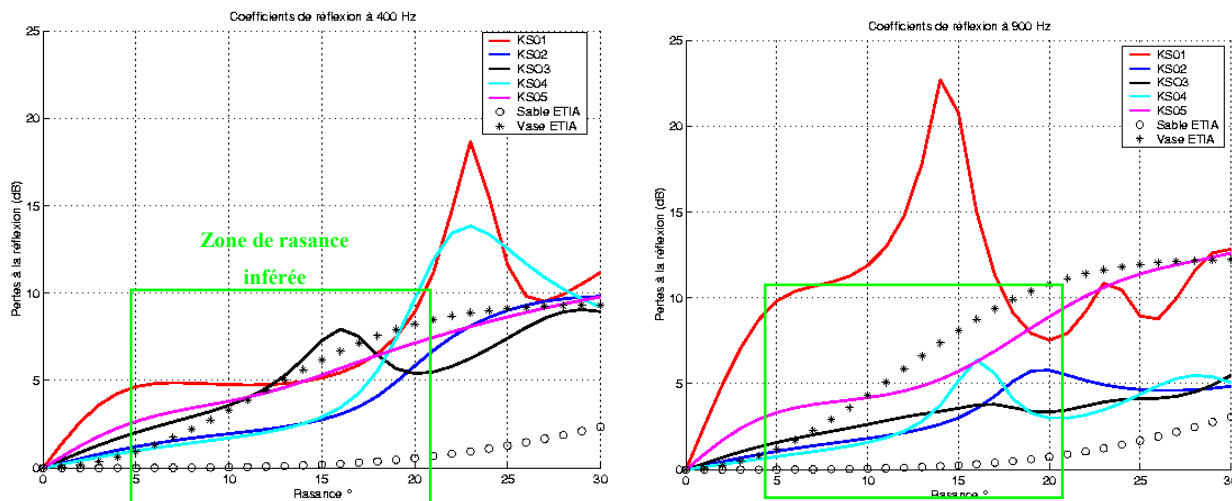


Figure 74 : Coefficients de réflexion à 400 Hz (à gauche) et à 900 Hz (à droite) relatifs aux 5 carottages, ainsi que ceux typiques du sable (P = 0.4) et de la vase (P = 0.8)

Compte tenu des angles de rasance existants (CF Figure 72) en ne considérant que le premier paquet de rayons et des coefficients de réflexion correspondant (CF Figure 74 ), on détermine le long de la radiale le comportement acoustique équivalent. Celui-ci est synthétisé sur la Figure 75.

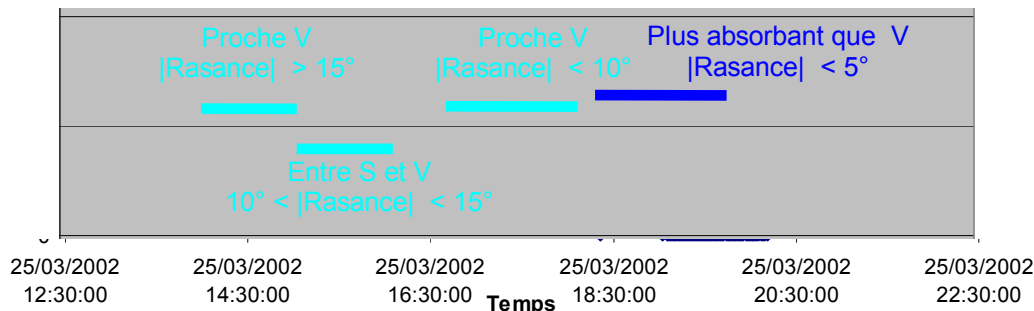


Figure 75 : Comportements acoustiques issus des calculs de réflexion, connaissant la structure de la carotte

Déterminé à partir de la connaissance a priori de la zone et de la configuration géométrique de la mesure, il est à comparer avec les résultats de l'inversion.

6.1.2. Données mesurées de la Radiale R1\_100

La Figure 81 présente l'évolution temporelle de la réponse impulsionnelle mesurée le long de cette radiale. Nous observons tout le long de la radiale la présence d'un premier paquet de rayons très intense, suivi d'un second paquet moins énergétique. A mesure que la distance augmente, de 10 à 50 km, ces paquets se rapprochent.

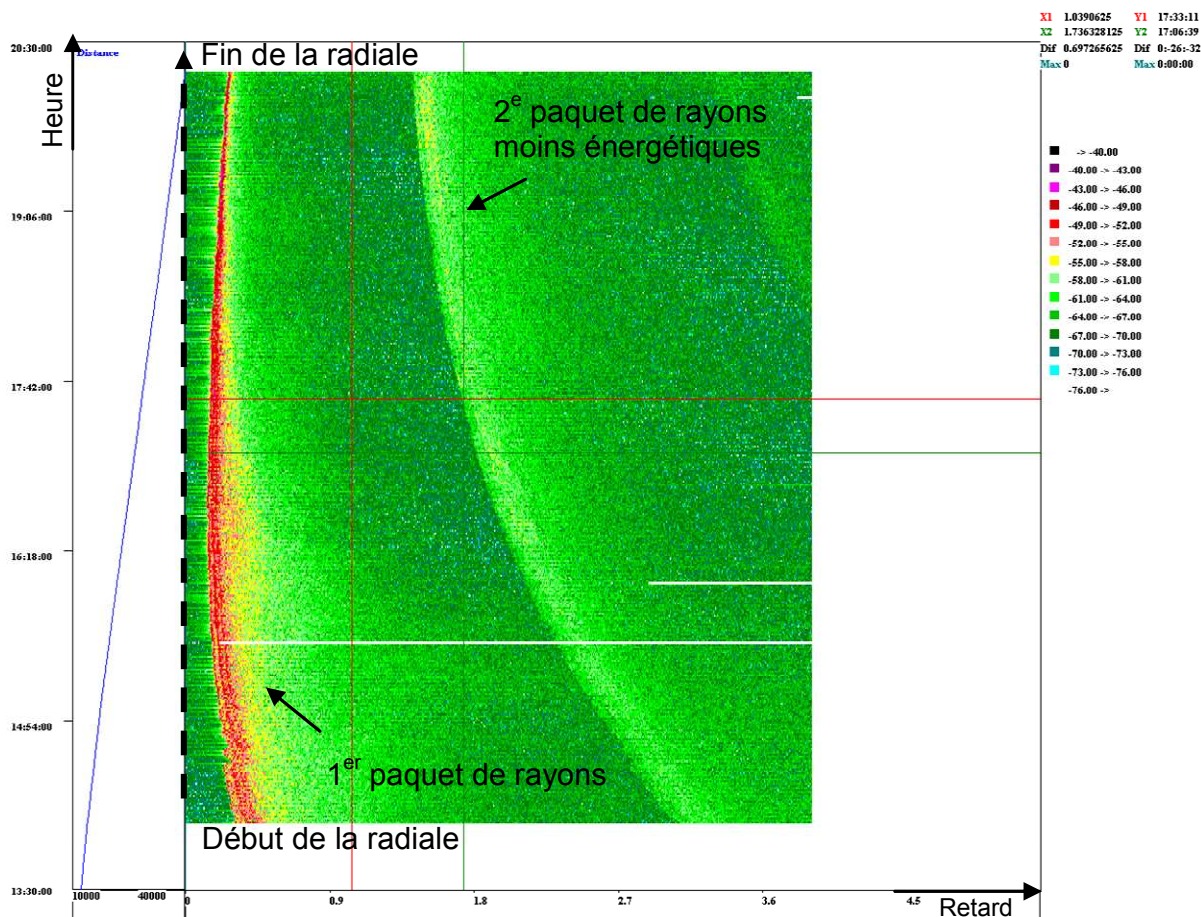
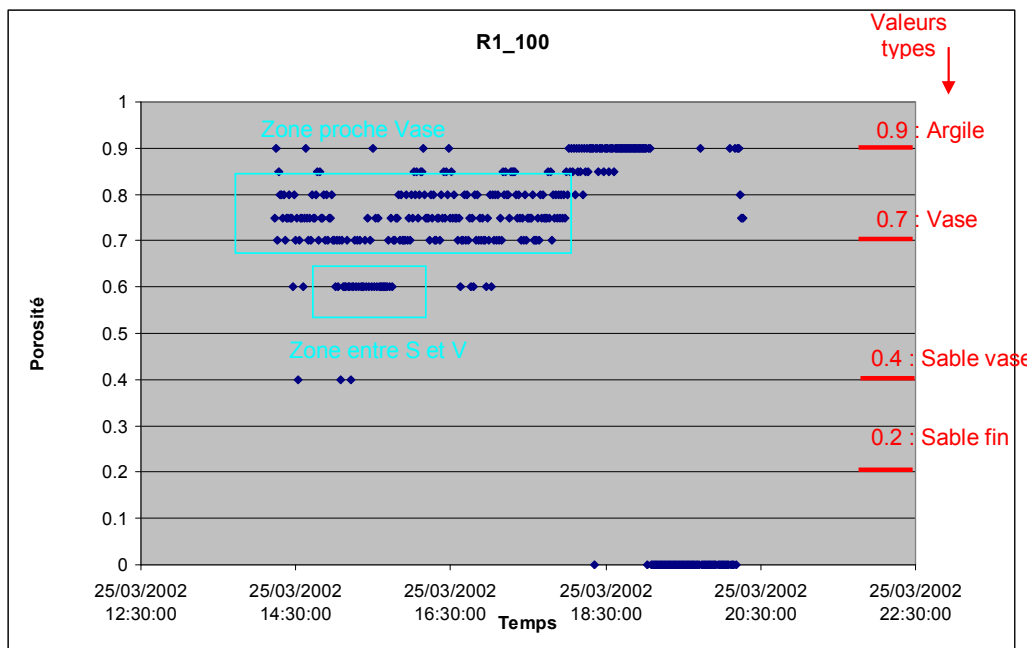


Figure 76 : Evolution temporelle de la réponse impulsionnelle le long de la radiale R1\_100

**6.1.3. Inversion des données de la Radiale R1\_100**

La Figure 77 présente les résultats de la routine d'inversion MIR EE sur les données de la radiale R1\_100. Une zone de comportement acoustique proche de celui de la vase est détectée en début de radiale, suivie d'une zone intermédiaire entre sable et vase. La deuxième partie de la radiale fait état d'un comportement acoustique proche de la vase, voire plus absorbant en fin de la radiale.

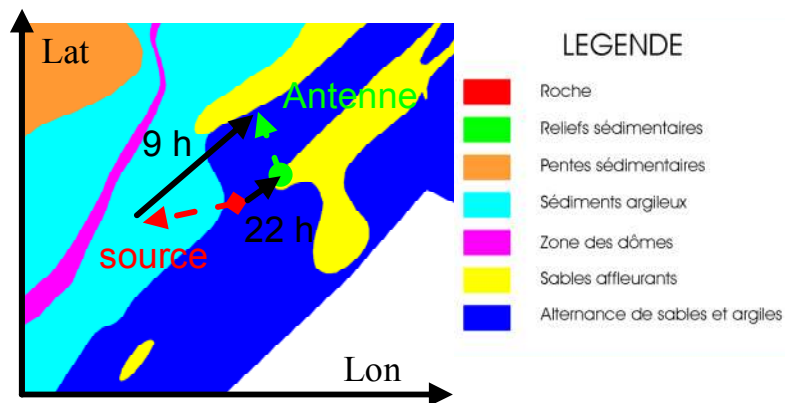


**Figure 77 : Résultats de l'inversion MIR EE couche homogène sur la radiale R1\_100**

Le comportement acoustique équivalent déterminé à partir de la connaissance a priori de la zone (CF Figure 75) est à comparer avec celui déterminé par la routine d'inversion (CF Figure 77). Les résultats sont cohérents. Nous retrouvons les caractéristiques d'une zone assez homogène, de comportement proche de la vase, avec une zone de comportement acoustique entre sable et vase dans le premier tiers de la radiale. Nous retrouvons globalement l'évolution, en fonction de l'angle de rasance, des coefficients de réflexion de la Figure 74.

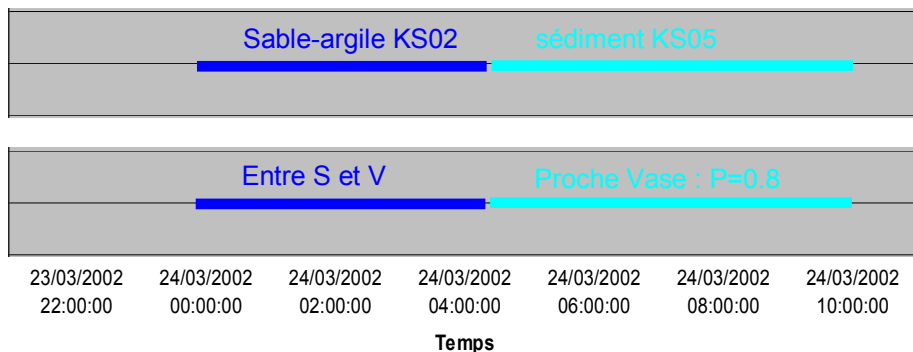
**6.1.4. Inversion des données de la Radiale R2\_100**

De la même façon la Figure 78 présente la trajectoire de la radiale R2\_100 superposée à la connaissance sédimentaire. L’antenne dérive vers de nord ouest de 22 h à 9 h, tandis que pendant ce temps la source s’éloigne de la position initiale vers le sud ouest. Les segments source-antenne sont situés sur une zone homogène au début de la radiale, constituée de sédiment de type KS02. En fin de radiale l’antenne dérivant vers le Nord-Est se retrouve sur un fond de sédiment plus vaseux de type KS05.



**Figure 78 : Résultats de l’inversion MIR EE couche homogène sur la radiale R2\_100**

Nous avons tenté sur la Figure 75 de synthétiser la connaissance sédimentaire dans la zone de réflexion du premier paquet de rayons le long de la radiale. Celle-ci est obtenue pour les angles de rasance relatifs à la configuration de mesure.



**Figure 79 : En haut : Tentative de synthèse de la connaissance sédimentaire le long de la radiale R2\_100. Cette figure décrit l’évolution au cours du temps de la connaissance sédimentaire à mi-radiale  
En dessous : Comportements acoustiques issus des calculs de réflexion, connaissant la structure de la carotte**



La Figure 80 la présente les résultats de la routine d'inversion MIR EE sur les données de la radiale R2\_100. Une zone de comportement acoustique sablo-vaseux est détectée en début de radiale. La deuxième partie de la radiale fait état d'un comportement acoustique proche de la vase, voire plus absorbant en fin de la radiale.

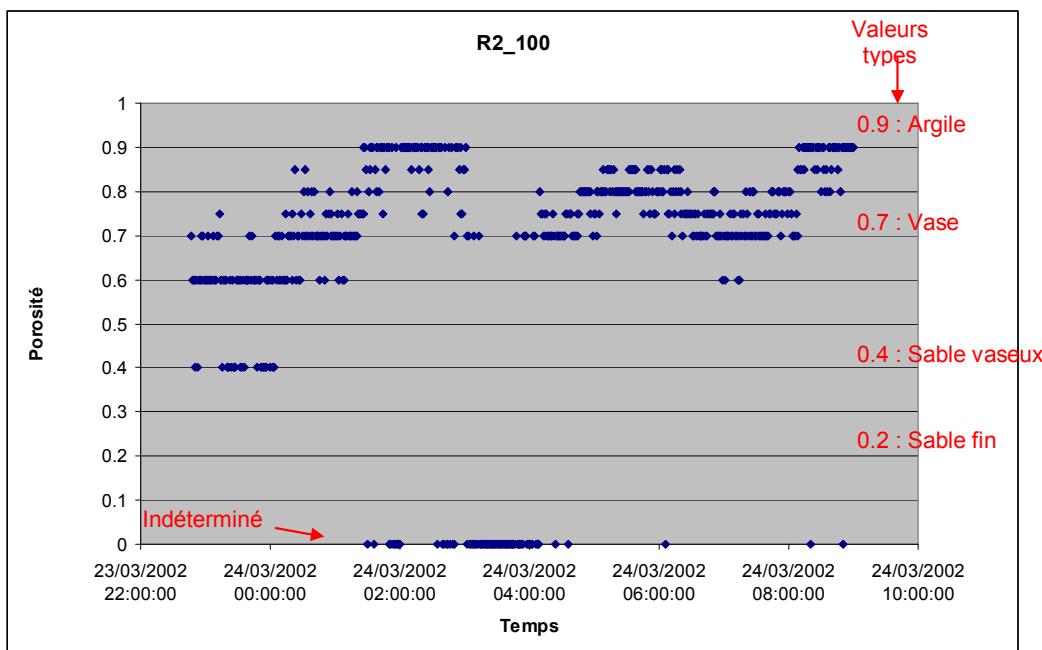


Figure 80 : Résultats de l'inversion MIR EE couche homogène sur la radiale R2\_100

Les comportements acoustiques observés sont cohérents avec l'allure de la connaissance sédimentaire donnée sur la Figure 79.

### 6.1.5. Conclusions

Ces résultats sur les radiales R1 et R2 sont encourageants car ils fournissent des résultats en terme de porosité cohérents avec la vérité terrain. Ils montrent d'autre part la faisabilité d'inverser une campagne et donc plusieurs radiales de mesures dans leur intégralité en temps réel à l'échelle du REA. Si ces résultats sont prometteurs, nous pensons qu'il demeure trop d'approximations dans la méthodologie mise en place pour établir ces résultats. En effet, il est absolument nécessaire de pouvoir tracer de façon automatisée, le lieu de la radiale pour chaque ping, et de pouvoir géoréférencer la position exacte des réflexions sur le fond, puisque le résultat de l'inversion correspond uniquement à cette zone géographique. Ce travail doit pouvoir être établi pour les données réelles et les données de vérité terrain, de telle sorte qu'elles puissent être aisément et précisément comparées.

Si la difficulté de l'inversion était connue, ce paragraphe a permis de montrer la difficulté de synthétiser la masse importante de résultats obtenus.

Avant de poursuivre les interprétations des résultats de l'inversion sur des données réelles, nous avons amélioré la méthode d'inversion au travers du développement de la méthode de synthèse par MNT. Ces travaux permettent de connaître et de gérer la position des lieux d'impact des rayons et de situer l'information inversée sur une carte en 2D (Latitude, Longitude).

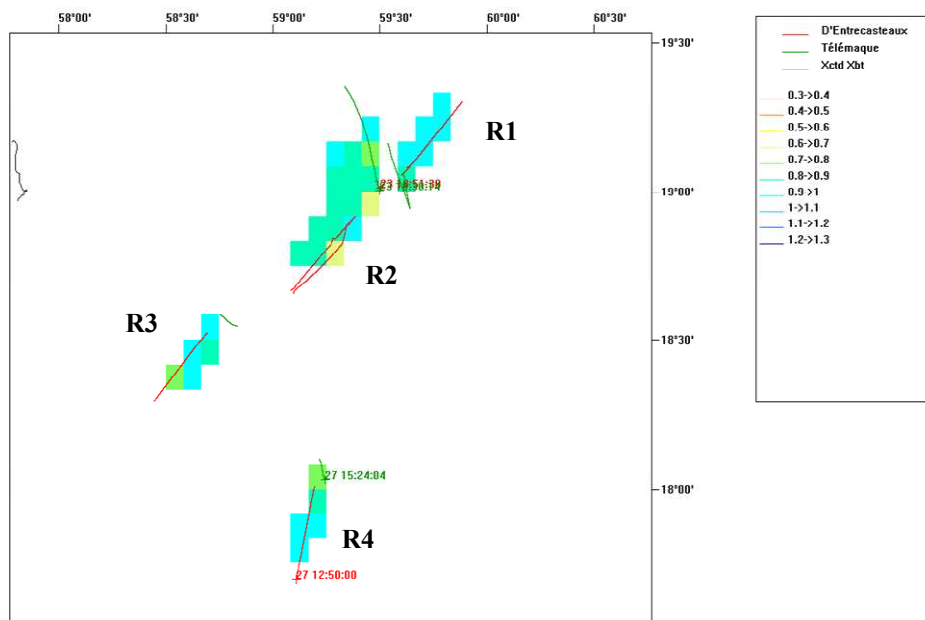
D'autre part la méthode MIR EE est moins intéressante scientifiquement que la méthode MIR Simplex car elle ne permet de prendre en compte qu'un espace restreint de paramètres et travaille sous l'hypothèse de couche homogène. Elle a surtout servi à mettre au point les automatismes de traitement, qui sont ensuite déclinés avec la méthode MIR Simplex. Cette dernière est plus intéressante car elle peut gérer un plus grand nombre de cas et donc travailler en milieu évolutif. C'est l'objet des paragraphes suivants.

## 6.2. Résultats de l'inversion de données réelles avec la méthode MIR Simplex

La méthode MIR Simplex a été utilisée sur l'ensemble des radiales de la campagne avec des pas de 5 Nm et de 1 Nm.

### 6.2.1. Inversion de toutes les radiales avec une maille de 5 Nm

La Figure 81 présente les valeurs de porosité trouvées par le MIR Simplex pour un MNT de maille élémentaire de 5 Nm. L'inversion des données de chaque radiale est programmée pour stocker aux lieux d'impact des rayons les valeurs de porosités observées. Celles-ci sont ensuite moyennées dans chaque maille. Un code de couleurs permet de représenter la valeur moyennée. Cette figure représente la synthèse des résultats d'une campagne de REA acoustique type. Compte tenu du déplacement des senseurs durant les 12 h que dure une radiale, les mailles renseignées définissent une surface que permet d'appréhender immédiatement ce type de graphe.



**Figure 81 : Synthèse des résultats obtenus par inversion MIR Simplex sur l'ensemble de la campagne HERACLES. Présentation de la valeur moyennée de la porosité inversée pour chaque maille de 5 Nm. Les 4 radiales de 12 h de mesures environ chacune, sont traitées dans leur intégralité.**

Les valeurs de la porosité font état de zones homogènes de porosité comprises entre 0.6 et 0.9, et dont les valeurs sont essentiellement localisées entre 0.7 et 0.8. On ne décèle pas vraiment de transition horizontale, ni de valeurs bien distinctes entre les radiales R1, R2, R3 et R4.

La méthode d'inversion conclue que le fond est homogène de porosité moyenne 0.75.

Dans la mesure où les inversions sont réalisées avec les signaux utilisant toute la bande fréquentielle (de 300 Hz à 1 kHz), il est normal d'obtenir un milieu « moyen » équivalent sur l'ensemble de la bande de fréquences.

La comparaison entre les valeurs fournies par la méthode d'inversion et les informations disponibles sur le sédiment est délicate, en raison de la nature de la connaissance in-situ. La Figure 82 présente la superposition de deux types d'informations :

- la cartographie 2D (CF) représentant la connaissance sédimentaire établie à partir de levés au sondeur de sédiment sur des radiales de la zone et des 5 carottages (KS).
- La cartographie du MNT 2D en surimpression.

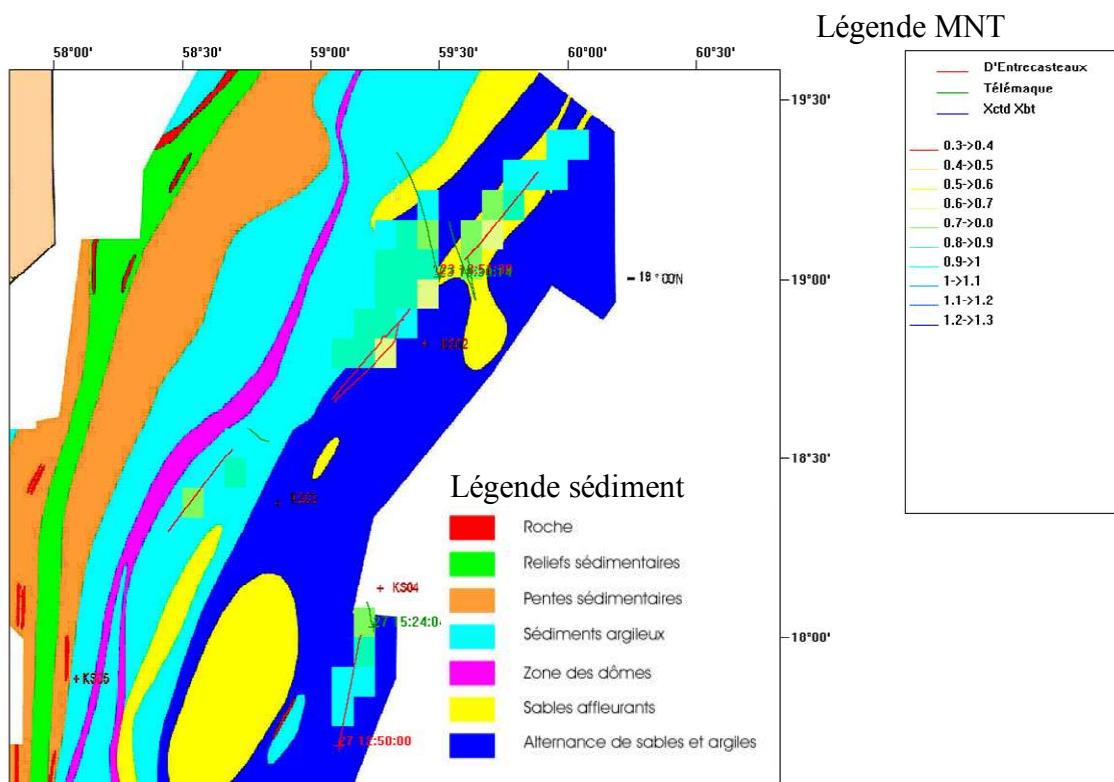


Figure 82 : Superposition des résultats obtenus par inversion MIR Simplex (Légende MNT) et Connaissance sédimentaire (Légende sédiment)

Globalement les connaissances sédimentaires laissent attendre les comportements suivants :

Sur R1	KS01	Comportement plus absorbant que la vase, donc porosité supérieure à 0.8
Sur R2	KS02 et KS04	Comportement intermédiaire entre Sable (0.4) et Vase (0.8)
Sur R3	KS05	Comportement proche de celui de la vase (0.8)
Sur R4	KS03	Comportement proche de la vase (0.8) à 400 Hz ; entre S et V à 900 Hz

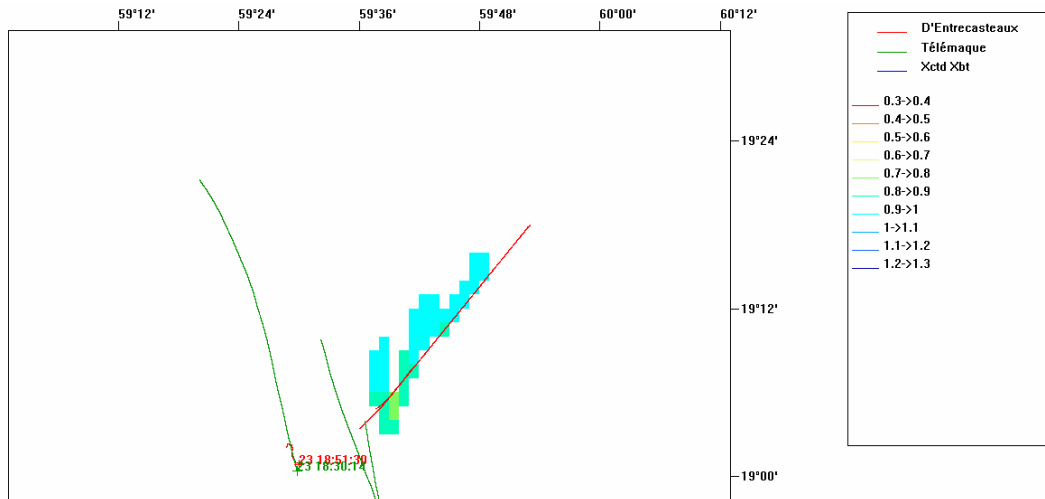
La comparaison entre la connaissance et les résultats de l'inversion est synthétisée dans le tableau ci-dessous et montre un décalage, avec des porosités « inversées » plus élevées qu'en réalité :

Radiale	Connaissance	Inversion
R1	$P > 0.8$	0.9
R2	$0.4 < P < 0.8$	0.8
R3	$P \neq 0.8$	0.9 à 0.7
R4	$P \neq 0.7$	0.7 à 0.9

Figure 83 : Comparaison globale des résultats obtenus par inversion MIR Simplex - Maille 5 Nm et de la connaissance sédimentaire

**6.2.2. Inversion de la radiale R1 avec une maille de 1 Nm**

Afin de chercher à mieux appréhender le problème, nous avons conduit les calculs sur la radiale R1 avec un MNT plus précis. La Figure 84 présente les résultats de l’inversion dans le cas d’une maille de 1 Nm de coté. On observe bien évidemment une plus grande finesse de résolution de la cartographie.



**Figure 84 : Synthèse des résultats obtenus par inversion MIR Simplex - Maille 1 Nm – R1**

Les détails apportés ne mettent pas en évidence une différenciation de zones sédimentaires distinctes. La zone est homogène et un début de détection de rupture horizontale du milieu sédimentaire est observable au sud de la radiale R1.

Toutefois cette finesse pose alors le problème de la finesse de résolution de la vérité terrain. En effet la cartographie 2D de la connaissance sédimentaire a été obtenue à partir de quelques radiales de sondeur de sédiment, et les carottages sont peu nombreux pour calibrer l’ensemble des mesures sur cette zone. Si nous trouvons globalement des ordres de grandeur réalistes de la porosité, il ne nous est pas possible cette fois de pousser plus loin la comparaison, la méthode inverse fournissant des informations bien plus résolvente que la mesure directe. Il faudrait améliorer la connaissance de la vérité terrain pour qualifier les performances de la méthode d’inversion en terme de précision.

Afin de qualifier les performances de la méthode d’inversion en terme de répétitivité nous procédons à une analyse statistique des données inversées dans chaque maille. La Figure 85 présente une cartographie fausses couleurs du nombre de valeurs de porosité inversées dans chaque maille.

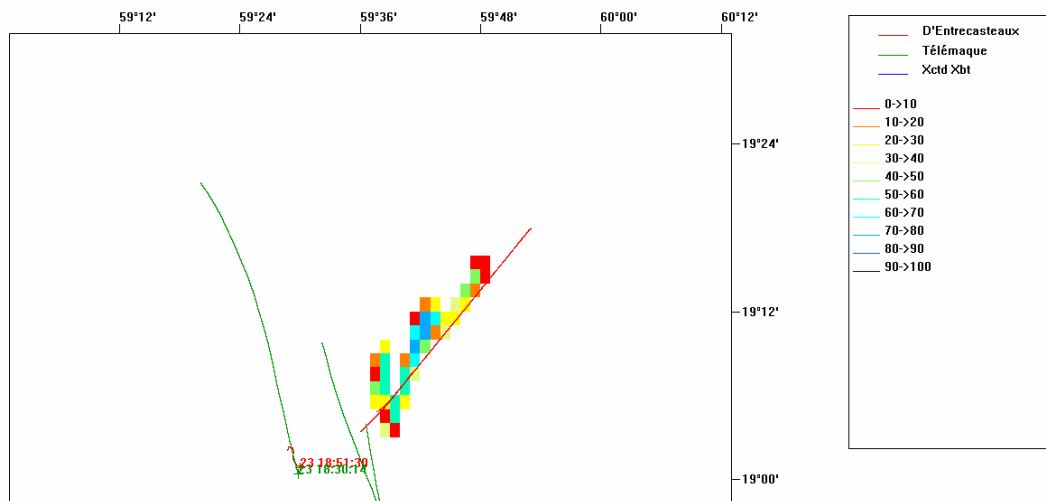


Figure 85 : Nombre de valeurs de porosité déterminées dans chaque maille – R1

Le nombre de valeurs de porosité calculées pour chaque maille est supérieur à 30 dans la majorité des mailles, montrant que la donnée est disponible sur toute la radiale. Le nombre de données est plus faible en début et fin de radiale, et plus élevé au centre, ce qui est raisonnable.

La Figure 86 présente une cartographie fausses couleurs des écarts types des valeurs de porosité inversées dans chaque maille.

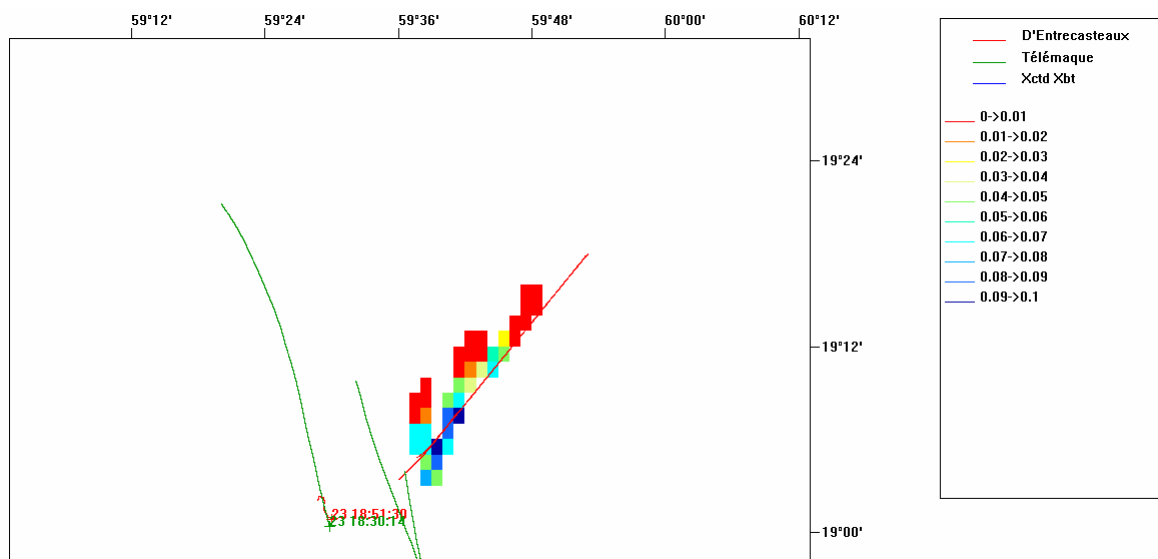


Figure 86 : Ecart types des valeurs de porosité dans chaque maille – R1

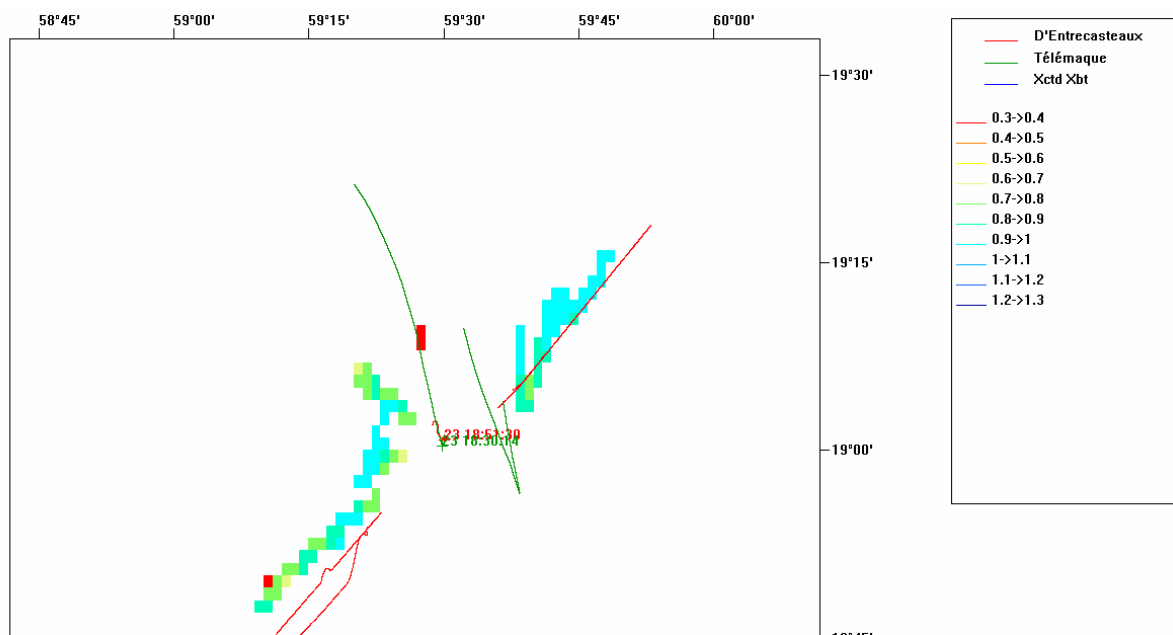
L'écart type est faible. Nous pensons donc que cette zone, hormis au sud, est homogène.

La prise en compte d'un MNT de maille carrée de 1 m de côté est intéressante d'un point de vue faisabilité et temps de calcul. En effet, les temps de calcul restent du même ordre de grandeur, soulignant la puissance de la méthode MIR Simplex. Ce gain considérable de précision n'a toutefois pas permis dans ce cas de réduire ni d'expliquer le décalage entre les valeurs de porosité issues des mesures et de la vérité terrain. Nous concluons donc que les résultats montrent des zones homogènes de comportement proche de la vase mais de porosité légèrement supérieure à celle attendue. Toutefois nous n'observons pas d'anomalie dans les valeurs de porosité obtenues, et ce d'autant plus qu'il n'y a pas de corrélation d'un ping à l'autre dans la méthode d'inversion.

**6.2.3. MIR Simplex – Maille 1 Nm – Radiales R1 et R2 – 3 réflexions**

Enfin, dans ce dernier paragraphe nous présentons les résultats de la méthode MIR Simplex obtenus sur les radiales R1 et R2 en ne conservant que les trajets ne se réfléchissant moins de quatre fois sur la surface ou le fond. Compte tenu de la géométrie des trajets cette condition revient à réaliser un pseudo filtrage angulaire. Dans ce cas on s’affranchit des rayons plus pentus heurtant trop souvent le fond, et pour lesquels plusieurs solutions sont possibles pour la porosité, le Simplex ne sachant choisir.

La Figure 87 présente les résultats de l’inversion des radiales R1 et R2 en ne conservant que les rayons propres ayant moins de quatre réflexions surface ou fond et dans le cas d’une maille de 1 Nm de coté.



**Figure 87 : Synthèse des résultats obtenus par inversion MIR Simplex - Maille 1 Nm – R1 et R2**

De la même façon que précédemment la finesse des résultats est telle qu’elle dépasse celle de la connaissance du terrain et pour pouvoir analyser la précision de la méthode d’inversion par comparaison données terrain et données inversées il faudrait mieux connaître les premières. Là encore nous ne détectons pas d’anomalie sur les résultats de l’inversion et les ordres de grandeurs des valeurs inversées sont raisonnables.

Ce traitement de pseudo-filtrage angulaire ne semble pas apporter d’amélioration complémentaire.

La Figure 88 montre que le nombre de valeurs de porosité déterminées dans chaque maille reste typiquement supérieur à 30. De plus (CF Figure 89) l’écart type des valeurs reste faible, notamment pour la radiale R2. Les porosités retrouvées restent comprises typiquement entre 0.7 et 0.9, définissant un milieu homogène vaseux. Ces cartographies donnent une idée de la densité d’information opérationnellement accessible en REA par ce type de méthode inverse.

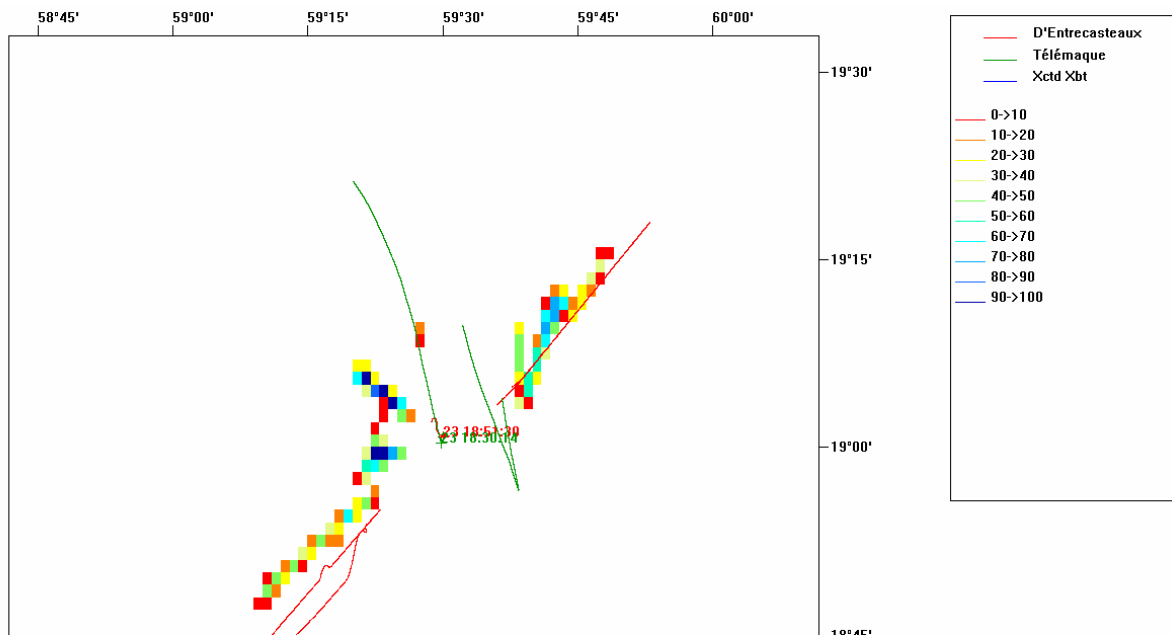


Figure 88 : Nombre de valeurs de porosité déterminées dans chaque maille – R1 et R2

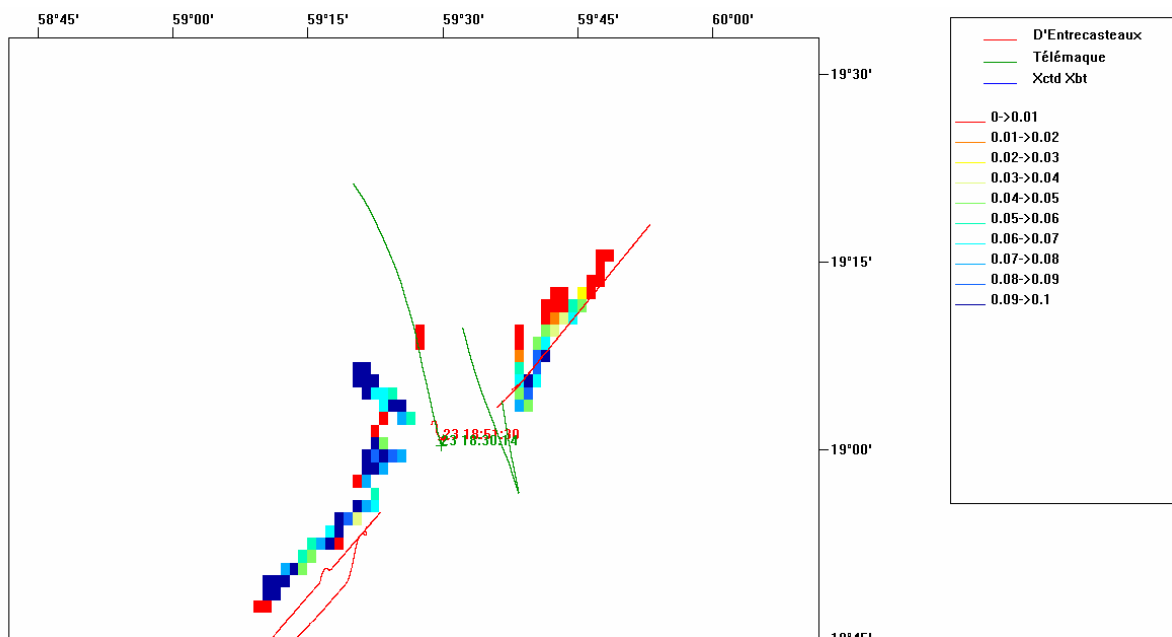


Figure 89 : Ecarts types des valeurs de porosité dans chaque maille – R1 et R2



### 6.3. Conclusions des essais d'inversion sur données réelles

---

Les méthodes d'inversion développées ont été testées sur l'intégralité du jeu de données réelles d'une campagne type. La **rapidité** de la méthode développée a été qualifiée et les temps de calcul requis sont de l'ordre de la durée d'acquisition des signaux et respectent largement la contrainte temps-réel à l'échelle du REA.

En terme de **précision**, les valeurs de la porosité obtenues globalement par l'inversion se situent entre 0.7 et 1, et semblent « translatées » par rapport à celles attendues, qui seraient localisés entre 0.4 et 0.8. Nous avons tout d'abord attribué ce décalage à une sous-estimation dans les simulations, de l'amortissement dû à la surface ; en effet les simulations ont été réalisées avec une vitesse de vent nulle alors qu'il y avait certainement un peu de vent sur zone. Cependant les travaux sur données synthétiques ont finalement montré que cet écart est plus probablement à imputer à l'effet Doppler. Quand la vitesse relative entre la source et le récepteur est trop élevée, celui-ci distord les signaux qui ressemblent moins au signal émis. Les sorties de filtrage adapté ont alors un niveau plus faible que les simulations. La routine d'inversion, dont le rôle est d'ajuster la porosité pour que les simulations ressemblent le plus aux mesures, diminue le niveau des simulations en augmentant la valeur de la porosité. En raison de l'effet Doppler il apparaît donc que les données in-situ disponibles ne permettent pas d'appliquer correctement ces méthodes. Cette étape constitue un résultat majeur de cette étude puisque nous avons mis en place et utilisé un outil permettant d'étudier les limites du compromis gain de traitement BTlié à la durée des signaux/ perte par déformation des signaux sur une grande durée.

Une analyse plus locale met en évidence la supériorité de la méthode d'inversion en terme de finesse de résolution. En effet nous avons montré que la méthode d'inversion converge et donc permet de renseigner sur des mailles de 1 Nm. La **résolution** de la méthode d'inversion est telle qu'elle dépasse celle de la connaissance du terrain actuelle fournie par mesure in-situ (sondeur de sédiment) et que pour pouvoir analyser la **précision** de la méthode d'inversion par comparaison données terrain et données inversées, il faudrait mieux connaître ces premières. L'analyse statistique des données inversées dans chaque maille permet de qualifier et de souligner la bonne **répétitivité** de la méthode.

L'approche multicapteur a permis de renseigner sur la **stabilité** de la méthode d'inversion. Cette approche prend son intérêt dans le fait que certains trajets sont parfois amenés à disparaître sur les hydrophones de surface par exemple. Par contre elle est disponible sur les capteurs plus profonds. Dans ce cas, la méthode multicapteur continue d'inverser.

Notons enfin que ces résultats ont été obtenus en aveugle, sans se soucier de la nature réelle des sédiments en place. C'est seulement en phase finale du développement de la méthode d'inversion MIR Simplex que les données ont été comparées à la vérité terrain. Il était en effet essentiel de garder l'indépendance de la méthode par rapport à la donnée terrain. De la même façon, on a gardé à l'esprit dans cette étude un concept de développement opérationnel (en particulier pour les simulations temps réel, le MNT...) car l'objectif majeur de cette étude visait à mettre en évidence certains aspects à prendre en compte dans les spécifications des systèmes futurs.

## Chapitre 7 Conclusions. Perspectives.

### 7.1. Résumé des résultats

---

Nous avons présenté dans ce mémoire une méthode globale d'inversion géoacoustique large bande par grands fonds basée sur l'ajustement des réponses impulsionnelles mesurées et simulées (méthode de type MIR). Nous avons ainsi repris l'approche large bande prometteuse actuellement utilisée dans la communauté scientifique et l'avons adaptée au cas des grands fonds pour lequel il n'existe pas actuellement de méthode puisque la problématique du REA justifiant ces travaux est assez récente. Toutefois nous ne nous focalisons pas uniquement sur le processus d'inversion, mais sur la démarche globale, visant à traiter l'intégralité du problème de l'inversion sur une campagne de mesures. La démarche employée a donc consisté dans un premier temps à automatiser l'ensemble de la procédure d'inversion tout en gardant à l'esprit la contrainte de temps réel, ce qui a ensuite permis d'utiliser l'outil développé pour inverser les séquences de données présentant un intérêt particulier, et d'évaluer ainsi les capacités opérationnelles de ce type de méthodes. La méthode développée permet de traiter le cas des grands fonds dans un milieu variable avec la distance, à la fois en célérité et en nature du fond. Inversant simultanément les mesures effectuées sur plusieurs capteurs, elle permet aussi d'analyser l'apport de la fusion multicapteur. La méthode globale d'inversion que nous développons répond donc à l'ensemble des voies d'approfondissement proposées dans la thèse récente de JC Le Gac effectuée au CMO et à laquelle cette thèse fait suite [Le Gac 2003].

L'automatisation de l'ensemble de la procédure est réalisée au travers d'un traitement ping à ping, de la gestion de la propagation au sein même du processus d'inversion, et de la gestion hiérarchisée des données mesurées. Les problèmes de la méconnaissance des paramètres géométriques et des paramètres géoacoustiques du fond

sont traités séparément et nous avons développé deux procédures d'inversion indirectes, comprenant chacune deux modules successifs d'inversion visant à retrouver d'une part la configuration expérimentale puis ensuite la nature du fond. Cette dernière est caractérisable par un fond fluide monocouche décrit par sa porosité ou encore par son triplet célérité-atténuation-densité. Elle fonctionne aussi pour un fond multicouche fluide.

La première méthode d'inversion développée, MIR EE, est de type recherche exhaustive. Très simple et robuste, car elle explore exhaustivement un espace très restreint de paramètres. De ce fait sa simplicité a permis de l'utiliser pour développer le prototype d'automate d'inversion. Sa robustesse fait qu'elle a ensuite servi de référence au développement d'une méthode heuristique plus évoluée de type MIR Simplex, pour laquelle un schéma numérique de type Downhill Simplex explore intelligemment l'espace, plus vaste cette fois, des paramètres.

Les méthodes d'inversion ont été testées avec succès sur des données synthétiques complexes, élaborées à partir d'un simulateur temps réel de la propagation acoustique. Ces essais sur données synthétiques ont permis de valider la faisabilité de la méthode quant à ses performances de détection d'une transition horizontale de la porosité, et en terme de respect de la contrainte opérationnelle du délai d'estimation.

D'autre part, les méthodes d'inversion ont été testées sur l'intégralité du jeu de données réelles d'une campagne type. Les valeurs de la porosité obtenues par l'inversion sont légèrement surestimées par rapport à celles attendues. Les travaux sur données synthétiques ont permis d'expliquer les écarts observés entre les données mesurées et les données de vérité terrain et ont finalement montré que cet écart est à imputer à l'effet Doppler et ceci constitue un résultat majeur de cette étude. Quand la vitesse relative entre la source et le récepteur est trop élevée, celui-ci distord les signaux qui ressemblent moins au signal émis. Les sorties de filtrage adapté ont alors un niveau plus faible que les simulations. La routine d'inversion, dont le rôle est d'ajuster la porosité pour que les simulations ressemblent le plus aux mesures, diminue le niveau des simulations en augmentant la valeur de la porosité. En raison de l'effet Doppler il apparaît donc que les données in-situ disponibles ne permettent pas d'appliquer correctement ces méthodes. Cette étude fournit de plus une évaluation de la déformation des signaux après filtrage adapté pour une vitesse nominale de déplacement relatif source-récepteurs et en fonction de la durée des signaux. Ces renseignements sont utiles pour les spécifications des systèmes futurs de REA.

Les temps de calcul requis sont de l'ordre de la durée d'acquisition des signaux et respectent largement la contrainte temps-réel à l'échelle du REA.

Nos objectifs dans cette étude étaient, dans un ordre de priorité décroissant, les suivants :

- valider la faisabilité du traitement global ainsi que les contraintes en temps de calcul,
- vérifier la capacité à retrouver la valeur correcte de la porosité sur une zone homogène connue, c'est-à-dire typiquement de retrouver que deux radiales différentes d'une campagne d'essais sont homogènes et admettent des valeurs différentes de la porosité, et
- comparer les données obtenues avec les données initiales issues du guide METOC afin de qualifier l'apport de la méthode.

Ils ont été atteints dans la mesure où les méthodes permettant de traiter ces points ont été mises en place et validées sur données synthétiques et sur l'intégralité du jeu de données réelles d'une campagne type.

## 7.2. Synthèse des résultats

Les résultats obtenus dans cette étude sont synthétisés dans le tableau ci-après pour chaque domaine concerné. On y indique leur originalité et leurs apports dans le domaine du REA.

Domaine	Originalité des travaux	Apports dans le domaine du REA	Perspectives
<b>Informatique</b>	Complexité des traitements Gestion de la masse de données Temps de calcul très longs Passage du système 32 bits au système 64 bits	Montrent que la gestion du temps de calcul et la contrainte du temps réel sont réalisables	Multi-threading Séquenceur 4S STEREO
	Mise en place d'une maquette logicielle	A permis de pouvoir visualiser et analyser les résultats	
	Gestion d'un MNT	A montré la possibilité d'établir une carte de synthèse 2D des résultats A permis de synthétiser les résultats obtenus	
<b>Simulations de la propagation</b>	Génération de données synthétiques réalistes	A permis de tester la méthode d'inversion dans sa globalité	Utilisation de la modélisation $C, \alpha, \rho$ mono et multicouche
	Usage d'un module de propagation temps réel	A permis de mettre en évidence du problème lié au Doppler, cause principale de la non applicabilité de la méthode aux données de la campagne HERACLES	
<b>Méthode d'inversion</b>	Plusieurs routines d'inversion imbriquées Position des engins Densité spectrale de la source Plusieurs méthodes d'exploration des solutions	A permis d'obtenir des performances correctes pour l'inversion (Précision et rapidité)	Relaxation & assimilation Pénalisation Recuit simulé Model based
<b>Méthode globale</b>	Gestion des automatismes	A permis de démontrer la faisabilité du traitement automatisé temps-réel	Filtrage angulaire Tests et essais sur un jeu de données avec vérité terrain affinée
	Les travaux réalisés ont permis d'inverser les données réelles relatives aux 4 radiales	A permis de montrer la faisabilité de l'analyse de l'ensemble d'une campagne	
	Inversion de tous les hydrophones	A permis de montrer la faisabilité de l'analyse de la fusion multicapteur	
<b>Mesures</b>	<i>Travaux de EPSHOM/CMO : Réalisation d'une campagne complète (4 radiales) avec données de grande qualité</i>	<i>Travaux de EPSHOM/CMO : Démonstration de la faisabilité d'une campagne de REA acoustique</i>	Signaux plus courts

Les apports majeurs résident tout d'abord dans les travaux sur les données synthétiques qui ont permis de tester la méthode d'inversion dans sa globalité et de mettre en évidence les problèmes liés à l'effet Doppler. Ces travaux ont d'autre part permis de proposer une méthode d'inversion dans des configurations grands fonds, non traités actuellement et pour lesquelles peu d'informations inversibles sont disponibles. Enfin, la faisabilité de l'inversion en temps réel de l'ensemble des données réelles d'une campagne type de REA a été démontrée et les performances de la méthode développée ont été qualifiées en terme de précision, résolution, stabilité, répétitivité, et rapidité. Ces travaux permettent donc de fournir des enseignements importants et utiles au développement du prototype de REA.

Les écarts observés entre les données mesurés et les données de vérité terrain sont imputables à l'effet Doppler, à la difficulté de traiter le problème par grands fonds de faible contenu informatif, mais aussi et surtout au fait que nous ne cherchons pas une méthode d'inversion spécifiquement adaptée au jeu de données disponibles. En effet notre but n'est pas de définir la méthode optimale pour ces données, mais de les utiliser pour définir et tester une approche générale pour les systèmes, basée sur l'optimisation et l'automatisation des traitements.

Notre démarche consiste à définir une approche générale d'inversion de données, puis à implémenter et appliquer cette démarche sur un jeu de données disponibles, avec de fortes contraintes de temps réel et de faible contenu informatif. Les résultats sont analysés et la faisabilité d'un usage en contexte opérationnel est démontrée. Des pistes d'amélioration sont ensuite définies afin d'améliorer la qualité de l'inversion.

### 7.3. Conclusions - Perspectives

---

La nouveauté de ces travaux réside dans la thématique plus que dans les méthodes employées. Le problème de l'inversion des données acoustiques d'une radiale est traité ici dans son intégralité, en utilisant des méthodes valables et utilisées jusqu'à présent uniquement par petits fonds.

La difficulté majeure résulte de la complexité de gestion de l'ensemble des données en vue de l'inversion. La démarche employée a consisté dans un premier temps à résoudre le problème de l'automatisation de l'ensemble de la procédure d'inversion. Celle-ci n'est pas totale, mais le pourcentage de procédures automatisées a ensuite permis d'utiliser l'outil développé pour inverser les séquences de données présentant un intérêt particulier.

Certaines difficultés n'avaient pas été estimées au préalable, et cette étude a fait état de travaux supplémentaires non prévus initialement. En particulier un important travail a été conduit relativement à l'analyse de l'effet Doppler sur des données synthétiques et son impact sur les performances de la méthode d'inversion. Ce travail valide l'intérêt de l'utilisation d'un module de simulation temps réel du signal propagé permettant de rendre compte de l'effet Doppler sur les signaux et de quantifier son impact sur un système de REA acoustique. On a pu ainsi comprendre pourquoi l'inversion des données de la campagne HERACLES n'a pas pu fonctionner parfaitement, et dégager des configurations de simulations pour lesquelles l'inversion peut fonctionner, ce qui valorise le principe de la méthode développée et les développements réalisés.

Cette étude a permis de dégager un certain nombre d'améliorations et de traitements qu'il serait à présent intéressant de mettre en place pour compléter cette étude.

La routine d'inversion ayant été mise en place et son fonctionnement validé, il serait intéressant d'analyser les améliorations potentielles des procédés suivants:

- **Relaxation & assimilation** : Ce traitement consiste par exemple à forcer la routine d'inversion à traiter en premier les rayons relatifs au premier pic de la réponse impulsionnelle. Cela revient à faire de l'identification (obligation de ne traiter que le 1<sup>er</sup> pic de la RI, puis le second) et ce traitement est facilement automatisable par rapport à une extraction automatique des pics sur suivi temporel recalé de la RI. La connaissance obtenue lors de l'inversion du premier paquet de la RI, est ensuite assimilée et est utilisée pour inverser le second paquet.
- **Pénalisation** : Ce traitement consiste par exemple à
  - Limiter la pente de variation horizontale de la porosité entre mailles adjacentes
  - Attribuer moins de crédit aux rayons qui se sont réfléchis sur la surface et à ceux qui sont dans le bruit
  - Attribuer plus de crédit aux trajets qui n'ont d'interactions qu'avec le fond
- **Recuit simulé** :  
Cette méthode consiste à prendre les porosités trouvées après l'inversion, les perturber, relancer l'inversion, et comparer les 2 séries de valeurs obtenues ; elle a pour but de tester la stabilité de la solution trouvée (quenching)

De même, il serait intéressant de re-tester la méthode d'inversion sur un jeu de données moins sujet à l'effet Doppler. Les données de la campagne INTIMATE obtenues par grands fonds sont appropriées ; en effet le Doppler y est moins pénalisant compte tenu de la durée des signaux utilisés dans cette campagne.

D'autre part, la méthode de génération des données synthétiques en utilisant une modélisation temps-réel ayant été mise au point et validée, il serait intéressant de poursuivre l'analyse de l'inversion de données synthétiques afin de quantifier les performances de la méthode d'inversion en dimensionnant la taille minimale de l'inclusion sédimentaire que la méthode est capable de détecter, et l'écart de porosité détectable.

Enfin, l'analyse de traitement particulier, comme le Model based peut s'avérer intéressante. Théoriquement ce traitement permet d'augmenter la courbure de la fonction de coût au voisinage de la solution. [Hermand 1995] [Hermand et Roderick, 1993].

---

## Références

[Altes 1970] R.A. Altes. Methods of wideband signal design for Radar and Sonar environment. Ph. Doct. Thèse Uni. Rochester 1970.

[Arzelies et al 1987]. P. Arzelies, Farcy, ME. Bouhier, Corgiatti, M. Zakharia, C. Audric. Système de navigation base longue à traitement cohérent. 3ième Colloque sur la localisation en mer, Rueuil Malmaison, 1987.

[Beckmann 1963] P. Beckmann - A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surface. Pergamon Press N.Y. 1963.

[Bouhier 1986] M.E Bouhier: Thèse de docteur ingénieur :Amélioration des performances en portée et en précision de localisation angulaire des systèmes de navigation sous-marine . INPG 1986.

[Brekhovskikh –Godin 1992] L.M. Brekhovskikh, OA godin. Acoustics of layered media 2 : Point sources and bounded beams. Springer Verlag. Berlin 1992

[Caiti – Jesus 1996] A. Caiti & S. Jesus. Acoustic estimation of seafloor parameters: A radial basis functions approach. J. Acoust. Soc. Am. 100 (3), September 1996.

[Caiti et al 1996] A. Caiti, S.M. Jesus & Å. Kristensen. Geoacoustic seafloor exploration with a towed array in a shallow water area of the strait of Sicily. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 21, No 4, October 1996.

[Crouzeix-Mignot 1984] M.Crouzeix et A. Mignot. Analyse numérique des équations différentielles. Editions Masson Paris 1984.

[CTSN 1995] Recueil de modèles (version N°2) – Thème : Propagation, Rapport Technique des systèmes navals N°2074/CTSN/DLSM, 1995.

- [Demoulin et al 2000] X. Demoulin, L. Pélissero, Y. Stéphan, S. Jesus, M. Porter, E. Coelho, "Estimating equivalent bottom geoacoustic parameters from broadband inversion", Proc. of the Fifth European Conference on Underwater Acoustics, Vol. I, pp 191-196, ECC, 2000
- [Etter 1996] P.C.Etter, "Underwater acoustic modeling," 2nd edition. E&FN SPON. 1996.
- [Granvaux 1985] B Granvaux – JL Nicolas – M Semillon. Théorie et applications de l'acoustique sous-marine. Tome 1 : acoustique sous-marine. Cours de l'Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées. Paris 1985.
- [Hall – Watson 1967] H.R. Hall, W.H. Watson, "An empirical bottom reflection loss expression for use in sonar range prediction". NUWC, Tech. 1967.
- [Hermand 1995] J.P. Hermand. "Model based matched filter processing : a broadband approach to shallow water inversion". In full field inversion methods in Ocean and Seismo Acoustics, O. diachok et al (eds). Kluwer Academic publishers (Nethrlands), 189-194. 1995
- [Hermand 1999] J.-P. Hermand. Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone: Theory and experimental results. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24, No 1, January 1999.
- [Hermand et Roderick, 1993] J.P. Hermand, Roderick. "Acoustic model based matched filter – Processing for fading time-dispersive ocean channels : theory and experiment", IEEE J.Ocean.Eng. 18, N°4, 447-465. 1993
- [Jensen et al 1994] F.B.Jensen, WA Kuperman, MB Porter, H Schmidt. Computational ocean acoustics, AIP series in modern acoustics and signal processing. New York 1994.
- [Kunt 1980] M. Kunt. Traitement numérique des signaux. Traité d'électricité de l'école polytechnique fédérale de Lausanne. Editions Georgi. 1980
- [Lapierre et al 2001] G Lapierre, C Lebrun, C Viala. TALISMAN, An innovative tool using time varying channel model to evaluate performances of an acoustic link. Oceans Conference 2001.
- [Le Chevalier 1989] F. Le Chevalier. « Principe de traitement des signaux radar et sonar ». Ed. Masson. 1989
- [Le Gac 2003] J.C. Le Gac. "Deux approches de l'inversion géoacoustique : Inversion par signaux large bande et approche variationnelle". Thèse de docteur en sciences. Université de Toulon et du Var. 8 avril 2003
- [Le Gac et al 2002] J.C. Le Gac, M. Asch, Y. Stéphan and X. Demoulin. "Inversion of broadband acoustic data on a single hydrophone by use of an equivalent geoacoustic model", 6ème Conférence Européenne sur l'Acoustique Sous-Marine (ECUA2002), Eds Stepnowski, Salamon & Partyka, GUT.
- [Leroy 1965] C. Leroy. Sound attenuation between 200 and 10000 CPS measured along single paths. Tech. Report 43. Saclant ASW Research Center Sept 1965.
- [Lurton 1998] X. Lurton. Acoustique sous-marine. Présentation et applications. Editions Ifremer 1998.
- [Mackenzie 1960] K.V. Mackenzie. Reflection of Sound from Coastal Bottoms. J. Acoust. Soc. Am. 32, 221–231, 1960.
- [Munk – Wunsch 1979] W. Munk – C. Wunsch. Ocean Acoustic Tomography : a scheme for large scale monitoring. Deep-Sea Research. Vol. 26A, pp. 123 to 161, 1979.
- [Max 1985] J. Max. « Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Ed Masson. 4e édition.1985



- [Nelder – Meal 1965] J.A. Nelder, R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, Vol. 7 p.308-313, 1965
- [Noël 2002] C Noël. Réalisation et exploitation d'une expérience d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique. Rapport logiciel Document EPSHOM/CMO N°R/02/002/CN/CMO du 20/02/02.
- [Noël - Viala - Sarzeaud 1999] C Noël – C Viala – O Sarzeaud. Etude de synthèse des méthodes d'inversion en tomographie des océans. Document EPSHOM/CMO Rapport N° R/99/018/CN/CMO du 21/06/99. Classification du fond documentaire - Rapport N° R/99/020/CN/CMO du 22/07/99. Typologie des problèmes - Rapport N° R/99/021/CN/CMO du 22/07/99. Rapport final
- [Noël et al 1994] C. Noël, C. Viala, F. Evennou, Y. Stéphan. Significance and Feasibility of a Joint Assessment of Arrival Angles and Times in Experimental Tomography Methodology. *Oceans'94*, Osates, September 1994.
- [Noël et al 1995] C. Noël, C. Viala, F. Evennou, Y. Stéphan. Ocean acoustic tomography experiment using a vertical array. 15<sup>th</sup> international Congress on Acoustics. Trondheim, Norway, 26 – 30 June 1995.
- [Noël et al 1999] C. Noël, C. Viala, B. Garbail-Picon. Etude d'impact acoustique des houles de surface. *Revue Acta Acustica* 1999
- [Noël et al 1999] C. Noël, C. Viala, Y Stéphan. A study of hybrid and chaotic mid-range propagation in a double sound channel environment. *IEEE JOE* Vol 24. N°4 oct 1999. p447
- [Noël et al 2002] C. Noël, C. Viala, G. Lapierre. Simulation of acoustic signal in time-varying multipath underwater channel. *Underwater acoustics for deep sea applications*. Brest, France June 17 2002.
- [Noël et al 2005] C. Noël, C. Viala, E. Lehn, C. Jauffret. Développement d'une méthode acoustique de détection des herbiers de posidonies. Colloque : Sciences et technologies marines du futur – un enjeu pour la Méditerranée. Session n°3 : la mise en valeur des ressources. Marseille, France, 19 – 20 Mai 2005.
- [Noël et al 2006] C. Noël, C. Viala, B. Zerr. Acoustic characterization of underwater vegetations. *Sea Tech Week. CMM'06 Colloque caractérisation du milieu marin* Brest, France, 16 - 19 Octobre 2006.
- [Noël – Viala - Mandine 2002] C. Noël, C. Viala, E. Mandine. Réalisation et exploitation d'une expérience d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique. Documents EPSHOM/CMO N° R/02/003/CN/CMO : Rapport de données ; R/02/001/CN/CMO : Rapport scientifique ; R/02/002/CN/CMO : Rapport logiciel ; R/02/004/CN/CMO : Rapport Final.
- [Noël –Viala-Sturm al 1995] C. Viala, C. Noël, F. Sturm. Impact d'une houle aléatoire sur les caractéristiques des trajets sonores en milieu marin. Quinzième Colloque GRETSI. Juan-les-Pins, France, 18 – 22 Septembre 1995.
- [Mamode – Escudié 1987] M. Mamode - B. Escudié. Tolérance à l'effet Doppler et signaux optimaux sonar émis par les chauves-souris. *Acustica* Vol 64 1987, pp 263-271.
- [Mamode 1981] M. Mamode .Thèse de docteur ingénieur: Estimation optimale de la date d'arrivée d'un écho sonar perturbée par l'effet Doppler; synthèse de signaux "large bande" tolérants. INPG 1981.
- [Millet 1991] J. Millet. Signaux à ambiguïté optimale et déconvolution temps-fréquence. Application en identification active. Thèse de docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. 21 Mai 1991.
- [Porter et al 1998] M.B. Porter - S.M. Jesus - Y. Stephan - E. Coelho - X. Démoulin. Single-phone source tracking in a variable environment. *Proceedings of the Fourth European Conference on Underwater Acoustics*. Rome 1998.

- 
- [Press et al 1992] WH Press, BP Flannery, SA Teukolsky, WT Vetterling. Numerical recipes in C. The art of scientific computing. 2<sup>nd</sup> Edition. Cambridge Press University. 1992
- [Rayson] Documentation about RAYSON program is available on the website: <http://semantic-ts.fr/>
- [Robinson- Lee 1994] AR Robinson. Oceanography and acoustics. Prediction and propagation models. American Institute of Physics. NY
- [Siderius et Nielsen 2002] M.Siderius - P. Nielsen. Range dependent seabed characterization by inversion of acoustic data from a towed receiver array. Jasa 112 Oct 2002 pp 1523-1535.
- [Stéphan 1996] Y. Stéphan. Approches neuronales de l'inversion. Application à la Tomographie Acoustique des Océans. Thèse de doctorat du Centre National des Arts et Métiers. 27 Nov 1996.
- [Stéphan 2002] Y. Stéphan. Bilan de l'expérimentation d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique OMAN02.../SHOM/DRSF du 02/08/2002
- [Thorp 1967] W.H. Thorp. Analytic description of the low frequency attenuation coefficient. JASA Vol 42 N°1, Juillet 1967, p 270.
- [Viala et al 1995] C. Viala, C. Noël, F. Evennou, Y. Stéphan, M. Alombert, L. Chauvin. Réception de signaux tomographiques sur l'antenne verticale de Cap Ferrat : Expérimentation Ferrat 94. 3èmes Journées d'études ACOUSTIQUE SOUS-MARINE, Brest, France, 22 – 23 juin 1994.
- [Viala et al 1996] C. Noël, C. Viala, G. Goulet, P. Quetel. Study of transient signals propagation. Application to risk assesment. 3rd European Conference on Underwater Acoustics. Heraklion, Crète Greece 24 – 28 June 1996.
- [Viala et al 1997] C. Viala, C. Noël, B. Garbail-Picon. Analyse de l'impact des effets de surface sur la réponse impulsionnelle du milieu marin. 4<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique. Marseille, France, 14 – 18 Avril 1997.
- [Viala et al 1998] C. Noël, C. Viala, G. Goulet, M. Alombert, O. Gérard. Underwater Trajectory system for measurement of submarine noise. 4<sup>th</sup> European Conference on Underwater Acoustics. Rome, Italy, 21 – 25 September 1998.
- [Viala et al 2004] C. Viala, C. Noël, G. Lapierre. "RAYSON: a real time underwater communication simulator and performance estimator", Proc. of the 7th JASM French workshop on Underwater Acoustics, Brest France, October 19-20 2004.
- [Viala et al 2005] C. Viala, C. Noël, Y Stéphan, M Asch. Real-time geoacoustic inversion of large band signals. IEEE/OES Oceans '05 Europe. Brest, France June 20-23 2005
- [Viala et al 2006] C. Viala, C. Noël, Y Stéphan, M Asch. Real-time geoacoustic inversion of broad band signals in deep water. Sea Tech Week. CMM'06 Colloque caractérisation du milieu marin Brest, 16 - 19 Octobre 2006.
- [Viala et al 2007] C. Viala, C. Noël, M. Coquet, B. Zerr, P. Lelong. Pertinence de la méthode DIVA pour l'interprétation des mosaïques sonar latéral. Third Mediterranean Symposium on Marine Vegetation. Marseille, March 2007.

**Annexes**

## Publications des travaux réalisés dans le cadre de la thèse

Disponibles en PDF sur <http://semantic-ts.fr>

Journal ou Conférence	Titre
SEA TECH WEEK 2006	[Viala et al 2006] C. Viala, C. Noël, Y Stéphan, M Asch. Real-time geoacoustic inversion of broad band signals in deep water. Sea Tech Week. CMM'06 Colloque caractérisation du milieu marin Brest, 16 - 19 Octobre 2006.
OCEANS 2005	[Viala et al 2005] C. Viala, C. Noël, Y Stéphan, M Asch. Real-time geoacoustic inversion of large band signals. IEEE/OES Oceans '05 Europe. Brest, France June 20-23 2005

## Travaux connexes

Disponibles en PDF sur <http://semantic-ts.fr>

Journal ou Conférence	Titre
MSMV 2007	[Viala et al 2007] C. Viala, C. Noël, M. Coquet, B. Zerr, P. Lelong. Pertinence de la méthode DIVA pour l'interprétation des mosaïques sonar latéral. Third Mediterranean Symposium on Marine Vegetation. Marseille, March 2007.
JASM 2004	[Viala et al 2004] C. Viala, C. Noël, G. Lapiere. "RAYSON: a real time underwater communication simulator and performance estimator", Proc. of the 7th JASM French workshop on Underwater Acoustics, Brest France, October 19-20 2004.
OCEANS 2001	[Lapierre et al 2001] G Lapiere, C Lebrun, C Viala. TALISMAN, An innovative tool using time varying channel model to evaluate performances of an acoustic link. Oceans Conference IEEE 2001.
JOE'99	[Noël et al 1999] C. Noël, C. Viala, Y Stéphan. A study of hybrid and chaotic mid-range propagation in a double sound channel environment. IEEE JOE Vol 24. N°4 oct 1999. p447

## Prise en compte d'un fond multi-couches

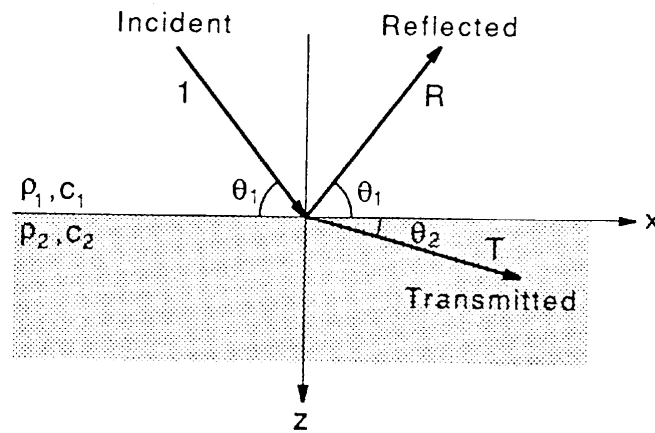
Ce paragraphe présente les travaux menés au cours de cette étude pour prendre en compte dans le logiciel RAYSON de simulation de la propagation du son par une méthode de rayons, un fond fluide multi-couches.

### 1) Coefficient de réflexion-transmission fluide-fluide

#### 1) Expressions de $R$ et $T$

Coefficients de réflexion  $R$  et de transmission  $T$  : rapports des **pressions**

En terme d'intensité :  $\frac{I_R}{I_I} = R^2$  et  $\frac{I_T}{I_I} = T^2$



Fluide 1 :  $\rho_1, c_1$

Fluide 2 :  $\rho_2, c_2$

Descartes :

$$k_1 \cos \theta_1 = k_2 \cos \theta_2, \text{ ou : } \frac{\cos \theta_1}{c_1} = \frac{\cos \theta_2}{c_2}$$

$k_i$  : nombre d'onde =  $\omega/c_i$

Les coefficients de réflexion et de transmission  $R$  et  $T$  s'expriment :

$$R = \frac{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 - \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin \theta_1},$$

$$T = \frac{2 \rho_2 c_2 / \sin \theta_2}{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}$$

$$1 + R = T$$

Ou, en terme d'impédance  $Z_i \equiv \rho_i c_i / \sin \theta_i$  :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \text{ et } T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

### 2) Angle de rasance critique

= angle d'incidence limite au-dessous duquel tout est réfléchi ( $T=0$ ,  $|R|=1$ ) :

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{c_1}{c_2}\right)$$

Existe uniquement si  $c_2 > c_1$ .

Pour des fonds à pertes (célérité complexe), la réflexion n'est pas parfaite ( $=1$ ), mais reste très fort par rapport aux angles supérieurs à  $\theta_c$ .

### 3) Angle d'intromission

= angle d'incidence limite au-dessus duquel tout est transmis ( $R=0$ ,  $|T|=1$ ) :

$$\theta_0 = \arctan \sqrt{\frac{1 - (c_2/c_1)^2}{[(\rho_2 c_2)/(\rho_1 c_1)]^2 - 1}}$$

Existe uniquement si :

1.  $c_2 < c_1$  avec  $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$
2.  $c_2 > c_1$  avec  $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$

Le premier cas (célérité faible, sédiment de haute densité) peut être commun pour des fonds vaseux (muddy), le second cas (célérité élevée, sédiment de faible densité) n'intervient jamais dans l'océan.

## 2) Coefficient de réflexion fluide-solide

Idem figure 1 avec le milieu 2 qui est un solide. Il existe dans ce milieu des ondes de cisaillement (célérité  $c_s$ ) et des ondes de compression (célérité  $c_p$ ).

$$R = \frac{Z_{TOT} - Z_1}{Z_{TOT} + Z_1}$$

où  $Z_{TOT}$  est l'impédance totale du second milieu donnée par :

$$Z_{TOT} = Z_p \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s$$

avec  $\theta_s$  et  $\theta_p$  vérifiant la loi de Descartes :

$$k_1 \cos \theta_1 = k_p \cos \theta_p = k_s \cos \theta_s$$

$k$  : nombre d'onde =  $\omega/c$

Remarque : implémentation dans le code :

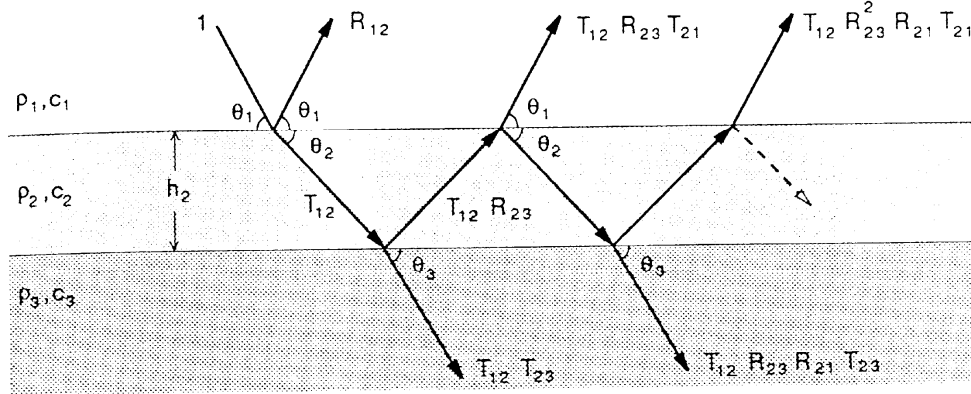
$$\cos^2 2\theta_s = 1 - 2 \sin^2 \theta_s$$

$$\sin^2 2\theta_s = 2 \sin \theta_s \cos \theta_s$$

### 3) Coefficient de réflexion pour un fluide stratifié

#### 1) Expressions de $R$ et $T$

Soit un milieu composé de 3 couches fluides :



Fluide 1 :  $\rho_1, c_1$

Fluide 2 :  $\rho_2, c_2$ , épaisseur  $h_2$

Fluide 3 :  $\rho_3, c_3$

Pour évaluer le coefficient de réflexion total, on doit prendre en compte :

1. les réflexions-transmissions successives
2. le déphasage lié à la traversée du milieu 2 d'épaisseur  $h_2$  :  $\phi_2 = k_2 h_2 \sin \theta_2$

Note : chaque onde réfléchi a un double passage dans le milieu 2, soit un déphasage  $2\phi_2$

Les coefficients de réflexion et de transmission totaux s'expriment (réf. Jensen p. 49) :

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} \exp(2i\phi_2)}{1 + R_{12} R_{23} \exp(2i\phi_2)}$$

$$T = \frac{T_{12} + T_{23} \exp(i\phi_2)}{1 + R_{12} R_{23} \exp(2i\phi_2)}$$

En terme d'impédance, on obtient :

$$R = \frac{Z_2 (Z_3 - Z_1) - i(Z_2^2 - Z_1 Z_3) \tan(\phi_2)}{Z_2 (Z_3 + Z_1) - i(Z_2^2 + Z_1 Z_3) \tan(\phi_2)}$$

avec :

$$k_1 \cos \theta_1 = k_2 \cos \theta_2 = k_3 \cos \theta_3$$

Cas spéciaux : suivant la valeur de  $h_2$ , la tangente de  $\phi_2$  peut devenir infinie ou nulle, ceci arrive pour :

#### 2) Couche « quart d'onde »

Si  $h_2 = (2m - 1)(\lambda_2 / 4)$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\tan \phi_2 = \infty$ .  $R$  est donné par :

$$R = \frac{Z_2^2 - Z_1 Z_3}{Z_2^2 + Z_1 Z_3}$$

Rq : nul pour  $Z_2 = \sqrt{(Z_1 Z_3)}$  (application dans les filtres acoustiques et barrière anti-réfléchissante)

3) Couche « demi d'onde »

Si  $h_2 = m(\lambda_2 / 2)$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\tan \phi_2 = 0$ .  $R$  est donné par :

$$R = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1}$$

Rq : indépendant de  $Z_2$ . Ce type de couche n'a aucune incidence sur l'onde incidente, et la réflexion a lieu comme si le milieu 1 et le milieu 3 étaient en contact direct.

4) Généralisation à une stratification quelconque

Soit un milieu composé de  $m$  couches superposées ( $m-2$  couches séparant le milieu 1 = l'eau, du milieu  $m$ ).

Le coefficient de réflexion pour les 3 dernières couches est (réf. Jensen):

$$R_{(m-2)m} = \frac{R_{(m-2)(m-1)} + R_{(m-1)m} \exp(2i\phi_{m-1})}{1 + R_{(m-2)(m-1)} R_{(m-1)m} \exp(2i\phi_{m-1})}$$

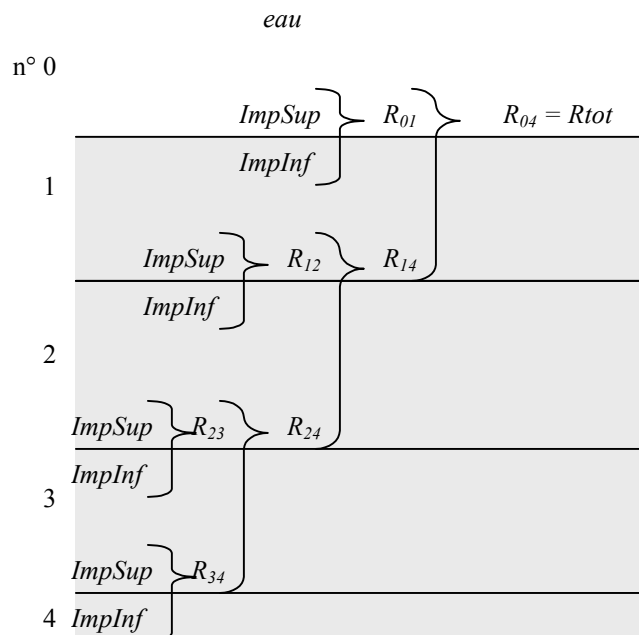
Connaissant  $R_{(m-2)m}$ , on calcule le coefficient de réflexion suivant :

$$R_{(m-3)m} = \frac{R_{(m-3)(m-2)} + R_{(m-2)m} \exp(2i\phi_{m-2})}{1 + R_{(m-3)(m-2)} R_{(m-2)m} \exp(2i\phi_{m-2})}$$

En continuant ce processus itératif, on obtient le coefficient de réflexion final  $R_{1m}$  :

$$R_{1m} = \frac{R_{12} + R_{2m} \exp(2i\phi_2)}{1 + R_{12} R_{2m} \exp(2i\phi_2)}$$

Exemple : fond composé de 3 couches :





**Initialisation :**

$$\text{calcul de } R_{34} : R_{34} = \frac{Z_{\text{inf}} - Z_{\text{sup}}}{Z_{\text{inf}} + Z_{\text{sup}}}$$

**Itération i = 3 :**Calcul de  $R_{23}$ 

$$\text{Calcul de } R_{24} : R_{24} = \frac{R_{23} + R_{34} \exp(2i\phi_3)}{1 + R_{23} R_{34} \exp(2i\phi_3)}$$

**Itération i = 2 :**Calcul de  $R_{12}$ 

$$\text{Calcul de } R_{14} : R_{14} = \frac{R_{12} + R_{24} \exp(2i\phi_2)}{1 + R_{12} R_{24} \exp(2i\phi_2)}$$

**Itération i = 1 :**Calcul de  $R_{01}$ 

$$\text{Calcul de } R_{04} : R_{04} = \frac{R_{01} + R_{14} \exp(2i\phi_1)}{1 + R_{01} R_{14} \exp(2i\phi_1)}$$

#### 4) Atténuation dans les couches sédimentaires

L'atténuation dans les couches de sédiments est prise en compte par la célérité complexe  $C$  :

$$K = 1/c_p + i\alpha_{NP} / \omega$$

$$C = 1/K$$

avec :

$c_p$  : vitesse de compression dans le fluide en m/s,  $\omega$  : pulsation,  $\alpha_{NP}$  : atténuation en unités naturelles (Nepers/m)

Les fichiers de carottage fournissent l'atténuation  $\alpha$  en dB/ $\lambda$ . Pour convertir :  $\alpha_{NP} = \frac{\alpha \omega}{2\pi \cdot 8.686 \cdot c_p}$

Type de fond	$p$ (%)	$\rho_b/\rho_w$	$c_p/c_w$	$c_p$ (m/s)	$c_s$ (m/s)	$\alpha_p/$ (dB/ $\lambda_p$ )	$\alpha_s$ (dB/ $\lambda_p$ )
Argile	70	1.5	1.00	1500	<100	0.2	1.0
Limon	55	1.7	1.05	1575	$c_s^{(1)}$	1.0	1.5
Sable	45	1.9	1.1	1650	$c_s^{(2)}$	0.8	2.5
Gravier	35	2.0	1.2	1800	$c_s^{(3)}$	0.6	1.5
Craie	-	2.2	1.6	2400	1000	0.2	0.5
Basalt	-	2.7	3.5	5250	2500	0.1	0.2

Eau :  $c_w = 1500$  m/s,  $\rho_w = 1000$  kg/m<sup>3</sup>

Porosité  $p$ , Densité  $\rho$ , Célérité de l'onde de compression  $c_p$ , de l'onde de cisaillement  $c_s$

Atténuation de l'onde de compression  $\alpha_p$ , atténuation de l'onde de cisaillement  $\alpha_s$

La vitesse de cisaillement dans des sédiments non consolidés est relativement faible mais augmente rapidement

avec la profondeur  $\tilde{z}$  sous l'interface eau-fond :  $c_s^{(1)} = 80 \tilde{z}^{0.3}$      $c_s^{(2)} = 110 \tilde{z}^{0.3}$ ,  $c_s^{(3)} = 180 \tilde{z}^{0.3}$

#### 5) Implémentation

##### 1) Format du fichier fond multicouches

Extension .mcf :

Nombre_couche:	N				
Couche_Fluide0:	Cp_0	Rho_0	$\alpha_p$ _0	h_0	
Couche_Fluide1:	Cp_1	Rho_1	$\alpha_p$ _1	h_1	
....					
Couche_FluideN-1:	Cp_N-1	Rho_N-1	$\alpha_p$ _N-1	0.0	
OU si la dernière couche est une couche dure					
Couche_Dure:	Cp_N-1	Rho_N-1	$\alpha_p$ _N-1	Cs_N-1	$\alpha_s$ _N-1

avec :

$C_{p\_i}$	Célérité de compression dans la couche n°i, en m/s
$Rho\_i$	Densité dans la couche n°i, en Kg/m <sup>3</sup>
$\alpha_{p\_i}$	Atténuation de compression dans la couche n°i, en dB/λ
$h\_i$	Épaisseur de la couche n°i, en m (si la dernière couche est fluide, h n'est pas utilisée)
$C_s$	Célérité de cisaillement dans la couche dure, en m/s
$\alpha_s$	Atténuation de cisaillement dans la couche dure, en dB/λ

## 2) Organigramme :

