

CFA/VISHNO 2016

Inversion géoacoustique des premiers mètres du sous-sol sous- marin et détection d'objets enfouis par AUVI. Mopin^a, X. Demoulin^b, M. Legris^a, B. Zerr^a et R. Bourdon^c^aENSTA Bretagne, UMR 6285, Lab-STICC, STIC-OSM, 2 Rue François Verny, 29200 Brest, France^bMAREE, 15 rue Galilée, 56270 Ploemeur, France^cRTSYS, 25 Rue Michel Marion, 56850 Caudan, France

irene.mopin@ensta-bretagne.org



LE MANS

Les travaux présentés s'inscrivent dans le projet RAPID BODAMM (*Buried Objects Detection by Acoustics and Magnetics Methods*) porté par la société RTSYS, l'ENSTA Bretagne, et la société MAREE. Ce projet a pour but la détection automatisée d'objets enfouis de type mines ou câbles sous-marins à l'aide de techniques acoustiques et magnétiques mises en œuvre depuis des drones sous-marins.

L'objectif principal de la partie acoustique est la mise en place du portage du système SCAMPI (système léger de sismique réflexion breveté par MAREE) sur un AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). En effet, la détection de petits objets enfouis nécessite au préalable de déterminer avec la plus grande précision possible la stratification des premiers mètres du sous-sol. Deux grands axes ont été traités dans ce cadre : (1) le dimensionnement et l'analyse des contraintes du portage du système par l'AUV en fonction des objectifs du projet, (2) la mise en conditions opérationnelles du système pour valider expérimentalement la méthode lors d'essais en mer.

Une campagne de tests a ainsi été effectuée en juin 2015 en rade de Brest par 10 – 20m de fond à l'aide d'une source émettant des signaux modulés en fréquence entre 400Hz et 3200Hz et d'une antenne de 10 hydrophones. Les résultats montrent que l'inversion géoacoustique des paramètres du fond marin avec une géométrie d'antenne tractable par un AUV (flûte tractée proche du fond) fonctionne et donne des résultats satisfaisants (stratification cohérente avec des sondes effectuées par un plongeur). Plusieurs types de traitements pour la détection d'objets enfouis pourront maintenant être identifiés et mis en œuvre lors de nouveaux essais en mer, en prévision d'une fusion avec des données de capteur magnétique.

1 Introduction

Le système SCAMPI ou *Système de Caractérisation Acoustique Marine Propagation Interface* est un système léger de sismique réflexion breveté par la société MAREE [1]. Il a pour finalité de définir une stratification des premières couches de sédiment sous-marin (jusqu'à 5m à 10m de profondeur) par des méthodes acoustiques (sismique réflexion) sans recours à des mesures *in situ*. Les informations qu'il fournit, basées sur la célérité des ondes acoustiques dans chacune des strates, peuvent être intéressantes des points de vue géologiques ou océanographiques pour déterminer des faciès sédimentaires ou pour toute utilisation du sous-sol (forage, dragage, etc). Les travaux présentés dans cet article portent sur l'adaptation du système SCAMPI pour la détection d'objets enfouis par AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Cette thématique fait partie d'un projet plus global de détection d'objet grâce à la fusion de données provenant de capteurs acoustiques et magnétiques (BODAMM), porté par la société RTSYS. Nous commencerons par décrire le système SCAMPI et les étapes de son dimensionnement pour AUV sous la contrainte de détection d'objets enfouis. Puis nous analyserons les résultats de ce nouveau système, que l'on nommera SCAMPI AUV, qui a été testé en mer en juillet 2015 pour permettre de valider la faisabilité d'une inversion géoacoustique.

2 Description du système SCAMPI

Sont décrit dans cette première section le fonctionnement du système SCAMPI tel qu'il a été breveté en 2005 par la société MAREE (matériel utilisé, traitements effectués), et les critères qui ont permis son dimensionnement dans le but de répondre aux spécifications du projet BODAMM, c'est-à-dire de tracter le système sur un AUV fabriqué par RTSYS.

2.1 Matériel et traitement

SCAMPI est apparenté à un système de type sismique réflexion tracté (cf. schéma de la figure 1). Il est composé d'une source acoustique omnidirectionnelle basse fréquence et large bande, et d'une flûte de 9 hydrophones. Les caractéristiques du système de 2005 sont regroupées dans le tableau 2.

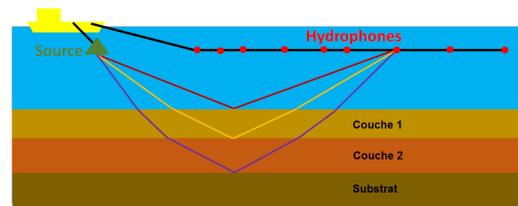


FIGURE 1 – Schéma de la géométrie SCAMPI 2005

Paramètres	Valeurs
Fréquences	400 à 3200Hz
Nombre d'hydrophones	8 à 10
Longueur de l'antenne	40m
Type de signal émis	Chirp de 1s toutes les 2s

FIGURE 2 – Caractéristiques du système SCAMPI 2005

Le traitement SCAMPI se fait en trois phases :

- 1) le calcul des réponses impulsionnelles et la caractérisation des différents échos reçus (cf. figure 3).
- 2) l'inversion géométrique qui permet de reconstituer la géométrie du système tracté pour chaque tir d'émission. Cette étape permet en parallèle de générer une carte bathymétrique.
- 3) l'inversion géoacoustique qui permet de définir les épaisseurs des différentes strates du sous-sol et leurs célérités. Elle s'effectue en trois étapes : (i) la création de points d'impact moyens ou PIM i.e. points vus sous différents angles de rasance par plusieurs capteurs, (ii) le calcul de la célérité de la première couche de sédiment (inversée à partir de la courbe de coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance sur un PIM), (iii) l'inversion des paramètres du fond par comparaison entre les réponses impulsionnelles simulées et les données réelles (algorithme de recuit simulé).

Pour permettre le traitement de ces trois phases dans les meilleures conditions, plusieurs critères doivent être remplis :

- tous les échos (direct, réfléchi fond, réfléchi surface, et multiples) doivent être discernables pour effectuer les inversions géométriques et géoacoustiques.
- une large gamme d'angles de rasance doit être disponible

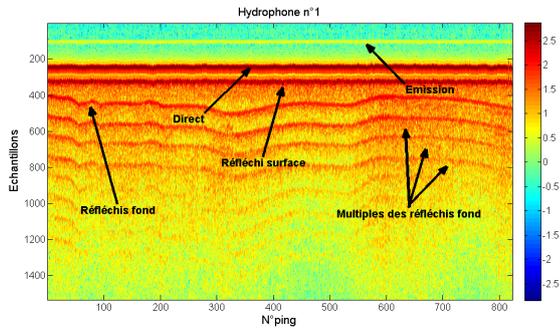


FIGURE 3 – Réponses impulsionnelles d'un récepteur en fonction des *pings* - SCAMPI 2005

sur chaque PIM pour effectuer l'inversion de la célérité de première couche.

La géométrie du système et les capacités des capteurs acoustiques et électroniques impactent directement ces critères.

2.2 Adaptation pour AUV

Dans le cadre du projet BODAMM, le système SCAMPI doit être porté par un AUV. Pour des raisons pratiques (taille de l'AUV, etc.) et dans le but de répondre à l'objectif de détection d'objet, il est nécessaire de redimensionner le système. Plusieurs types de critères sont donc à analyser : mécaniques, liés principalement à la conception de l'AUV, acoustiques liés intrinsèquement au système SCAMPI et au traitement qu'il effectue.

2.2.1 Critères mécaniques

Les caractéristiques et capacités de l'AUV nous ont été fournies par RTSYS. Celui-ci peut descendre jusqu'à 200m de profondeur en navigant jusqu'au maximum 3m au-dessus du fond (limite de sécurité) à 3 noeuds. La longueur maximale tractable par l'AUV est de 15m. À partir de ces caractéristiques, une simulation du système permet de contrôler les temps d'arrivée des signaux et les angles de rasance disponibles pour l'inversion SCAMPI. La figure 4 permet d'observer ces temps et angles, mais aussi l'angle critique de l'interface eau-première couche de sédiment après laquelle les signaux réfléchis sur les autres interfaces ne doivent plus être pris en compte.

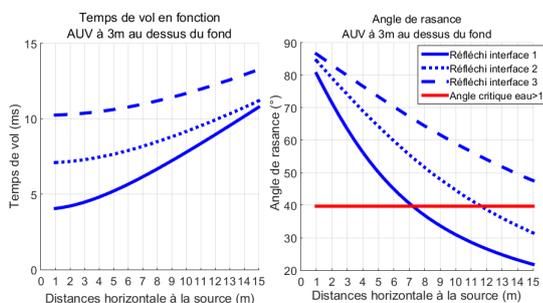


FIGURE 4 – Temps d'arrivée des signaux et angle de rasance associés en fonction de la distance à la source (AUV à 3m du fond)

On remarque sur ces figures 4 qu'entre 1m et 12m de la source les signaux ne se superposent pas, mais à partir de

12m les premiers signaux réfléchis commencent à coïncider (i.e. leur différence de temps d'arrivée est inférieure à la longueur de l'impulsion émise). La palette d'angles de rasance alors disponibles est large, de 20° à 80° pour le premier signal (réfléchi sur l'interface eau/sédiment).

La géométrie SCAMPI AUV choisie est donc celle d'une antenne de 16 hydrophones espacés de 50cm à partir de 2m de la source (la préférence de positionnement des récepteurs étant sur les angles de rasances les plus discriminants), tractée à 3m du fond (cf. figure 5).

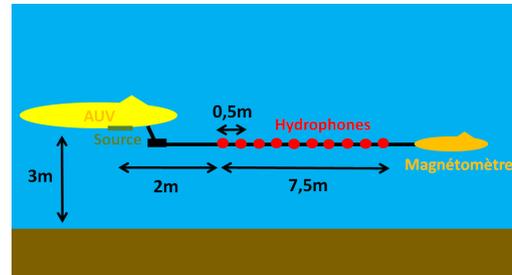


FIGURE 5 – Géométrie SCAMPI AUV

2.2.2 Critères acoustiques

Les critères acoustiques de dimensionnement sont liés directement aux caractéristiques du signal émis : plage de fréquences, largeur de bande, durée du signal, gain de compression. Dans le cas de SCAMPI ce signal est un *chirp*.

Le choix des fréquences à utiliser est contraint par deux limites majeures : la capacité des ondes à pénétrer dans le sédiment (nécessaire dans le contexte de détection d'objets enfouis) et l'encombrement de la source (important dans le cas d'un AUV). Ces deux critères sont antagonistes car la pénétration est meilleure en basse fréquence mais plus les fréquences émises sont basses, plus la taille de la source est grande.

La largeur de bande détermine la résolution du signal après compression d'impulsion, ou la largeur de l'écho. Cette résolution correspond à la largeur à $-3dB$ de la réponse impulsionnelle qui est équivalente à l'inverse de la bande [3]. C'est un paramètre déterminant lors de la détection d'objet car une résolution trop faible ne permettrait pas de distinguer les objets de petites tailles. Elle est limitée par deux contraintes : d'une part la capacité de l'AUV à fournir l'énergie nécessaire à l'émission d'un tel signal en autonomie, d'autre part la capacité du générateur de signal à lire et créer un *chirp*.

La durée d'émission contrôle l'amplitude du signal après compression d'impulsion et son étalement. Ces paramètres sont aussi déterminants pour la détection d'objet : l'amplitude du signal doit être assez forte pour avoir un rapport signal à bruit correct, l'étalement du signal doit être le plus faible possible pour éviter le masquage de l'écho de l'objet.

La seule limite, dans le cas du système SCAMPI, sur la durée d'émission est celle du générateur de signal. Plus le signal souhaité sera large bande et de courte durée, plus il sera difficile de le générer.

Le gain de compression (qui permet une meilleure détection) est affecté par l'instabilité des récepteurs et réflecteurs pendant la durée d'émission. Deux effets majeurs, liés au déplacement du navire, modifient alors la

cohérence du signal : l'effet Doppler et le déplacement de la tâche insonifiée. L'effet Doppler peut être négligé dans le calcul des réponses impulsionnelles si on suppose un fond stable et homogène sur la distance parcourue correspondant à la durée d'impulsion. Dans le cas contraire, chaque point insonifié du fond est considéré comme ponctuel et indépendant, l'effet du Doppler peut alors se faire ressentir.

Nous avons vu dans cette section que disposer l'antenne SCAMPI proche du fond permettait d'avoir une antenne plus courte tout en conservant un large panel d'angles de rasance, condition indispensable au fonctionnement de l'algorithme SCAMPI. De plus, le signal émis devra être basse fréquence (mais la source doit pouvoir s'adapter à la morphologie de l'AUV) et le plus court possible pour pouvoir émettre le plus fréquemment possible et donc avoir une meilleure résolution de l'image dans l'axe de navigation, mais aussi pour limiter l'étalement du signal après compression d'impulsion et s'affranchir de l'effet Doppler. Cependant, pour obtenir un gain de compression satisfaisant et une bonne résolution des échos pour leur discrimination, il est nécessaire de conserver une bande large. Le raccourcissement de la durée du signal est donc limité par les outils électroniques et numériques utilisés.

3 Application à la détection d'objets enfouis

Dans le but d'étudier la détectabilité d'un objet enfoui dans les sédiments marins à l'aide du système SCAMPI AUV, nous analysons les résultats de deux types de simulations du système : l'une en milieu homogène, l'autre en milieu hétérogène. Ces deux simulations sont faites en 2D, et un objet diffusant y est inséré.

3.1 Analyse en milieu homogène

L'objet intégré dans la simulation est une sphère rigide (impédance infinie) et sa diffusion est générée à partir des formules issues de [3]. Sur la figure 6 est tracée la directivité ou indice de cible angulaire obtenue pour une sphère de 10cm de rayon et une fréquence $f = 3kHz$. On notera que l'angle 180° correspond à l'amplitude rétrodiffusée (*backscattering*) et 0° correspond à l'arrière de la sphère (*forward scattering*).

On peut remarquer que la sphère rigide diffuse très peu d'énergie vers l'arrière à cette fréquence. Il sera donc plus difficile de la détecter à de faibles angles de rasance puisque l'amplitude de son écho sera très diminuée.

La simulation effectuée fait l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène c'est-à-dire que seuls les échos des interfaces et de l'objet sont pris en compte. On utilise ici la géométrie SCAMPI AUV (à 3m du fond) et deux couches de sédiment suivies d'un substrat rocheux (dur) de forte impédance, similaire au schéma de la figure 1.

La figure 7 permet de visualiser les réponses impulsionnelles reçues par un récepteur à $D = 3m$ de la source. La sphère est disposée sur la médiatrice de D à une profondeur de 1m ou de 30cm sous la première interface (eau/sédiment).

On peut remarquer que moins la sphère est enfouie profondément, plus son écho se confond avec celui de

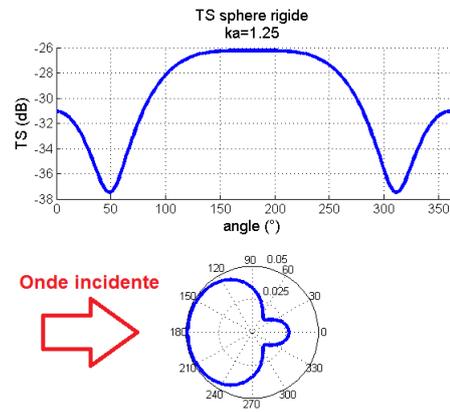


FIGURE 6 – Indice de cible d'une sphère de 10cm de rayon en fonction de l'angle, $f = 3kHz$

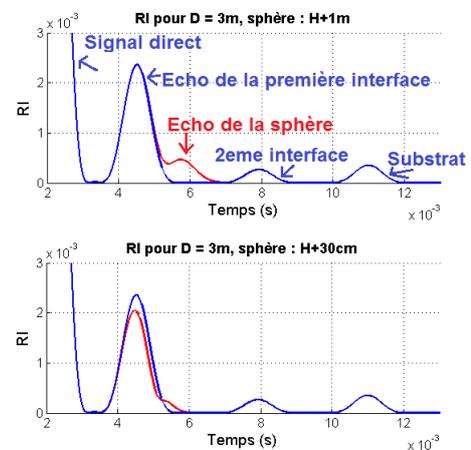


FIGURE 7 – Réponses impulsionnelles pour $D = 3m$ avec des profondeurs d'enfouissement de la sphère de 1m et 30cm sous la première interface

l'interface. Des objets très peu enfouis seront donc moins discernables. De plus, lorsque l'écho de la sphère est pratiquement simultané à l'écho spéculaire de l'interface, ce dernier en est diminué. Cette diminution est liée à la sommation incohérente des signaux de la sphère et de l'interface. Cette sommation pourrait être aussi bien constructive que destructive comme dans le cas présent.

3.1.1 Critères de détection d'un objet enfoui

La simulation permet de mettre en évidence l'impact de plusieurs paramètres du système SCAMPI sur la détection d'un objet enfoui. Dans le cas d'un milieu homogène et d'interfaces parfaites, les critères à prendre en compte sont les suivants :

- la directivité de l'objet qui va limiter les angles de détection.
- le rapport ka associé au système qui limitera l'amplitude maximale de l'écho de l'objet.
- la profondeur d'enfouissement de l'objet. Si celui-ci est trop proche de l'interface il pourra être masqué par la présence de l'écho de l'interface et son étalement.
- les fréquences utilisées, qui limiteront l'amplitude de l'écho de l'objet par rapport à ceux des interfaces

(absorption, transmission, etc).

- les distances source-récepteurs et la hauteur au dessus du fond, desquelles vont découler les distances entre les différents échos (et donc la discrimination de l'écho de l'objet) et l'amplitude de l'écho de la sphère (pour un récepteur trop lointain l'écho sera fortement atténué).

- la bande qui contrôle l'étalement et l'amplitude des échos (compensation de la dispersion de l'énergie), et donc le masquage de l'écho d'intérêt.

On notera que le cas de la géométrie AUV avec une antenne courte proche de la source est favorable car les angles de rasance disponibles seront forts ce qui correspondra à un bon index de directivité de l'objet, un bon écartement des échos, et des pertes de niveau (absorption, transmission, etc) faibles.

3.2 Analyse en milieu hétérogène

La simulation précédente analysant la détectabilité d'un objet enfoui faisait l'hypothèse de strates homogènes, l'effet de diffusion acoustique par le volume de sédiment n'était donc pas pris en compte. Cependant, durant l'analyse des données des anciennes campagnes SCAMPI (2005) nous avons pu repérer la présence d'un bruit volumique lié aux hétérogénéités du sédiment qui pourrait être à l'origine du masquage de l'écho d'un objet. La simulation suivante consiste par conséquent à étudier la réponse acoustique d'un milieu stratifié avec des couches de sédiments hétérogènes pour mieux appréhender la détectabilité d'un objet.

On cherche donc à simuler la réverbération du volume de sédiment insonifié au même moment qu'une sphère rigide enfouie pour analyser l'impact du niveau de réverbération sur la détection d'un objet. La technique du tracé de rayons est utilisée pour calculer la géométrie du problème, et l'équation du SONAR utilisée pour le calcul des réponses acoustiques de chaque diffuseur. La simulation est faite en 2D bistatique, sa géométrie est décrite figure 8.

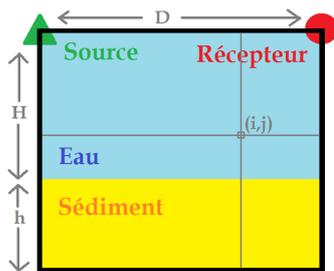


FIGURE 8 – Schéma de la simulation de détection d'un objet enfoui en milieu hétérogène

Le signal reçu RL par le récepteur en fonction du temps est simulé comme étant la somme de la contribution des réponses acoustiques : du volume (constitué des éléments (i, j)) d'eau ou de sédiment insonifié RL_{milieu} , de l'objet (ici une sphère rigide) RL_{sphere} , des interfaces RL_{refl} , du bruit ambiant RL_{bruit} . Après compression d'impulsion on a donc (en dB) [2] :

$$RL_{milieu}(t) = SL - TL(t) + SV(t) + 10\log(v) + 10\log(BT) \quad (1)$$

$$RL_{sphere}(t) = SL - TL_{sphere}(t) + TS_{sphere}(t) + 10\log(BT) \quad (2)$$

$$RL_{bruit}(t) = NL_0 + 10\log(B) \quad (3)$$

$$RL_{refl}(t) = SL - TL_{refl}(t) + R(t) + 10\log(BT) \quad (4)$$

avec SL le niveau émis, TL les pertes de propagation, SV l'indice volumique de cible, v le volume insonifié, NL_0 le bruit de fond nominal dans l'eau, B la bande, T la longueur d'impulsion et t le temps de propagation.

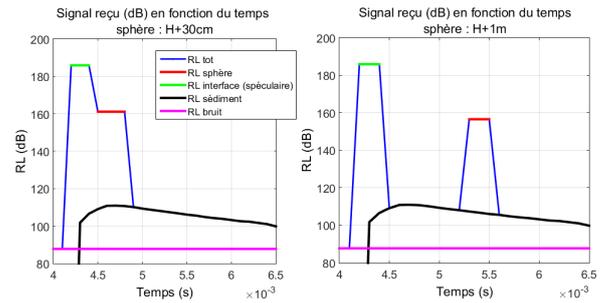


FIGURE 9 – Signal reçu par le récepteur en fonction du temps $RL(t)$ ($D = 3m$, sphère positionnée à $30cm$ ou $1m$ sous l'interface)

On obtient le signal temporel de la figure 9 (les différentes réponses de chaque contribution de l'équation SONAR sont aussi tracées individuellement). On peut conclure de cette figure que dans le cas de cette simulation, le signal généré par la diffusion de volume ne masque pas le signal de la sphère. Cependant, ce cas 2D ne prend donc pas en compte l'ensemble du volume insonifié par la source qui est omnidirectionnelle. L'énergie diffusée par le sédiment est donc sous-estimée.

Nous devons remarquer aussi le moment d'apparition de l'écho de la sphère en fonction de la profondeur d'enfouissement de celle-ci. À $1m$ de l'interface on distingue parfaitement l'écho, alors qu'à $30cm$ de l'interface une partie de l'écho de la sphère est masqué par l'écho de l'interface. Il sera donc plus difficile de détecter un objet peu profond à cause de cet étalement du signal. De plus, la rugosité d'interface n'est pas prise en compte dans cette première simulation, et elle peut augmenter l'étalement de l'écho de l'interface dans le temps. Le masquage sera alors plus important.

L'analyse des données d'une campagne SCAMPI de 2005 a donc permis de mettre en évidence deux paramètres pouvant gêner la détection d'un objet enfoui : la directivité de cet objet et l'hétérogénéité du milieu. Le cumul des deux générant un mauvais rapport signal sur bruit et donc un masquage de l'écho de l'objet.

Il est difficile, à partir de la simulation présentée, de conclure quant au masquage de l'écho d'un objet enfoui par un niveau trop élevé de diffusion volumique car nous avons vu plus haut que le volume 3D de sédiment insonifié serait beaucoup plus élevé qu'en 2D et que par conséquent les premiers résultats présentés sont sous-estimés par la simulation 2D. Dans la pratique, pour limiter la contribution de volume il est conseillé d'utiliser une source directive, qui insonifie, au mieux, dans le plan de l'antenne.

Le masquage par l'écho de l'interface est cependant réaliste et non négligeable. Nous avons vu que pour détecter un objet proche de l'interface eau-fond il est préférable d'utiliser des angles de rasances forts (i.e. une distance source-récepteur faible) pour une meilleure discrimination des échos.

4 Mesures en Rade de Brest et résultats

L'ensemble du système SCAMPI utilisé en 2005 a été remis en conditions opérationnelles et modifié pour se rapprocher au mieux de la géométrie AUV. Des mesures en mer ont été effectuées les 25 et 26 juin 2015 en rade de Brest sur la vedette hydrographique de l'ENSTA Bretagne *Panopée*. L'objectif de cette campagne était de valider la géométrie SCAMPI AUV dans le cadre d'un traitement SCAMPI classique (inversion des paramètres du sous-sol).

4.1 Description de la campagne

Pour répondre à cet objectif une zone de fond plat et homogène a été choisie, à l'embouchure de l'Aulne. Un schéma de levé en grille a été effectué (cf. figure 12). Le matériel SCAMPI utilisé est le même que celui des campagnes de 2005 [1]. Il est composé d'un GPS, de l'ensemble de l'électronique d'émission et réception de 2005 remise à jour, de l'antenne dans la nouvelle géométrie AUV, et de la source large bande (les signaux émis sont les mêmes que pour SCAMPI 2005 [1]). En plus du système SCAMPI, le sondeur de sédiment paramétrique Tritech de l'ENSTA Bretagne a été utilisé sur quelques radiales (20kHz et 200kHz).

4.2 Informations sur la zone

Dans le cadre de l'inversion des paramètres géoacoustiques du sous-sol, il est intéressant d'avoir une première idée de la composition du fond, notamment de la première couche sédimentaire. La carte issue de la thèse de N. Guillou [4] montre que le fond sur la zone d'intérêt est argileux (substrat fin nommé pélite) et donc vaseux, ce qui est confirmé par la carte sédimentaire du SHOM [7]. Cependant, il semblerait d'après un rapport d'Actimar [6] que cette zone soit aussi une zone de présence de crépidules. Il est donc difficile de se faire une idée de la composition de la première couche de substrat puisque la prolifération des crépidules peut varier suivant les conditions climatiques et autres facteurs environnementaux.

4.3 Résultats

L'inversion géoacoustique est effectuée à l'aide d'un algorithme de recuit simulé qui minimise la distance entre les réponses impulsionnelles observées et des réponses impulsionnelles théoriques. Pour faciliter la convergence de l'algorithme il est possible de fixer certains paramètres géophysiques du fond empiriquement ou en fonction des résultats des tirs précédents.

Deux exemples de résultat de l'inversion sont donnés figure 10. On y observe la présence d'une couche de sédiment en surface qui surplombe une couche très dure sous laquelle on retrouve un substrat plus meuble. Cette inclusion dure se retrouve aussi sur les images du sondeur de sédiment (cf. figure 11), elle est plus en surface au nord-est de la zone, et tend à disparaître pour laisser une stratification plus homogène au sud-ouest. D'une manière générale, la présence d'un fond plus dense au nord de la zone pourrait expliquer la présence du méandre de l'Aulne (cf. figure 12). La couche supérieure de sédiment quant à elle est

trouvée à des célérités assez faibles ce qui peut confirmer les hypothèses de N. Guillou [4] quant à la présence d'un fond vaseux (voir tableau des propriétés des sédiments dans l'article de Hamilton [5]).

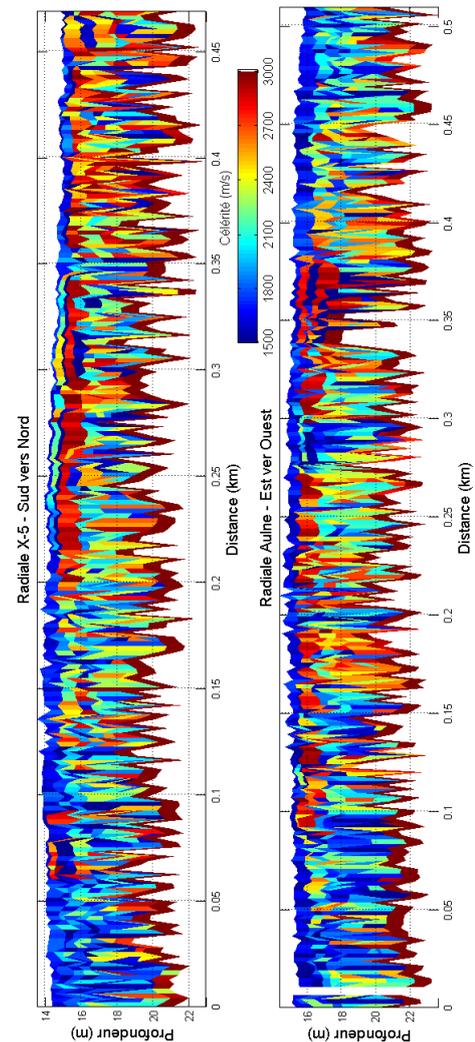


FIGURE 10 – Radiales centrales (en orange sur la figure 12)

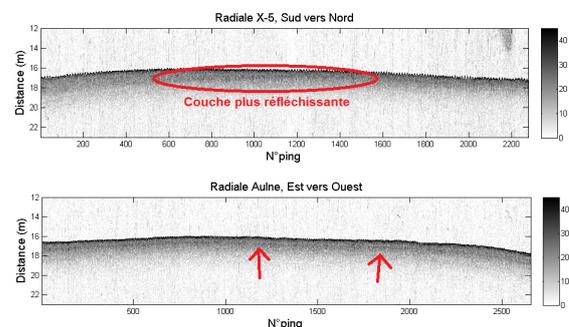


FIGURE 11 – Imagerie du sondeur de sédiment à 20kHz - Radiales centrales

4.4 Validation de la méthode

La validation de la méthode d'inversion s'effectue en comparant les résultats de célérité de première couche aux points de croisements des radiales. Les différences de

célérité obtenues au niveau de ces points sont données figure 12. On observe sur cette figure qu'elles sont strictement inférieures à $100m/s$, ce qui valide la méthode suivant les critères de MAREE.

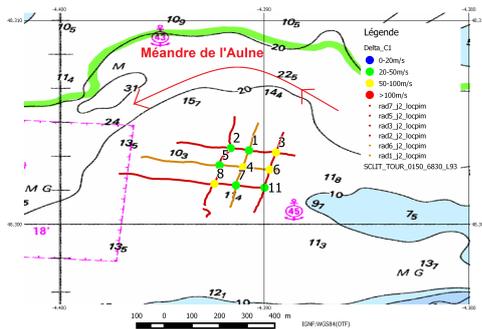


FIGURE 12 – Résultats de l'inversion des célérités (m/s) de première couche. Différences aux points de croisement.

4.5 Validation empirique

Grâce à l'aide de Hugues Priol de l'association Brest Recherche Plongée [8], il a été possible de faire des prélèvements et des mesures à la sonde à main sur la radiale nord-sud centrale. Trois mesures se situant sur la radiale (extrémité nord de la radiale, croisement central et extrémité sud de la radiale) ont été effectuées. Pour un point, plusieurs sondages sont réalisés à quelques mètres d'intervalle. La sonde à main est d'une longueur de $1,50m$, les mesures se font donc jusqu'à cette profondeur.

D'une manière générale, sur les trois points, la stratification est de la forme suivante : une couche de sédiment meuble entre $20cm$ et $50cm$ d'épaisseur suivie d'une couche très dense (dont l'épaisseur est difficile à estimer par le plongeur) que la sonde peut traverser en forçant, et ensuite un substrat meuble jusqu'à la portée de la sonde. Suivant les points, les différents sondages ne sont pas toujours identiques sur la zone. Par exemple au sud de la radiale, une sonde peut donner le résultat précédent mais aussi bien donner une absence de stratification (pas de couche dure). Un échantillonnage de la couche de surface permet de déduire qualitativement qu'elle est constituée de sable vaseux fin, et la couche dure est de glaise.

Les résultats de ces sondages permettent de valider l'inversion géoacoustique de la radiale centrale nord-sud. En effet, on observe sur la figure 10 une couche de basse célérité (meuble) en surface, suivie d'une couche dure. De plus, la stratification est bien plus forte au nord de la radiale qu'au sud comme le confirme les sondages à main.

L'inversion géoacoustique donne donc des résultats convenables et permet de valider le principe d'un traitement SCAMPI à partir d'une géométrie AUV. Il reste cependant à réaliser quelques améliorations du traitement pour optimiser au mieux l'inversion et l'interprétation des résultats obtenus.

5 Conclusion

Nous avons analysé ici l'ensemble des critères permettant d'effectuer un traitement SCAMPI classique dans le but d'adapter le système à une géométrie AUV. Grâce à ces critères et à l'étude de leurs limitations (acoustiques ou

mécaniques) nous avons pu modifier l'antenne initiale SCAMPI pour effectuer des mesures en mer avec une géométrie se rapprochant au mieux de la future géométrie SCAMPI AUV. Ces essais ont été réalisés en rade de Brest, à l'embouchure de l'Aulne. L'inversion géoacoustique avec ce nouveau système fournit des résultats corrects, soutenus par les sondages à main, prélèvements, et images du sondeur de sédiment qui ont été d'une grande aide pour mieux comprendre la stratification complexe de la zone. La méthode d'inversion SCAMPI AUV est donc validée.

L'objectif du projet BODAMM étant la détection d'objets enfouis à l'aide de SCAMPI AUV, les critères à prendre en compte pour cette détection ont été étudiés pour une application future. Ces critères sont : la directivité de l'objet, le rapport ka associé au système, la profondeur d'enfouissement de l'objet, les fréquences d'émission, les distances source-récepteurs et la hauteur au dessus du fond, la bande fréquentielle utilisée, et enfin l'hétérogénéité du milieu. Des simulations (2D) montrent les différents impacts de ces paramètres sur la détection, certains diminuant le rapport signal sur bruit, d'autres pouvant générer un masquage de l'écho d'intérêt. Cependant, la 2D n'étant pas suffisante pour conclure quantitativement, il est aujourd'hui nécessaire de développer une simulation 3D prenant en compte l'ensemble des paramètres vus précédemment.

Remerciements

Le projet BODAMM fait l'objet d'un financement par la Direction Générale des Entreprises, au titre du programme-action 0192-03 (2015). Nous tenons à remercier l'équipage de la *Panopée* (ENSTA Bretagne) ainsi que Brest Recherche Plongée pour leurs contributions au projet.

Références

- [1] X. Demoulin, L. Richier, O. Savanier, Ultra high resolution mapping of sub-seabed sediment device : results and comparison with vibrocoring analysis in a very shallow water area, *IEEE Oceans - Europe* (2005)
- [2] J-P. Marage, Y. Mori, Sonars et acoustique sous-marine, *Ed. Lavoisier* (2009)
- [3] R. J. Urlick, Principles of underwater sound (1983)
- [4] N. Guillou, Rôles de l'hétérogénéité des sédiments de fond et des interactions houle-courant sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire en zone subtidale - applications en Manche orientale et à la pointe de la Bretagne, *Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale* (2009)
- [5] D. L. Hamilton, Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific, *Journal of geophysical research*, vol. 75 (1970)
- [6] Actimar, Positionnement de la conduite Océanopolis : analyse hydro-sédimentaire, *Brest Métropole Océane*, (2014)
- [7] Data SHOM, www.data.shom.fr
- [8] Brest Recherche Plongée, brest-recherche-plongee.e-monsite.com