

ÉDITORIAL : L'OCÉANOGRAPHIE ACOUSTIQUE AU SHOM

par Yann Stéphan (1)

RÉSUMÉ

Cet article fait le point sur les activités conduites au SHOM en océanographie acoustique. Cette thématique regroupe les études des effets du milieu sur les systèmes acoustiques utilisés par les forces navales et les méthodes de caractérisation tomographique du milieu. Les principaux axes de recherche et développement dans ces domaines sont présentés.

ABSTRACT

This paper focus on the activities conducted at SHOM in ocean acoustics. These studies are mainly relative to the impact of the environment on the acoustic systems operated by naval forces as well the tomographic characterization of the environment. The major axes of research in this domain are presented and discussed.

(1) Ingénieur cadre technico-commercial chargé d'études et recherches en tomographie acoustique
SHOM, 13, rue du Chatellier, CS92803, 29228 Brest Cedex 2, France.
(Email : yann.stephan@shom.fr)

1. INTRODUCTION

Les activités du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) sont bien connues des lecteurs des *Annales Hydrographiques*, fussent-ils habitués ou occasionnels. Si la notoriété du service en matière d'hydrographie et d'océanographie n'est plus à faire, les activités du service relatives à l'acoustique sous-marine, sont probablement moins connues.

On pourra invoquer deux raisons à cela.

La première raison peut être qualifiée de culturelle : l'acoustique sous-marine ne constitue pas le cœur de métier du SHOM, il n'est donc pas surprenant que la communication relative à cette discipline ait été plus "discrète" que celle concernant d'autres activités. Pour autant, l'acoustique sous-marine est un outil indispensable à l'exercice des missions d'un service hydrographique comme le SHOM. En effet, la maîtrise des systèmes acoustiques les plus modernes de mesures de la bathymétrie, des courants, de la nature des fonds marins ou encore de l'épaisseur des couches sédimentaires est une condition sine qua non à la qualité des acquisitions de connaissances hydro-océanographiques nécessaires à la réalisation des produits et services du SHOM destinés aux usagers civils et militaires du milieu marin. Le SHOM a d'ailleurs été pionnier dans ce domaine, s'intéressant très tôt à l'exploitation de la propagation du son sur le repérage acoustique en mer [Lacombe, 1946, Grousseau R., 1955]. Le SHOM, pourrait presque s'enorgueillir de l'invention du sondeur bathymétrique, dont le principe fut énoncé dès 1836 par Urbain Dorcet de Tessan, ingénieur hydrographe¹ !

La seconde raison est opérationnelle. La connaissance et la compréhension des mécanismes de propagation, de réverbération ou de génération du bruit ambiant font partie intégrante de la mission du SHOM de soutenir les opérations navales, principalement pour permettre aux opérationnels de mieux appréhender les effets du milieu sur l'utilisation de leurs systèmes de détection sous-marine. On comprendra que beaucoup de résultats de ces études soient restés dans un cercle d'initiés et d'utilisateurs restreints. Pour autant, l'acquisition d'un savoir-faire en matière d'acoustique sous-marine pour mieux comprendre les effets du milieu sur les opérations navales est un processus entamé depuis plusieurs dizaines d'années, processus rendu particulièrement nécessaire d'une part par les développements technologiques et évolutions tactiques liés à la mise en service opérationnelle de sonars à très basses fréquences, plus sensibles à l'environnement et opérant sur des portées plus longues, et d'autre part par l'accroissement des opérations navales en zones côtières, plus complexes à appréhender.

Ce savoir faire est le fruit d'un nombre conséquent d'études et de recherches à la fois sur l'impact acoustique des phénomènes océanographiques et sur l'optimisation de la description du milieu marin pour les besoins de la détection sous-marine, activités regroupées sous le terme générique "d'océanographie acoustique" pour les besoins de cet article.

En définitive, on ne relève dans les *Annales Hydrographiques* que peu de références concernant l'acoustique sous-marine en général et l'océanographie acoustique en particulier. La publication d'un numéro spécial consacré au séminaire SERENADE [Stéphan *et al.*, 2010], apporte l'occasion de combler, bien que très partiellement, cette "lacune". Ce numéro spécial fournit ainsi l'opportunité de présenter, en complément d'un article publié dans les précédentes *Annales Hydrographiques* n° 775 [Morel, 2010], quelques résultats récents d'études et recherches en océanographie acoustique conduites au SHOM et chez ses partenaires. Il présente aussi quelques axes de recherche dans le domaine de la caractérisation acoustique du milieu marin et de l'impact acoustique de l'environnement.

La première partie de cet article revient brièvement sur les évolutions récentes des activités en océanographie acoustique. La seconde partie présente les principales thématiques de recherche en cours au SHOM. Enfin, conclusions et perspectives sont dressées en fin d'article.

2. UN BREF HISTORIQUE...

L'origine : environnement et sonars

La connaissance de l'environnement est un facteur essentiel pour évaluer les performances des sonars. Dans le cadre de sa mission de Défense, en particulier de soutien aux opérations navales, une des premières actions du SHOM a été de fournir aux forces des conditions typiques, au sens statistique du terme, des environnements de propagation. Ce sont les albums de champs sonores, édités par le SHOM à usage des unités de la marine, et dont certains comportaient une estimation des pertes de propagation acoustique (figure 1) permettant d'estimer les portées de détection en l'absence de systèmes embarqués de mesure de la bathycélérimétrie. L'avènement des systèmes de mesures et de calculs embarqués, tels que les sondes perdables et les outils numériques de modélisation de la propagation, a rendu obsolète ces albums de champs sonores pour une utilisation temps réel. Néanmoins, la connaissance statistique d'un théâtre d'opération, en incluant l'ordre de grandeur des caractéristiques de la propagation acoustique, reste un outil important pour la planification des opérations.

¹ « J'ai proposé, en 1836, dans des notes placées à la suite des Instructions nautiques sur les côtes de l'Algérie, de M. A. Bérard, un moyen de mesurer les grandes profondeurs de la mer, basé sur l'emploi de bombes qui feraient explosion en touchant le fond. (Le bruit de l'explosion ferait connaître l'instant de l'arrivée, et la durée de la chute ferait connaître la profondeur, puisque la vitesse de la chute est constante.) Quelques personnes ont douté que le bruit de l'explosion d'une bombe arrivée au fond de la mer (4 lieues) pût être entendue de la surface. ... on sait que l'eau, étant beaucoup plus dense et plus homogène que l'air doit transmettre le son beaucoup mieux que lui. Au reste, l'observation directe, faite par M. Colladon sur le lac de Genève, est plus probante encore ; ... Il me semble, d'après cela, qu'on ne peut plus élever de doutes raisonnables sur la possibilité d'entendre, de la surface, le bruit de l'explosion d'une bombe suffisamment chargée, qui éclaterait au fond de la mer. » (*Physique, tome IV, 1844, 226*)

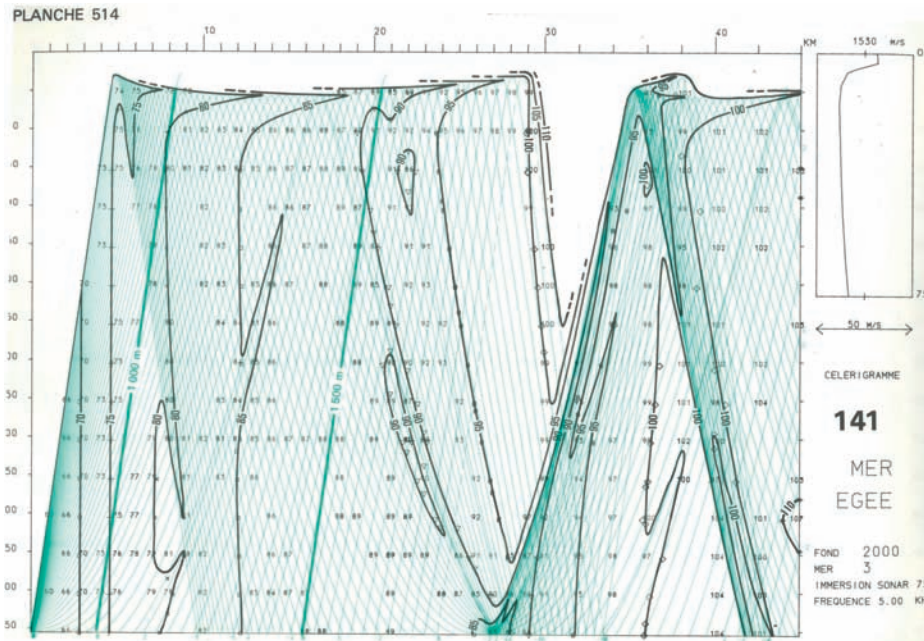


Figure 1 : Exemple de champ sonore en mer Égée tirée de l'album de champ sonore "Méditerranée orientale", n° 722, 1982.

Le premier élan : la tomographie acoustique

Le véritable essor de l'océanographie acoustique au SHOM, dans son contour défini en introduction, eu lieu à la moitié des années 80 grâce à l'implication du service dans l'importation en France des techniques de tomographie acoustique (Munk et Wunsch, 1979), en partenariat avec la Direction générale de l'armement (DGA) et l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). La tomographie acoustique, qui est discutée plus en détail dans un autre article de ce volume [Stéphan *et al.*, 2010], présente en effet un double intérêt. Il s'agit d'une part d'une méthode de mesure des paramètres physiques de l'océan à l'échelle des théâtres d'opérations et son emploi contribue donc à la

connaissance océano-acoustique de ceux-ci. Il s'agit d'autre part d'un système de mesure in situ de l'impact des phénomènes océanographiques et donc un excellent outil pour la compréhension des effets positifs ou négatifs sur l'emploi tactique des sonars. Le SHOM, soutenu par la DGA et la marine, a mené dès 1987 une expérience pilote sur le bord est de l'océan Atlantique (campagne BORD-EST, en collaboration avec l'Ifremer) puis une expérience majeure de validation de la technique en 1990, la campagne GASTOM² (figure 2), qui a confirmé tout le potentiel de la tomographie pour améliorer la perception du milieu et de son impact [Stéphan, 1998].

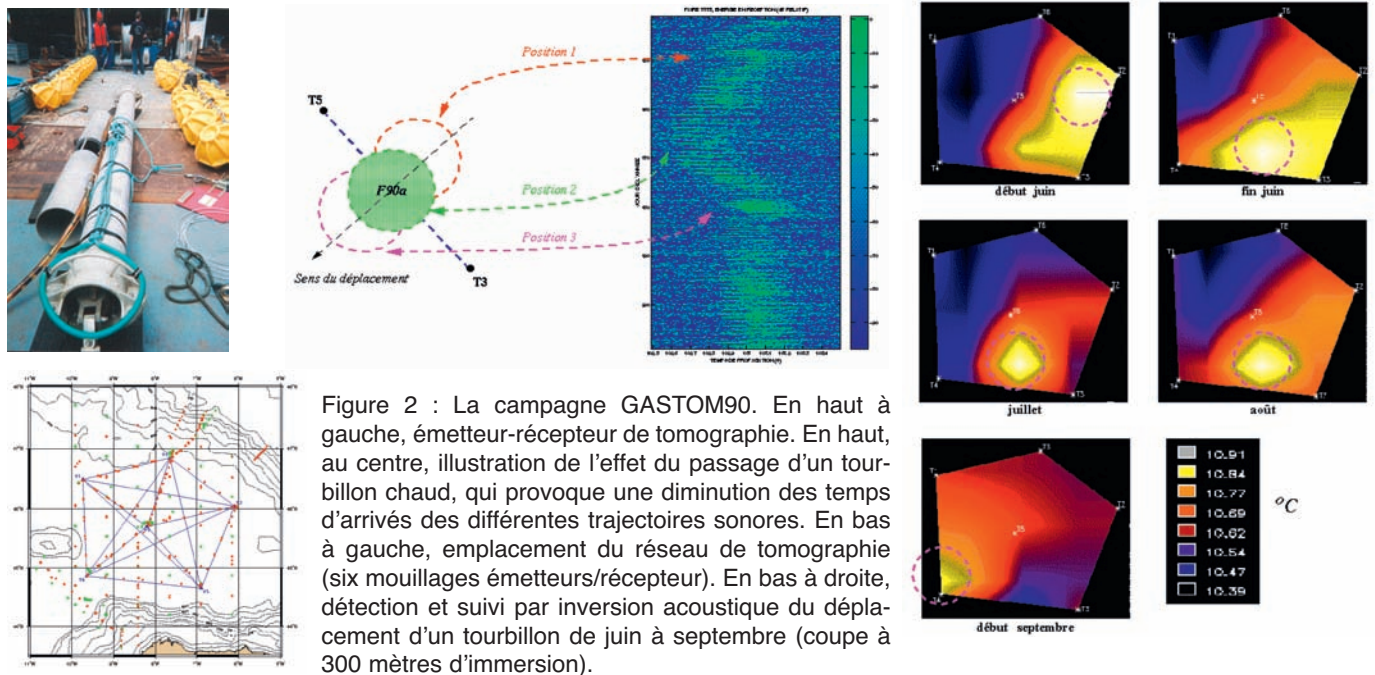


Figure 2 : La campagne GASTOM90. En haut à gauche, émetteur-récepteur de tomographie. En haut, au centre, illustration de l'effet du passage d'un tourbillon chaud, qui provoque une diminution des temps d'arrivées des différentes trajectoires sonores. En bas à gauche, emplacement du réseau de tomographie (six mouillages émetteurs/récepteur). En bas à droite, détection et suivi par inversion acoustique du déplacement d'un tourbillon de juin à septembre (coupe à 300 mètres d'immersion).

² GAScogne TOMographie

La confirmation : de la tomographie de bassin à la reconnaissance océano-acoustique de théâtres côtiers

Si la première application opérationnelle envisagée pour la tomographie portait sur l'élaboration d'observatoires acoustiques sur les plaines abyssales, l'évolution du contexte géostratégique international vers le milieu des années 90 a étendu les zones de crises potentielles, donc de menaces sous-marines, des zones hauturières vers les environnements côtiers. Les résultats prometteurs de la tomographie par grands fonds ont suscité le portage du concept d'observation acoustique du milieu et de son impact par petits fonds, concept qu'on retrouve généralement sous la dénomination d'évaluation rapide de l'environnement acoustique (REA acoustique³) : comment, à partir de mesures de propagation acoustique sur des systèmes éparses et rapidement déployables, peut-on caractériser la variabilité océanique et géoacoustique d'une zone *a priori* mal connue ? La réponse à cette problématique est toujours aujourd'hui un axe majeur des activités en océanographie du service, qui assure notamment pour le compte de la DGA la maîtrise d'ouvrage de programmes d'études amont dans ce domaine. Dès

1996, les excellents résultats de la campagne INTIMATE⁴, une des toutes premières campagnes de tomographie par petits fonds au monde, ont confirmé la faisabilité technique et l'intérêt opérationnel de la technique (Stéphan *et al.*, 2000). Dans les années 2000, le lancement et la réalisation du programme d'étude amont STEREO se sont traduits en 2008 par la validation d'un démonstrateur de REA acoustique, le système STEREO⁵. Ce système, composé d'une source acoustique très basse fréquence et de quatre bouées dérivantes, permet, en précurseur au déploiement d'unités opérationnelles sur un théâtre côtier, de mesurer les caractéristiques océano-acoustiques d'une zone d'opération afin de valider ou d'infirmer la pertinence de la connaissance environnementale de cette zone pour la détection sous-marine (figure 3). Si, en l'état des connaissances, les prédictions acoustiques sont conformes aux mesures du système, la situation environnementale est considérée comme valide. Si ce n'est pas le cas, le système STEREO permet, par inversion de données, de modifier la perception de l'environnement pour la rendre conforme aux caractéristiques acoustiques observées.

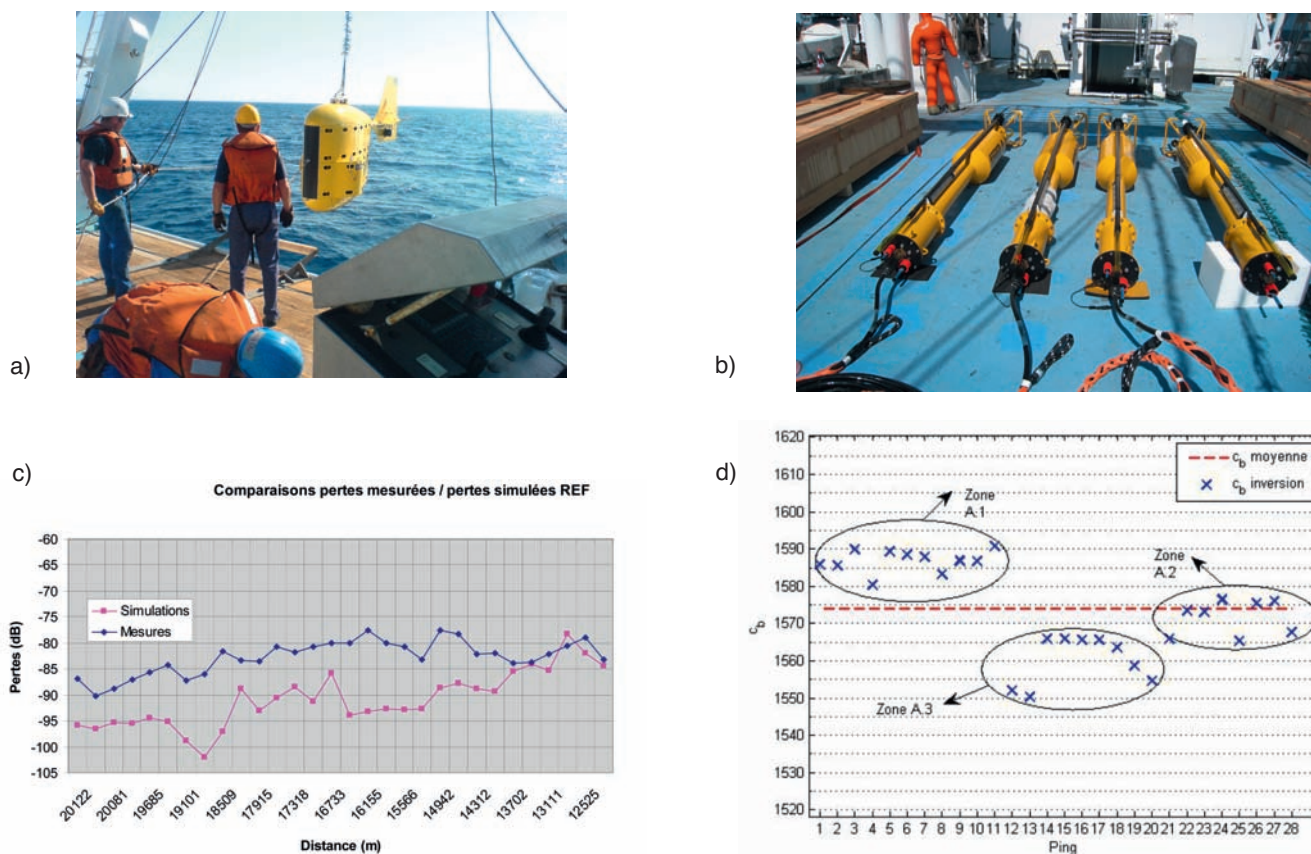


Figure 3 : Système STEREO ; en haut à gauche, sous-système "ensemble remorqué" mis à l'eau depuis le BHO *Beautemps-Beaupré* ; en haut à droite, le sous-système "bouées" composé de 4 unités (mats repliés) et leurs antennes associées ; en bas à gauche, exemple de comparaison entre pertes de propagation prédite et pertes de propagation mesurées par le système en fonction de la distance source - récepteur. En bas à droite, résultats d'inversion permettant d'estimer à partir des mesures la vitesse de compression du fond et sa variabilité.

³ Rapid Environmental Assessment

⁴ Internal Tide Investigation by Means of Acoustic Tomography Experiment (observation de la marée interne par la tomographie acoustique)

⁵ STEREO est l'acronyme de Système Temps réel d'Evaluation Rapide de l'Environnement Océano-acoustique

Comme évoqué auparavant, le SHOM a développé une compétence en acoustique sous-marine essentiellement axée vers les applications liées à l'observation du milieu par techniques tomographiques et à l'impact de l'environnement sur les sonars afin de mieux répondre au besoin de la marine en matière de prévision et d'exploitation des performances de sonars de détection sous-marine. Cette compétence évolue et s'étoffe en fonction des besoins opérationnels. Ainsi, le SHOM s'est vu confier la gestion opérationnelle des bases de données de bruit ambiant à des fins de production et de prévision opérationnelle de cette grandeur pour les forces sous-marines. Les activités du SHOM en océanographie acoustique à l'heure actuelle peuvent être décrites en cinq principaux volets :

- la constitution de bases de données acoustiques : le SHOM enrichit et gère des bases exploitées ensuite pour des activités opérationnelles ou d'étude ;
- le soutien opérationnel : le SHOM diffuse à la marine des produits relatifs à la connaissance des caractéristiques acoustiques du milieu marin (propagation, réverbération, bruit ambiant). Ces produits peuvent être à caractère permanents ou éphémères (prévisions de bruit ambiant, par exemple) ;
- l'expertise et les études : le SHOM réalise des expertises et conduit ou pilote des études dans le domaine de l'observation acoustique du milieu et les effets de l'environnement sur la propagation acoustique et le bruit ambiant (figure 4) ;
- les campagnes à la mer : le SHOM acquiert des données en mer à partir de la flotte hydro-océanographique mise à sa disposition. Il spécifie et réalise régulièrement des expérimentations acoustiques, en particulier dans le cadre des programmes d'études amont que lui confie la DGA ;
- l'instrumentation acoustique : le SHOM dispose d'un parc instrumental en acoustique sous-marine dans le domaine des très basses fréquences (sources acoustiques et bouées réceptrices).

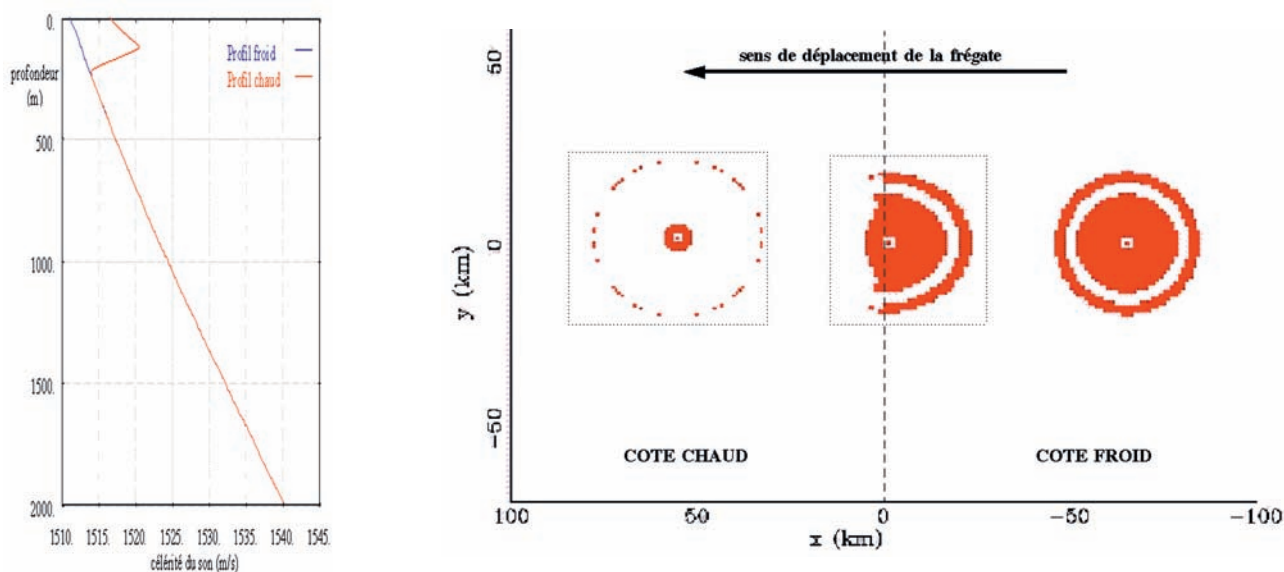


Figure 4 : Exemple d'étude d'impact montrant l'influence d'un front thermique sur le disque de détection d'un sonar de coque.

⁶ Évaluation Rapide de l'environnement Acoustique par Tomographie Océanique.

3. LES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE EN OCÉANOGRAPHIE ACOUSTIQUE

La recherche au SHOM en matière d'océanographie acoustique vise principalement à répondre à la problématique de REA acoustique. A ce titre, elle est essentiellement soutenue par les programmes d'études amont STEREO et ERATO⁶, dont le SHOM assure la maîtrise d'ouvrage par délégation de la DGA.

3.1 Le REA acoustique

Malgré les progrès importants réalisés depuis une décennie en matière de description de l'environnement, un modèle de description physique du milieu est par construction une approximation de la réalité physique. Comme tout modèle, il peut être imprécis, incomplet ou partiellement erroné. Ce constat pose la question de connaître l'impact de cette méconnaissance sur l'exploitation des systèmes sonars sachant que la physique de la propagation est telle que sur certains paramètres, une petite erreur de modèle peut générer des écarts importants entre les performances prévues et les performances observées alors que sur certains autres paramètres, une grosse erreur de modèle peut ne générer que des écarts faibles entre les performances prévues et les performances observées. C'est de cette idée de mesurer l'impact de la méconnaissance de l'environnement qu'est né le concept de REA acoustique.

Ce concept repose sur la mesure *in situ* des performances acoustiques d'un système dont les caractéristiques intrinsèques sont proches des sonars opérationnels. En déployant le système en précurseur à des échéances proches des opérations, on peut mesurer les paramètres acoustiques qui contribuent aux performances des sonars (pertes de propagation, bruit ambiant et réverbération) afin de vérifier que le modèle d'environnement est pertinent. Si ce n'est pas le cas, c'est-à-dire si les mesures acoustiques ne sont pas conformes aux prévisions de performances

issues du modèle d'environnement, le système de REA acoustique peut permettre de modifier le modèle initial en minimisant l'écart entre les performances réelles et les performances prévues. Deux approches sont possibles :

- soit on affecte au modèle des paramètres équivalents, quitte à s'éloigner de la réalité physique ; ces paramètres équivalents sont par construction des paramètres d'environnement obtenus par inversion des données mesurées c'est-à-dire que ces paramètres sont équivalents aux paramètres d'environnement du point de vue de leur comportement acoustique ;
- soit on améliore le modèle initial en assimilant et/ou fusionnant les données du système acoustique de REA.

3.2 Voies de recherches et développements

Le but est de concevoir et réaliser un système de déploiement léger capable d'évaluer de manière discrète et exhaustive une zone de plusieurs dizaines de nautiques de coté. Une première étape a été franchie grâce au démonstrateur STEREO, qui a montré la faisabilité technique du concept. Il reste à présent à lever certains verrous.

Un premier verrou concerne la discrétion d'un tel système. Dans le cadre d'opérations militaires, le fait d'émettre des signaux, qui pouvant s'entendre à plusieurs dizaines de nautiques, sont susceptibles d'une part de dévoiler ses intentions et d'autre part de perturber d'éventuelles opérations en cours, est un frein à une éventuelle exploitation opérationnelle du concept de REA acoustique. Les techniques actuelles, qui reposent principalement sur des émissions contrôlées en niveau et en caractéristiques spectrales, devront être adaptées à l'exploitation de signaux non optimaux et de faible rapport signal sur bruit. C'est l'objet de ce qu'on désigne par tomographie discrète (Gervaise *et al.*, 2007) et qui constitue un axe majeur de recherche pour les années à venir.

Un deuxième verrou est que l'utilisation de système de mesures à bande limitée (de 900 à 2 200 hertz dans le cas de STEREO) ne permet de caractériser le milieu que par son impact acoustique dans cette bande. C'est le principe du milieu équivalent. Par exemple, une couche sédimentaire trop profonde pour être perçue à ces fréquences, ne sera pas détectée par le système STEREO mais pourrait avoir un impact fort pour des sonars travaillant plus bas en fréquence. Cette restriction peut se lever de deux façons par :

- l'étalement de la gamme de fréquence en adjoignant au système de REA acoustique des capteurs supplémentaires fonctionnant à d'autres fréquences ; on parlera de REA acoustique multicapteurs ;
- l'inclusion des mesures en bande limitée au sein d'un système de modélisation complet de l'environnement c'est-à-dire en assimilant la donnée acoustique dans un modèle d'environnement évolutif. On parlera de système global de prévision acoustique.

La définition de nouveaux concepts et méthodes pour lever les verrous exposés précédemment font l'objet de trois projets de recherche, qui vont être abordés dans la suite en les illustrant par quelques résultats.

3.3 Projets en cours

3.3.1 Le projet MODE

Si les systèmes de REA acoustique actifs peuvent être des outils efficaces et relativement aisés à mettre en oeuvre pour l'apprentissage océano-acoustique d'un théâtre, ils reposent sur l'émission dans le milieu naturel de signaux sonores à forte puissance. Le fait de travailler en actif pose trois problèmes :

- l'indiscrétion opérationnelle ; dans un contexte de crise, l'émission d'ondes acoustiques, permettant de renseigner sur le type des activités menées voire interférant avec des opérations sous-marines en cours, est un problème majeur ;
- le coût et la lourdeur de déploiement ; si la technologie des récepteurs acoustiques légers permet d'envisager des matériels de faible encombrement, les sources acoustiques très basses fréquences sont volumineuses et lourdes dès lors que l'on cherche à émettre des fortes puissances. En plus de coût à l'achat, elles nécessitent un bateau porteur, au déploiement coûteux ;
- la pollution sonore ; depuis plusieurs années, la communauté internationale met progressivement en place des mesures de réduction du bruit anthropique, réputé gênant et dans certains cas mortel pour la faune sous-marine. L'utilisation de techniques actives pourra à l'avenir être contrainte et il est de toute façon éco-responsable de minimiser leur emploi.

L'idée de lancer un programme de recherche conséquent sur la tomographie discrète est apparue dès la fin des années 90. L'idée de base, objet de travaux préliminaires au SHOM et à l'ENSIETA, était notamment d'utiliser les techniques temps - fréquences pour estimer en aveugle (i.e. sans maîtrise des émissions) la réponse impulsionnelle du milieu. Ces idées ont été finalisées au sein du projet STEREO sous la forme d'un partenariat entre le SHOM et l'ENSIETA et le concours de TELECOM Bretagne et du GIPSA-Lab. Ce projet, baptisé MODE (Méthodes d'Observation Discrète de l'Environnement), porte sur l'ensemble des concepts de tomographie passive et discrète.

3.3.1.1 Tomographie active discrète

La tomographie active discrète garde la possibilité d'utiliser une source acoustique maîtrisée. Pour assurer la discrétion, la source doit permettre d'émettre soit des signaux pouvant leurrer un observateur adverse (par exemple en réémettant une copie de vocalises entendues sur zone), soit d'émettre des signaux "inaudibles" (signaux codés émis à faible niveau). Les travaux réalisés dans MODE ont permis de démontrer la faisabilité de ces approches par la mise au point et le test de techniques de synthèse numérique de signaux naturellement présents dans le milieu (Cros *et al.*, 2005) ou l'utilisation de signaux codés sous le niveau de bruit ambiant (Rabaste et Chonavel, 2007). Dans les deux cas, le problème se ramène à un problème de tomographie active dont l'approche inverse doit néanmoins s'adapter à des caractéristiques de signaux contraints par un niveau d'émission faible ou par des caractéristiques spectrales non optimales (recopie de vocalises par exemple).

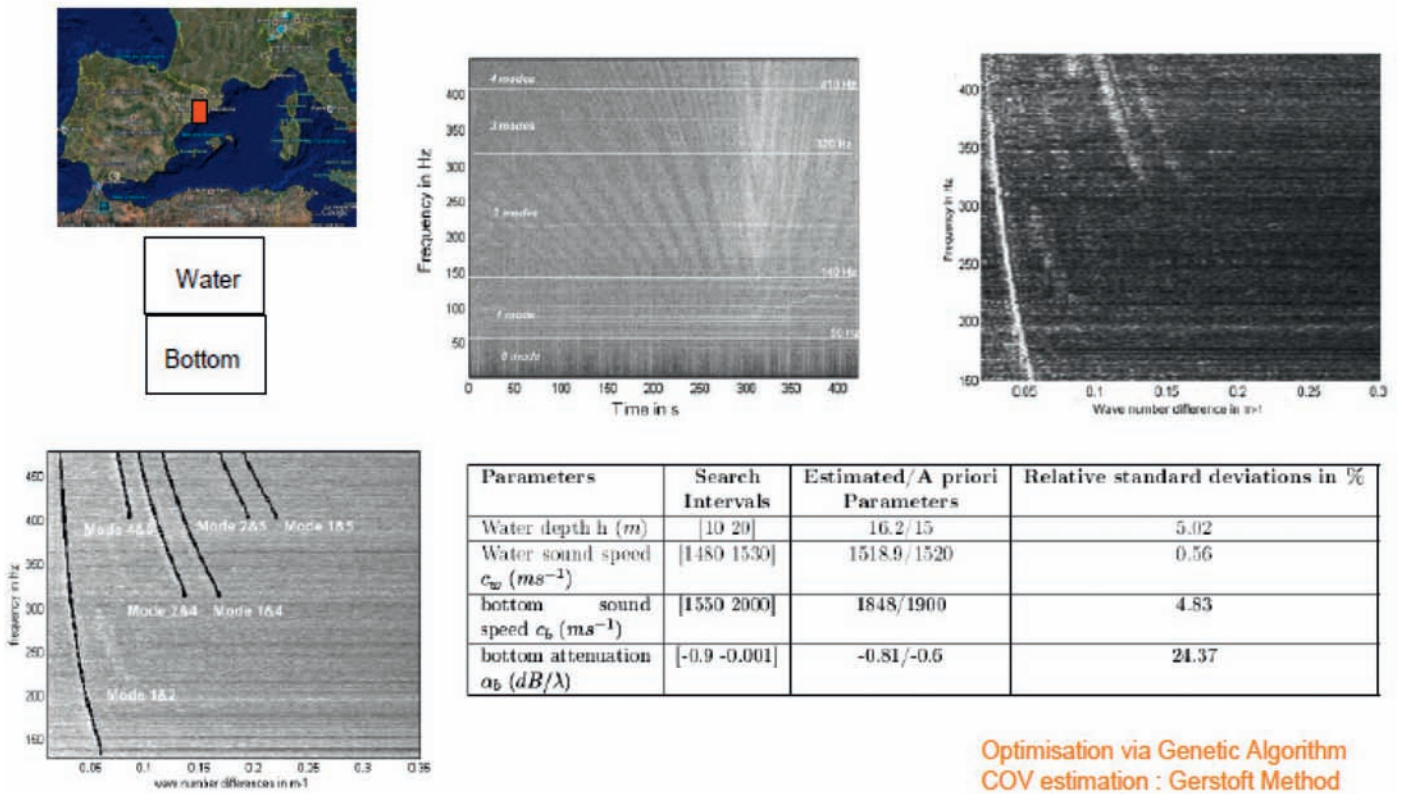


Figure 5 : Inversion d'un canal très petits fonds à partir du bruit rayonné par des bâtiments coopérants (Vallez *et al.*, 2007). Le diagramme temps - fréquence d'un navire en rapprochement est transformé en courbe "fréquence – nombre d'onde relatif". L'interprétation des courbes de dispersion modales permet de remonter aux paramètres du milieu.

3.3.1.2 Tomographie passive

La tomographie passive utilise les sources dites d'opportunité, qui peuvent être des émissions sonars extérieures, des transitoires (vocalises de mammifères marins, craquement de glaces, déferlantes,...), des bruits rayonnés par des navires en mouvement (bruits large bande ou raies spectrales) ou encore du bruit ambiant. On peut distinguer deux types de tomographie passive :

- la tomographie autonome ; le système de tomographie doit détecter, caractériser et localiser les sources de manière autonome. C'est le niveau de complexité le plus élevé. Cela nécessite en particulier d'être capable de détecter et caractériser des sources d'opportunité. Ce point a été traité dans le projet MODE, qui a notamment permis le développement de techniques d'estimation à base d'opérateurs de transformation (voir par exemple Ioana *et al.*, 2006) ;
- la tomographie assistée ; on apporte une aide au système de tomographie soit pour détecter, soit pour caractériser, soit pour localiser les sources (par exemple en utilisant le bruit rayonné par un bâtiment coopérant, dont on connaît la position et/ou les raies spectrales caractéristiques). Ainsi, un des axes explorés dans le projet MODE a démontré que l'on pouvait estimer les paramètres du guide d'onde océanique par petits fonds par inversion du bruit rayonné en large bande par des bâtiments coopérants (Vallez *et al.*, 2007, figure 5).

3.3.2 Le projet CALIMERO

Le premier objectif des systèmes de REA acoustique est de caractériser le milieu par son impact acoustique. Cet objectif se décline par la restitution de "milieux acoustiquement équivalents" c'est-à-dire des milieux qui par construction "collent" à la réalité de la propagation acoustique ("vérité sonar") mais pas forcément à la réalité géophysique ("vérité terrain"). L'inconvénient de cette approche est que ces milieux équivalents ont un domaine de validité restreint aux systèmes utilisés et ne sont pas *a priori* pertinents en cas de changement de systèmes (changement de gamme de fréquence, par exemple). En fait, ce constat ne s'applique pas seulement à un système de REA acoustique mais à l'ensemble des moyens de mesures acoustiques utilisées en caractérisation géophysique (imagerie acoustique, sondeurs de sédiments, systèmes de sismiques,...). En effet, aucun système acoustique pris individuellement ne permet une caractérisation complète des fonds puisque chaque système ne permet de remonter qu'à une description du fond dans son propre spectre d'utilisation. Par exemple, un imageur acoustique, qui exploite la réponse du sédiment à un signal à haute fréquence, ne permet qu'une caractérisation du sédiment superficiel. De manière plus générale, les systèmes exploitent des phénomènes physiques éventuellement différents (réflexion et réverbération en particulier) qu'il est difficile de relier entre eux mais qui apportent une grande complémentarité des observations (figure 6). C'est la

recherche de l'exploitation de cette complémentarité pour aboutir à une représentation unique et cohérente du milieu sédimentaire qui a donné naissance au projet CALIMERO (CALibration des METHodes de Reconnaissance des fonds Océaniques), initiative conjointe du SHOM et de l'Ifremer.

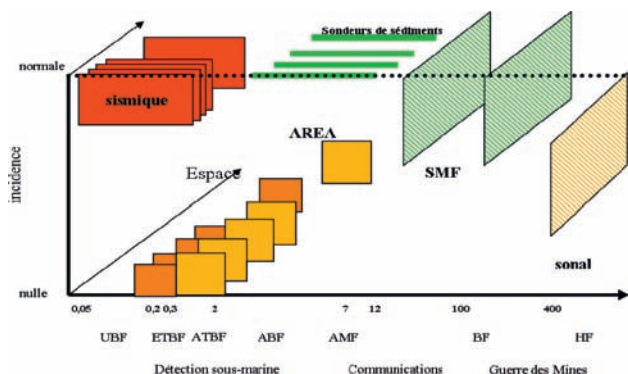


Figure 6 : Couverture de l'espace fréquence – incidence par les différentes familles de systèmes acoustiques. On peut distinguer trois grandes familles : les systèmes sismiques qui exploitent les incidences normales des ultra aux basses fréquences, les systèmes de REA acoustique (AREA) qui exploitent les incidences rasantes aux très basses fréquences et les imageurs acoustiques qui travaillent à haute fréquences.

Le projet CALIMERO (Lurton et Le Gac, 2004) vise à terme l'utilisation conjointe de plusieurs systèmes acoustiques, de caractéristiques fréquentielles différentes et de concept d'emploi complémentaires. Il s'agit de développer des méthodes permettant :

- l'intervalidation des données : il faut s'assurer que les systèmes différents ne conduisent pas à des représentations contradictoires des fonds ;
- la fusion des données : les données issues des différents capteurs, ou les informations relatives au fond issues de leur traitement, doivent être fusionnées pour enrichir le modèle sédimentaire au final ;
- l'extrapolation : en l'absence d'un système de mesures, on doit pouvoir extrapoler les observations d'un autre système afin de compléter le modèle sédimentaire obtenu.

Une première expérience pilote a été réalisée par le SHOM et l'Ifremer en 2004 et 2005. Les travaux ont consisté en un levé exhaustif de trois zones situées dans le golfe du Lion. Tous les moyens acoustiques disponibles au SHOM et à l'Ifremer, complétés par le sonar latéral Klein du GESMA ont été utilisés (figure 7).

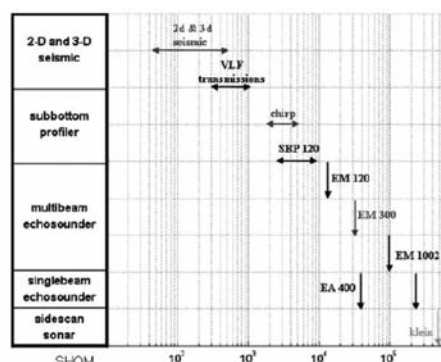
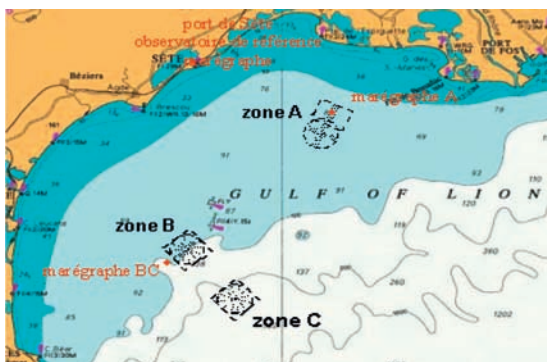


Figure 7 : Zones de levé (à gauche) et instrumentation mise en œuvre (à droite) lors de la campagne CALIMERO.

Les travaux, qui à ce jour ont principalement porté sur l'estimation des paramètres géoacoustiques et la comparaison des méthodes d'inversion pour les différents capteurs, ont montré l'intérêt d'exploiter la complémentarité des capteurs. En effet, les levés par les différents moyens acoustiques se complètent parfaitement. Sur l'exemple de la figure 8, la zone de levé peut ainsi se caractériser par trois régions ; la première région, au sud-est de la zone, est une zone à faible réflectivité (sédiments mous) ; au centre de la zone, une zone sableuse à ridules et enfin une ligne à l'ouest de la zone correspondant à la roche de Sète, affleurement rocheux. Les résultats des traitements montrent que la zone sédimentaire au sud est visible sur l'ensemble des capteurs ; ce n'est pas le cas de la roche de Sète, qui n'est pas visible sur l'imagerie haute fréquence. On peut noter également que la roche de Sète et la zone sédimentaire au sud signent de la même façon sur la réflectivité au sondeur de sédiment (image de droite) mais que l'inversion géoacoustique met en évidence des vitesses de compression très différentes (levé de l'ambiguïté). On peut également noter que la zone de ridules n'est visible qu'à l'imagerie SMF, de résolution décimétrique. Une discussion détaillée de ces comparaisons peut être trouvée en (Theuillon *et al.*, 2007, Theuillon *et al.*, 2008).

Un autre axe de recherche du projet CALIMERO a porté sur la mise au point de méthodes d'estimation des paramètres géoacoustiques (vitesses et atténuation de compression) du milieu à partir des approches sismiques légères. Ces travaux ont notamment reposé sur l'exploitation conjointe des données de sondeurs de sédiments et des techniques d'inversion géoacoustique. En effet, le sondeur de sédiment permet de détecter des couches sédimentaires et d'évaluer l'atténuation des ondes acoustiques. Par contre, il n'est pas possible de remonter directement aux vitesses de compression. A l'inverse, les techniques d'inversion géoacoustique permettent d'obtenir ces vitesses de compression mais restent peu sensibles aux coefficients d'atténuation. Deux approches ont été développées. La première, développée par (Theuillon *et al.*, 2008), permet d'obtenir les coefficients d'atténuation par une technique de rapport de spectres. La seconde, développée par (Plantevin *et al.*, 2009), exploite les réflexions acoustiques sub-critiques dans le sédiment. Elle repose sur l'écoute au point fixe sur un hydrophone de signaux émis par une source à très basse fréquence (inversion géoacoustique). La figure 9 présente une synthèse des résultats au point où était mouillée l'antenne acoustique TELEMAQUE.

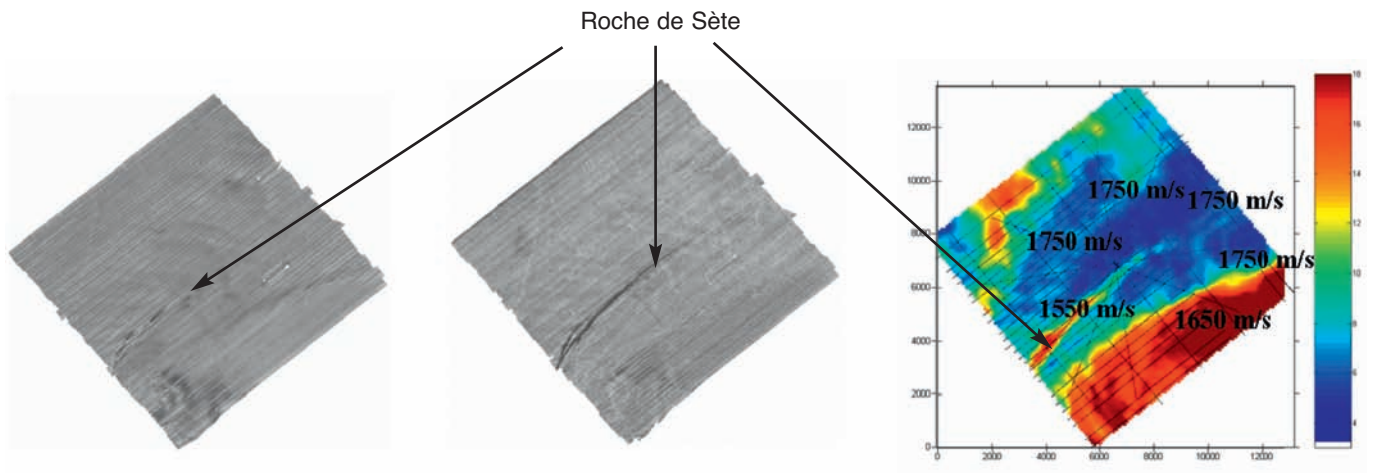


Figure 8 : Mise en évidence de la complémentarité des capteurs acoustiques ; à gauche, image de la zone B obtenue par SMF à 100 kHz ; au centre, même image à 12 kHz ; à droite, carte de réflectivité obtenue par sondeur de sédiment et estimation des vitesses de compression par inversion géoacoustique TBF.

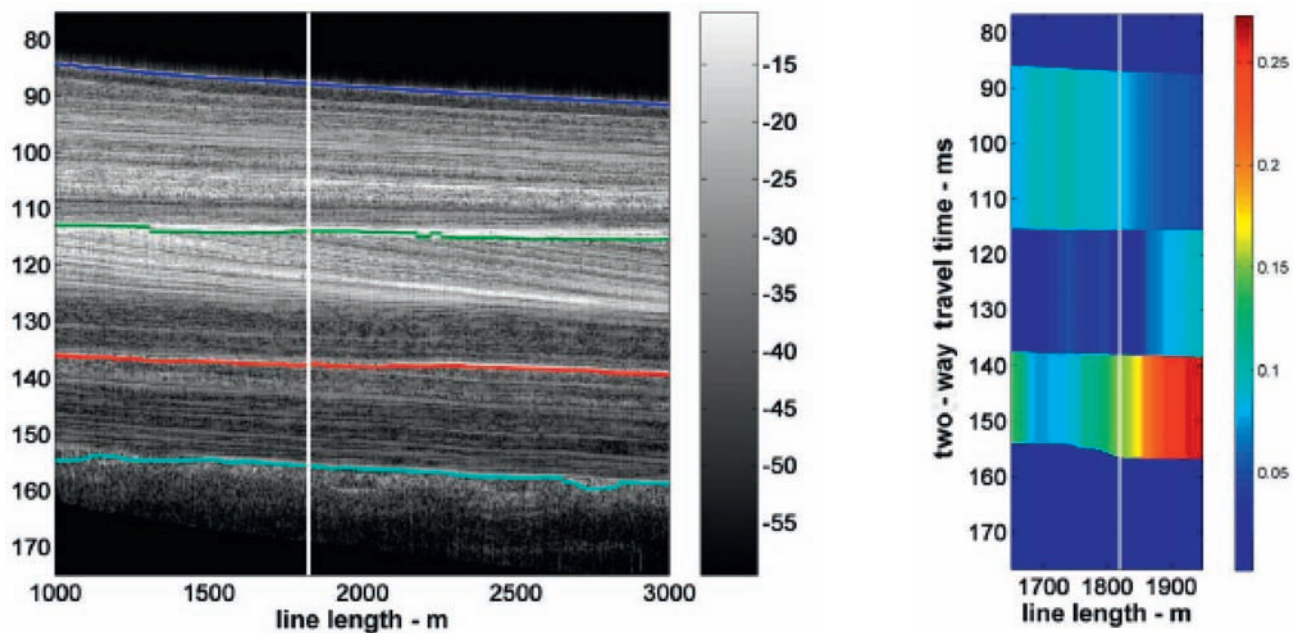


Figure 9 : Caractérisation géoacoustique par approches sismiques légères. L'image de gauche montre le signal reçu par le SBP120 sur une radiale de 2 000 mètres autour de l'antenne de réception acoustique. L'image montre les coefficients d'atténuation au voisinage du point de mesure par la méthode de rapport de spectre (Theuillon *et al.*, 2008). Les épaisseurs des couches sédimentaires et leur vitesse de compression sont obtenues par inversion géoacoustique (Plantevin *et al.*, 2009).

3.3.3 Le projet SIGMAA

Un des inconvénients majeurs des approches inverses en tomographie par petits fonds est que les méthodes utilisées sont le plus souvent des méthodes méta-heuristiques (MH), fondées sur la simulation, souvent très dépendantes du problème considéré. En particulier, ces méthodes nécessitent d'être mises en oeuvre à chaque nouvelle donnée. Si l'on considère un problème ponctuel d'inversion géoacoustique, ces approches sont très satisfaisantes. Pour du levé de zone, qui nécessite de déplacer souvent les capteurs ou d'exploiter le mouvement de ceux-ci, les méthodes méta-heuristiques peuvent se révéler lourdes et au final peu adap-

tées. Une alternative aux méthodes MH est l'inversion variationnelle par modélisation adjointe (Le Gac, 2003). L'idée sous-jacente est d'appliquer au problème de l'inversion géoacoustique les techniques de modélisation adjointe classiquement utilisées en océanographie. La résolution du problème inverse de tomographie par des méthodes variationnelles utilisant l'opérateur adjoint du modèle acoustique présente en effet un triple intérêt :

- par opposition aux méthodes MH, elle propose un formalisme mathématique rigoureux pour l'inversion, formalisme qui est généralisable à tout type d'environnement (fond variable, colonne d'eau,...) que ce soit en inversion ou en assimilation de données ;

- elle permet plus facilement et plus rigoureusement d'inclure la physique des phénomènes, l'information *a priori* sur le milieu et la dynamique des observations ;
- elle minimise le recours à la simulation du problème direct, ce qui réduit notablement les temps de calcul.

Montrer la faisabilité d'une approche systémique de l'inversion géoacoustique par modélisation adjointe a fait l'objet du projet de recherche SIGMAA (Système d'Inversion Géoacoustique par Modélisation Adjointe Automatique), collaboration entre le SHOM, l'Université Pierre et Marie Curie, l'Université Jules Verne de Picardie et l'Université Libre de Bruxelles.

Les travaux menés dans le cadre du projet SIGMAA ont permis d'apporter la démonstration qu'une approche adjointe, basée sur des équations de la propagation d'ondes acoustiques, peut fournir une base mathématique commune pour la résolution de problèmes inverses en acoustique sous-marine tant pour l'inversion géoacoustique (paramètres du fond marin) que pour la tomographie acoustique (paramètres de la colonne d'eau). L'approche développée exploite un modèle général de la propagation (modèle WAPE, équation parabolique grand angle avec conditions aux frontières non locales) pour lequel un adjoint semi-automatique, obtenu par le générateur d'adjoint YAO (Nardi *et al.*, 2009) a été développé en se basant sur la théorie des graphes modulaires (Hermand *et al.*, 2006b). Ce modèle direct permet de faire intervenir explicitement les paramètres acoustiques de la colonne d'eau et du fond dans la résolution du problème inverse (gradient de la fonction de coût obtenu par rétro-propagation). Le développement et la validation d'un schéma d'optimisation conjointe sur un nombre arbitraire de fréquences permettent d'obtenir des résultats robustes (Hermand *et al.*, 2006a, Hermand *et al.*, 2006c) et pouvant être *a priori* aisément implémentés sur des calculateurs parallèles.

Cette méthodologie adjointe a pu être appliquée avec succès à l'environnement complexe de la campagne Yellow Shark de 1994 (YS94) menée par le NATO Undersea Research Center (NURC) au sud de l'île d'Elbe (par exemple Hermand, 1999). La figure 10 montre les résultats obtenus sur ces don-

nées réelles (Meyer *et al.*, 2007) pour trois paramètres géoacoustiques. Les résultats, ainsi que de nombreux autres non repris ici (par exemple Badran *et al.*, 2008) montrent que la méthode permet une inversion précise des paramètres géoacoustiques et du profil de célérité. Comme toute méthode locale, elle reste cependant dépendante des conditions initiales (solutions *a priori*). Pour que l'inversion converge vers le minimum global, il est nécessaire que la connaissance *a priori* apportée au système soit suffisamment proche de la solution réelle.

3.4 Discussion et perspectives

La mise au point des techniques d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique et leur intégration dans des systèmes intégrés constituent l'axe principal des recherches conduites au SHOM dans le domaine de l'océanographie acoustique. Si la démonstration du concept de REA acoustique actif est faite, il faut poursuivre dans la recherche de solutions techniques et technologiques permettant d'envisager à moyen terme un emploi opérationnel. Cette préoccupation a permis de définir pour les années à venir les thèmes de recherche qui seront conduits. En particulier, les techniques de tomographie côtière doivent être enrichies par des visions complémentaires afin d'aboutir à une caractérisation physique de l'environnement. Cet enrichissement pourra se faire par des techniques de fusion d'observation multicapteurs (cf. CALIMERO) et par des techniques d'inclusion au problème inverse de la physique de l'environnement (assimilation de données acoustiques dans les modèles physiques). Une fois mise au point, ces techniques devront s'appliquer à des concepts d'emploi opérationnel réalistes. Des techniques de caractérisation du milieu devront s'adapter aux concepts émergents d'observatoires côtiers aux techniques de collecte et de diffusion des données (réseau d'observation, AUV) et aux contraintes associées à cette collecte (non intrusion, non pollution sonore,...). Ces axes de recherches font l'objet du programme d'études amont ERATO en cours au SHOM.

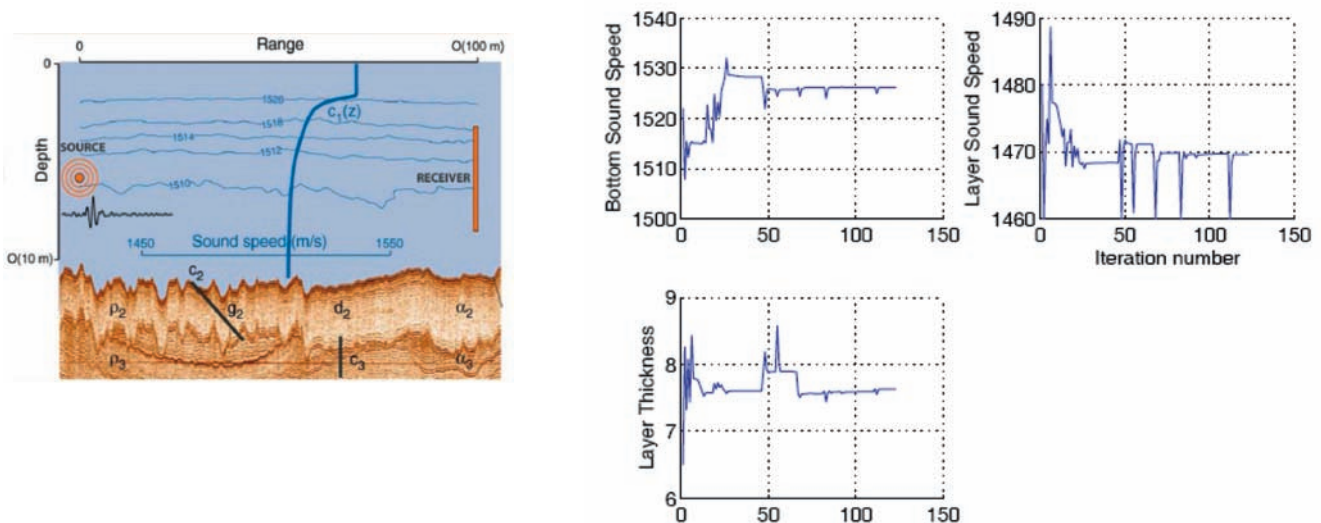


Figure 10 : Environnement de la campagne Yellow Shark'94 (Hermand, 1999) et inversion des paramètres géoacoustiques par application de la méthodologie adjointe aux données réelles de la campagne YS'94 (huit hydrophones en réception).

4. CONCLUSION ET PESPCTIVES

Le SHOM a développé une compétence en acoustique sous-marine essentiellement pour les applications d'observations du milieu par techniques acoustiques (tomographie acoustique). Cette compétence s'est par la suite étoffée à l'impact de l'environnement sur les sonars afin de mieux répondre au besoin de la marine en matière de prévision et d'exploitation des performances de sonars de détection sous-marine. Plus récemment, le SHOM s'est vu confier la gestion opérationnelle des bases de données de bruit ambiant à des fins de production et de prévision opérationnelle de cette grandeur pour les forces navales. Le SHOM dispose d'une expérience forte d'une vingtaine d'années d'études et recherches en océanographie acoustique. Cette expérience s'est enrichie par de nombreuses expérimentations, souvent en partenariat avec des organismes et laboratoires étrangers civils ou militaires. Si ces expertises s'exercent principalement pour les besoins militaires, elles ont aussi vocation à être valorisées pour les problématiques duales. Alors que l'acoustique sous-marine a souvent été l'affaire de sonaristes, des nouvelles applications civiles émergent pour la gestion intégrée des ressources et la surveillance des écosystèmes. La tomographie discrète, qui peut permettre un monitoring permanent, non intrusif de certaines zones sensibles ou protégées comme les parcs marins, peut apporter des réponses adaptées au besoin. De manière plus générale, on semble bien loin d'avoir exploité tout le potentiel des techniques d'observation acoustique du milieu, comme en témoigne la variété des applications potentielles abordées lors du séminaire SERENADE.

BIBLIOGRAPHIE

- BADRAN F., BERRADA M., BRAJARD J., CRÉPON M., SORROR C., THIRIA S., HERMAND J-P., MEYER M., PERICHON L., ASCH M. (2008): "Inversion of satellite ocean colour imagery and geoacoustic characterization of seabed properties: Variational data inversion using a semi-automatic adjoint approach". *Journal of Marine Systems* (vol. 69, 126–136).
- CROS L., IOANA C., QUINQUIS A. (2005): "Synthesis from underwater data: application to the oceanic discrete tomography". *Proc. of IEEE OCEANS'05* (vol. 1, 507- 510).
- GROUSSON R. (1955) : "La propagation du son dans le chenal sonore". *Annales Hydrographiques* (4^e série, tome 6, p. 353-369).
- GERVAISE C., VALLEZ S., STÉPHAN Y., SIMARD Y. (2007): "Passive acoustic tomography: an efficient way to reduce acoustic emission in tomographic process - review, new concept & applications using marine mammals vocalises". *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom* (87, 5-10).
- HERMAND J-P. (1999): "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* (24 (1), 41–66).
- HERMAND J-P., MEYER M., ASCH M., BERRADA M. (2006a): "Adjoint-based acoustic inversion for the physical characterization of a shallow water environment". *Journal of the Acoustical Society of America* (119 (6), 3860-3871).
- HERMAND J-P., MEYER M., ASCH M., BERRADA M., SORROR C., THIRIA S., BADRAN F., STÉPHAN Y. (2006b): "Semi-automatic adjoint PE modelling for geoacoustic inversion". *Seventh International Conference on Theoretical and Computational Acoustics* (E.C. Shang, D. Lee, A. Tolstoy and Y.C. Teng, editors, Seventh International Conference on Theoretical and Computational Acoustics).
- HERMAND J-P., MEYER M., ASCH M. et BERRADA M. (2006c): "Adjoint-based shallow water tomography with partially known bottom properties". In *Proc. of OCEANS '06 Asia Pacific, IEEE*.
- IOANA C., QUINQUIS A., STÉPHAN Y. (2006): "Feature extraction from underwater signals using time-frequency warping operators". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* (vol. 31, 3, 628-645).
- LACOMBE H. (1946) : "La propagation du son dans ses rapports avec le repérage radio-électrique". *Annales Hydrographiques* (3^e série, tome 18, p. 71-90).
- LE GAC J-C. (2003) : "Deux approches de l'inversion géoacoustique : inversion par signaux large bande et approche variationnelle". Thèse de l'Université de Toulon-Var.
- LURTON X. et LE GAC J-C. (2004): "The CALIMERO project: Scientific objectives and first at-sea results". In *Situ Seabed Characterization*. (Proc. 1st Sea Tech. Week, Brest, France).
- MEYER M., HERMAND J-P., BERRADA M. et ASCH M. (2007): "Adjoint-based monitoring of environmental parameters in shallow water areas". *Proceedings of the 2nd International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results* (J. S. Papadakis and L. Bjorno, eds.), IACM/FORTH.
- MOREL Y. (2010) : "Les axes de recherche au SHOM". *Annales Hydrographiques* (vol. 6, n° 775, p 2.1-2.28).
- MUNK W., WUNSCH C. (1979): "Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring". *Deep-Sea Research*, (26A, p. 123-161).
- NARDI L., SORROR C., BADRAN F., THIRIA S. (2009): "YAO: A Software for Variational Data Assimilation Using Numerical Models" in *Computational Science and Its Applications* (2, 621-636).
- RABASTE O., CHONAVEL T. (2008) : "Estimation du canal acoustique sous-marin pour la tomographie acoustique par petits fonds". *Traitement du signal* (vol. 25, n° 1-2, pp. 139-150).
- PLANTEVIN P., LE GAC J-C., AUGER E., THEUILLON G., STÉPHAN Y. (2009): "A joint seismo-geoacoustic inversion in shallow water using a subsurface towed sound source". *Journal of Marine Systems* (78, S321-S332).

STÉPHAN Y. (1998) : "Fiche d'exploitation des données acoustiques de la campagne GASTOM90". Fiche technique 06/EPHOM/CMO/OCA/.., Service hydrographique et océanographique de la marine (37 pages).

STÉPHAN Y., DEMOULIN X., FOLÉGOT T., JESUS S., PORTER M., COELHO E. (2000): "Acoustical effects of internal tides on shallow water propagation: An overview of the INTIMATE96 experiment" in *Experimental Acoustics Inversion Methods for Exploration of the Shallow Water Environment* (Caiti, Hermand, Jesus and Porter (eds.), KLUWER, 19-38).

STÉPHAN Y. (2010) : "La tomographie acoustique océanique : technique du passé ou de l'avenir ?" (dans ce même numéro).

STÉPHAN Y., GERVAISE C. et LIRET C. (2010) : "Surveillance, étude et reconnaissance de l'environnement par acoustique discrète : le séminaire SERENADE" (dans ce même numéro).

THEUILLON G., STÉPHAN Y., LURTON X. (2007): "Multisensor geoacoustic inversion applied to the CALIMERO experiment in the gulf of Lion". *Proc. Underwater Acoustic Measurement*, Heraklion, Grèce.

THEUILLON G., STÉPHAN Y., PACAULT A. (2008): "High resolution characterization of the sea floor using a subbottom profiler in the gulf of Lion". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, (vol. 33, 3, 240-254).

VALLEZ S. GERVAISE C., KENCHAF A., STÉPHAN Y., ANDRÉ M. (2007) : "Inversion géoacoustique d'un canal par très petits fonds: traitement incohérent". *Traitement du Signal* (25, n° 1, 151-163).