

Le Sonar à Antenne Synthétique (SAS), application à la guerre des mines

Maud Amate

Groupe d'Études Sous-Marines de l'Atlantique (DGA/
GESMA)
BP 42
29240 Brest Armées
E-mail : maud.amate@dga.defense.gouv.fr

Alain Hétet

Groupe d'Études Sous-Marines de l'Atlantique (DGA/
GESMA)
BP 42
29240 Brest Armées
E-mail : alain.hetet@dga.defense.gouv.fr

Michel Legris

Laboratoire E3I2EA3876
ENSIETA
2 rue F. Verny
29800 Brest CEDEX 9
E-mail : michel.legris@ensieta.fr

Résumé

Cet article propose d'étudier l'avancée représentée par la synthèse d'ouverture dans l'imagerie acoustique appliquée à la lutte contre les mines. En effet, cette technique repose sur l'utilisation de sonars actifs et de leur trajectoire afin de constituer une image de haute résolution du fond marin et des objets qui s'y trouvent. Après avoir balayé la problématique de l'imagerie acoustique, la première partie de l'article présentera un bref historique de la synthèse d'ouverture. Une seconde partie abordera les questions propres au traitement d'antenne synthétique comme la nécessité de la compensation des mouvements du sonar et la formation de l'image. Enfin, nous aborderons l'utilisation de basses fréquences (de 1 à 80 kHz) associées à cette technique pour imager les objets enfouis dans les premiers mètres de sédiments. De nombreuses données réelles acquises en mer appuieront ces propos.

Abstract

This article proposes to study the synthetic aperture sonar (SAS) and the improvements it allows in acoustic imagery for mine countermeasures. Indeed, this technique uses active sonars and their trajectory to form a high resolution image of the seabed. After a short overview on underwater acoustic imagery, this paper will present a brief history of the synthetic aperture technique. Then, some questions relative to synthetic aperture algorithms will be discussed. Among them, we will focus on the motion compensation requirement as well as the beamforming techniques. Finally, we will present the use of SAS imagery in low frequencies (from 1 to 80 kHz) to detect objects buried in the first layer of sediment. Real data acquired at sea will illustrate this argumentation.

L'imagerie acoustique, les enjeux

La perception dans le milieu aquatique est un enjeu à la fois civil et militaire. En effet, l'exploration du milieu sous-marin est primordiale pour les grands groupes pétroliers, l'hydrographie et l'océanographie. Dans le même temps, la connaissance des fonds marins est indispensable au déploiement de navires lors de conflits. Afin de répondre à ces attentes et d'imager le fond marin, les moyens optiques ne sont pas des outils idéaux, les ondes électromagnétiques se propageant très difficilement dans le milieu aquatique. Les ondes acoustiques se sont rapidement imposées dans le domaine de la détection sous-marine grâce à leur pouvoir de propagation plus important. Les systèmes sonar (SOund Navigation Ranging) sont donc devenus des moyens privilégiés de cartographie de l'environnement sous-marin.

Le sonar actif à vision latérale, concept très utilisé en imagerie sous-marine, est apparu à la fin des années 50. Ce système permet d'obtenir une représentation de l'environnement (Fig. 1). Comme toute autre image, le critère de qualité d'une image sonar est sa résolution, permettant ainsi de voir avec précision les objets présents sur le fond marin. Par contre, ce qui est spécifique à l'imagerie sonar c'est l'utilisation des ombres acoustiques pour reconnaître ces objets. De

plus, la qualité d'un système de levé de fond réside dans sa capacité à couvrir rapidement une zone donnée. Son taux de couverture est donc un paramètre primordial. Pour améliorer ces deux paramètres, des recherches sont actuellement menées afin de perfectionner les techniques d'imagerie sonar. La technique du sonar à ouverture synthétique fait partie de ces nouveautés.



Fig. 1 : Exemple d'image du fond marin obtenue avec un sonar latéral haute résolution. Basse Hermine, au nord de Camaret, Brest

La synthèse d'ouverture, historique et principes

L'histoire du sonar à ouverture synthétique est très étroitement liée à celle du radar. En effet, les premiers développements de la synthèse d'ouverture ont été menés en imagerie radar aéroporté (SAR : Synthetic Aperture Radar) dans les années 1950 puis en imagerie satellite. Le premier satellite équipé d'un radar à antenne synthétique est lancé en 1978. Dans ce domaine, les applications civiles et militaires ont obtenu une

amélioration de la couverture de zone combinée à une cellule de résolution plus fine. Le succès de la synthèse d'ouverture dans ces domaines l'a rendue indispensable à l'obtention d'images haute résolution des sols et il est à l'origine de l'engouement de ces dernières années quant à l'application d'une telle technique en imagerie sonar [1].

Les premières études en sonar à antenne synthétique (SAS) datent des années 1970 avec différents brevets [2][3][4], et articles sur la théorie du SAS par Cutrona en particulier en 1975 [5] et 1977 [6]. La figure 2 illustre le principe du traitement SAS.

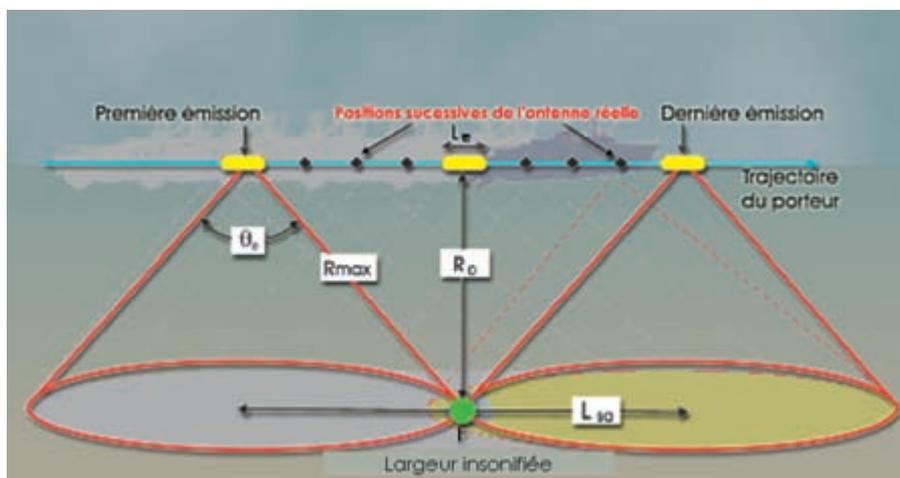


Fig. 2 : Schéma de principe du traitement d'antenne synthétique

La formation de voie synthétique consiste en l'intégration cohérente des voies sonar le long de la trajectoire afin d'obtenir une longueur d'antenne synthétique plus grande que la longueur d'antenne réelle. La longueur d'antenne étant inversement proportionnelle à la résolution atteignable, plus cette antenne est longue, meilleure est la résolution (voir encadré).

Les formules de base liées au traitement SAS :

$$L_{ERA} = 2L_{sa} = 2(N_{sa} - 1)vT_{rec} + L_r$$

$$\delta = \frac{R_0 \lambda}{L_r}$$

$$\delta_{sa} = \frac{R_0 \lambda}{L_{ERA}} = \frac{R_0 \lambda}{2L_{sa}}$$

$$g = \frac{L_{ERA}}{L_r} = \frac{2L_{sa}}{L_r} = \frac{\delta}{\delta_{sa}}$$

L_{sa} : longueur d'antenne synthétique
 L_r : longueur d'antenne réelle
 L_{ERA} : longueur de l'antenne physique de réception équivalente à l'antenne synthétique formée
 N_{sa} : nombre de récurrences à intégrer
 v : vitesse du porteur
 T_{rec} : période de récurrence
 R_0 : distance d'observation
 δ : résolution en azimut pour un sonar latéral
 λ : longueur d'onde
 δ_{sa} : résolution en azimut après traitement d'antenne synthétique
 g : gain d'antenne synthétique

Comparaison de différents systèmes SAS étudiés par le GESMA

Type de support	Rail	Rail	Sonar remorqué	Sonar de coque sur navire
Fréquence	14 - 20 kHz	110 - 180 kHz	90 - 110 kHz	15 - 25 kHz
L_r	39 cm	27 cm	96 cm	78 cm
δ_r (m)	5 @ 25 m	1,8 @ 50 m	0,8 @ 50 m	3,5 @ 35 m
δ_{sa} atteinte (m)	0,10 @ 25 m	0,04 @ 50 m	0,07 @ 50 m	0,2 @ 35 m
Gain g	50	45	13	17
v	0,12 ms ⁻¹	0,01 ms ⁻¹	1 ms ⁻¹	1 ms ⁻¹

En pratique, cette antenne sonar dépend d'un porteur dont les mouvements de roulis, tangage, lacet, cavalement, embardée et pilonnement vont rendre plus difficile l'intégration le long de la trajectoire.

Les premières expérimentations en mer ont été menées dans la fin des années 1980 et le début des années 1990. Parmi ces essais, sous couvert d'un projet européen, Manell Zakharia a mené des expérimentations avec le sonar à antenne synthétique basse fréquence ACID/SAMI. Fonctionnant autour de 8 kHz, ce sonar de surveillance grand fond a donné des résultats intéressants explicités dans [7]. Dans le même temps, on note les travaux de P. Gough et M. Hayes de l'université de Canterbury en Nouvelle-Zélande avec un prototype de SAS monté sur un « poisson » remorqué (KIWI-SAS) [8]. Ce sonar émettait alors dans deux bandes de fréquence : 20 – 50 kHz et 80 – 100 kHz. En France, des expérimentations débutent en 1994 sur un rail sous-marin dans la rade de Brest.

Par ailleurs, le milieu marin et l'utilisation de l'onde sonore rendent la synthèse d'ouverture plus délicate en sonar qu'en radar. Plusieurs solutions ont été apportées afin, d'une part, de minimiser l'influence des perturbations de trajectoire du porteur d'antenne et, d'autre part, dans le but d'augmenter le taux de couverture. Dès lors, de nombreuses expérimentations ont été effectuées afin de mettre au point des algorithmes de focalisation et de compensation de mouvements. On note notamment, dans les années 1990, les travaux du CSS (Coastal Systems Station) aux États-Unis avec le sonar HF/LF SAS ayant deux bandes de fréquence de travail : 10 – 30 kHz et 165 – 195 kHz [9].

Au cours des différentes expérimentations, l'utilisation d'antennes de réception multi hydrophones a suscité une nouvelle approche. En effet, l'utilisation de la cohérence entre paires d'hydrophones pour des pings successifs permet d'estimer la trajectoire du porteur. Parmi les techniques développées, on note celle de Thales Underwater Systems (TUS) en France : le P2C2 (Ping-to-Ping Cross-Correlation)[10]. De même, une technique de micronavigation appelée DPC (Displaced Phase Centre) a été présentée par le NURC (NATO Undersea Research Centre) dans les années 2000 [11]. L'évolution technologique des systèmes de positionnement parallèlement au développement d'algorithmes d'autofocalisation apporte cependant un peu plus de liberté dans les mouvements du système SAS.

Des résultats décisifs

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats de traitement obtenus par le GESMA lors de différentes campagnes d'essais en mer. En 1999, le GESMA, en coopération avec le centre de recherche anglais DERA, a mis en œuvre un sonar à antenne synthétique (SAS) sur un rail sous-marin en rade de Brest. Cette campagne mettait en œuvre un sonar ayant une fréquence centrale de 150 kHz avec une bande de 60 kHz donc une longueur d'onde moyenne de 1 cm. La figure 3 présente une image résultat de cette campagne. La résolution atteinte est de 4 cm à 50 m de distance (au lieu de 1,8 m avec l'antenne physique) [12].

La volonté d'aller vers un système plus opérationnel et réaliste est illustrée par plusieurs essais en mer avec des SAS montés sur des porteurs réels. En 1997, des essais ont été réalisés en baie de Douarnenez [13] avec un robot téléopéré muni d'un



Fig. 3 : Exemple d'image de trois maquettes de mines modernes obtenue à 55 m. Zone de 15 m x 10 m. {Support GESMA, données DERA, traitement ENSIETA/GESMA}

sonar. La figure 4 présente une image obtenue lors de cette campagne avec une fréquence centrale de 405 kHz et une bande de 12 kHz. On y voit une sphère d'un mètre de diamètre posée sur le fond avec une résolution de 36 cm.

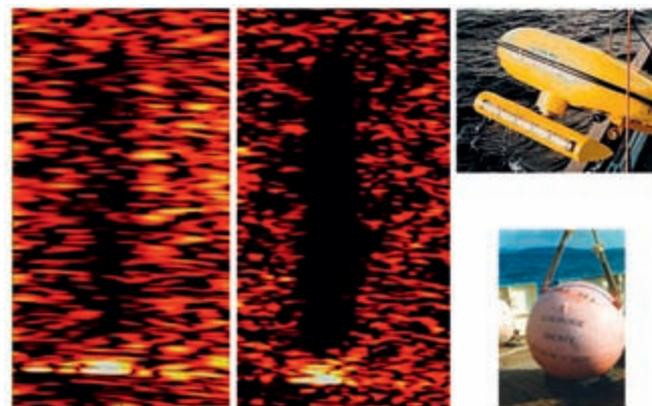


Fig. 4 : Exemple d'image de sphère obtenue avec un SAS monté sur un robot téléopéré. De gauche à droite, image sans traitement SAS, image après intégration sur 8 pings et compensation de mouvement, photos représentant le robot et la cible imagée

Une campagne réalisée par le NURC en 2000 est un autre exemple de système plus réaliste. Le sonar à antenne synthétique était remorqué et fonctionnait dans la bande de fréquence 90 - 110 kHz. La figure 5 présente une image résultat de cette campagne. La résolution atteinte est de 7 cm à 50 m (au lieu de 80 cm en antenne physique). Cette fois, les algorithmes développés prenaient plus finement en compte des mouvements du porteur [14].



Fig. 5 : Exemple de 6 objets obtenus avec un sonar remorqué à 50 m. Zone de 30 m x 30 m. {Support NURC, données NURC, traitement ENSIETA/GESMA} et photo du sonar sur le rail du GESMA

Si ces expérimentations sont issues de la guerre des mines, le monde civil s'intéresse également au SAS. Ainsi, en 2001, le projet IMBAT de Thales Underwater Systems a permis d'imager le fond marin à très grandes distances à l'aide d'un sonar à antenne synthétique interférométrique (technique permettant d'obtenir une image en trois dimensions des fonds marins). Grâce à ce sonar monté sur un « poisson » remorqué, des images du canyon du Var en mer Méditerranée (2 000 m de hauteur d'eau) ont été obtenues. La fréquence centrale utilisée était de 45 kHz avec une bande de 10 kHz [15].

Les challenges de la synthèse d'ouverture

Aujourd'hui, le traitement d'antenne synthétique est une technique mature. Il n'est plus question de savoir si ça marche mais comment le rendre toujours plus efficace, plus robuste et quelles vont être les applications qui profiteront de ces avancées. Les critères principaux de performance d'une antenne sonar étant la résolution et le taux de couverture, ce sont ces deux grandeurs que l'on cherche dorénavant à améliorer.

Normalement, la résolution d'une antenne est inversement proportionnelle à la fréquence centrale et la longueur d'antenne. Dans le cas de l'antenne synthétique, en augmentant la longueur d'antenne, on peut ainsi obtenir une résolution plus fine (voir encadré). Une autre restriction réside dans la connaissance précise des retards des voies d'antenne, donc des mouvements du porteur. Ceci est d'autant plus important que le nombre de récurrences à intégrer est élevé. Pour avoir une bonne connaissance des mouvements de l'antenne à partir des données sonar, il faut que le déplacement longitudinal entre deux récurrences n'excède pas la demi-longueur de l'antenne physique :

$$vT_{rec} < \frac{L_r}{2}$$

En comparaison avec l'application de la synthèse d'ouverture dans le domaine radar, la compensation de mouvement est rendue beaucoup plus difficile pour le sonar en raison de la faible vitesse du son dans l'eau et de l'écartement de trajectoire important avec la ligne droite idéale. La figure 6 illustre le principe de la compensation de mouvement.

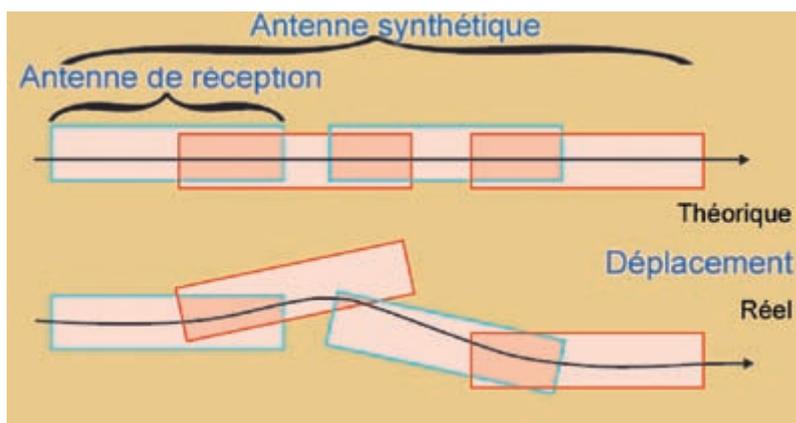


Fig. 6 : Illustration de la compensation de mouvement ou comment tenir compte des mouvements du porteur dans le traitement SAS

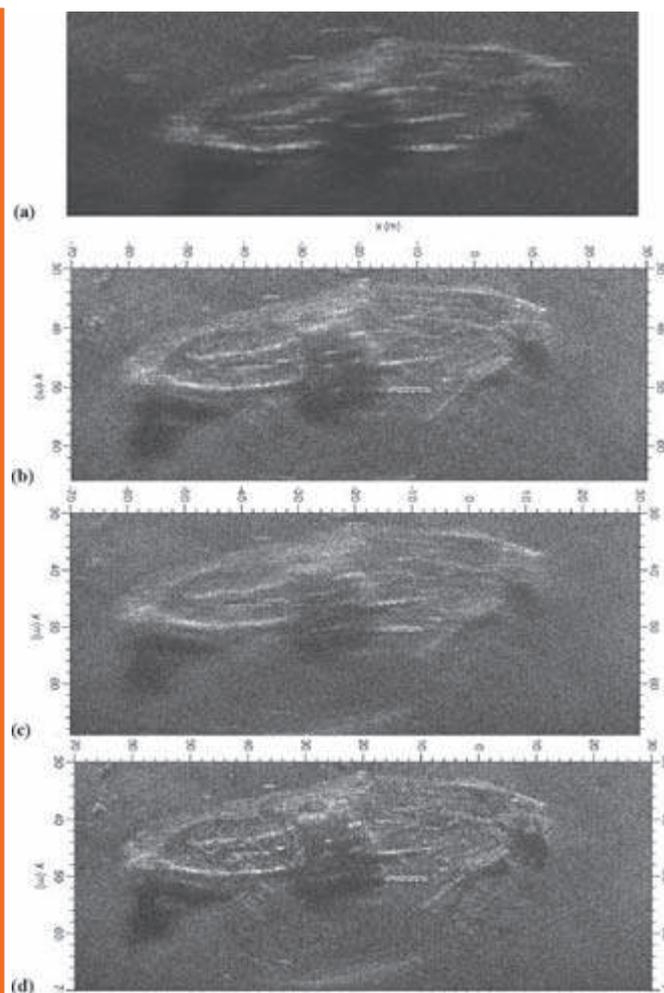


Fig. 7 : Comparaison d'algorithmes de compensation de mouvement et images SAS résultantes. Images de l'épave de la Swansea Vale en baie de Douarnenez. (a) sans correction (b) DPC uniquement (c) données de navigation uniquement (d) Fusion de données DPC et navigation

Cette problématique a donné lieu ces dernières années à de nombreuses recherches dans le domaine des techniques dites d'autocalibration. Le principe de l'autocalibration réside dans la comparaison des signaux reçus sur deux capteurs entre une récurrence et la suivante. En recherchant les paires de capteurs les plus corrélées, on peut déterminer les mouvements du porteur entre chaque ping. Alors, on calcule de façon récursive les retards et les directions de pointage nécessaires pour la formation de voie synthétique. Cette méthode est connue sous le nom de DPC (Displaced Phase Centre).

D'autres méthodes utilisent les propriétés du signal reçu par chaque capteur pour déterminer le mouvement de l'antenne, on peut citer notamment le P2C2 (Ping to Ping Cross-Correlation). Ces techniques se sont révélées très efficaces pour compenser les mouvements du sonar.

Cependant, la recherche de techniques toujours plus efficaces de correction a abouti au développement d'une méthode utilisant à la fois les données provenant des algorithmes de compensation de mouvement et les données provenant d'une centrale inertielle [16]. Ceci a montré une très bonne efficacité. La figure 7 présente des images comparatives de ces méthodes. On note la différence de précision de focalisation entre chaque méthode.

Dans le même temps, la recherche de l'application SAS temps réel a incité à l'étude de nouveaux algorithmes de formation de voie. En acoustique sous-marine, la formation de voie correspond à la formation de l'image à partir des récurrences sonar. Dans ce domaine, la formation de voie temporelle est la plus traditionnelle. Elle a l'avantage d'être exacte et facile d'implémentation. Cependant, le temps de calcul nécessaire à sa mise en œuvre est très pénalisant. D'autres méthodes de formation de voie dans le plan fréquentiel sont apparues : les algorithmes « Omega K » et « ChirpScaling » [17]. Leur principal avantage est d'être généralement beaucoup plus rapides. De plus, ces méthodes très proches ont l'avantage d'être quasiment exactes. Elles présentent tout de même un inconvénient non négligeable, la géométrie de calcul étant figée, ces méthodes imposent une antenne linéaire uniforme. Enfin, un nouvel algorithme appelé Fast Factorised Back Projection (FFBP) a été repris en 2002 par Banks et Griffiths [18]. Cette méthode utilise une formulation temporelle de la formation de voie et propose un bon compromis entre la vitesse de calcul et la précision attendue. Elle est en particulier très bien adaptée aux trajectoires non rectilignes mais reste tout de même difficile à implémenter.

Enfin, les nouveaux challenges de la synthèse d'ouverture se situent aussi dans l'apport de nouvelles informations. Le développement de l'interférométrie SAS apporte une connaissance de la configuration en trois dimensions du fond marin. Par ailleurs, la détection d'objets jusqu'alors inaccessibles comme les objets enfouis devient enfin possible.

Le traitement SAS pour la détection des objets enfouis

L'histoire du SAS est donc en partie étroitement liée aux applications militaires et en particulier à la détection et classification des mines navales. Alors que les sonars classiques permettent une bonne classification en utilisant des fréquences élevées, l'apport du traitement SAS dans le domaine permet pour une même longueur d'antenne d'utiliser des fréquences plus basses tout en gardant une très bonne résolution (de l'ordre de 10 cm). Étant donné les propriétés des ondes sonores dans le milieu aquatique, plus les fréquences utilisées sont basses et plus l'onde se propage loin. De plus, les basses fréquences permettent de pénétrer le sédiment marin (l'onde est moins atténuée) et donc d'avoir des informations sur sa composition. Ce principe est d'ailleurs utilisé par les sondeurs de sédiments. L'utilisation du traitement SAS en basse fréquence permet alors de détecter les objets enfouis dans le sédiment. Cette application se révèle intéressante à la fois pour des applications civiles (suivi de pipeline par exemple) et pour des applications militaires (détection de mines enfouies). Cette thématique est actuellement principalement développée par les États-Unis, l'Allemagne et

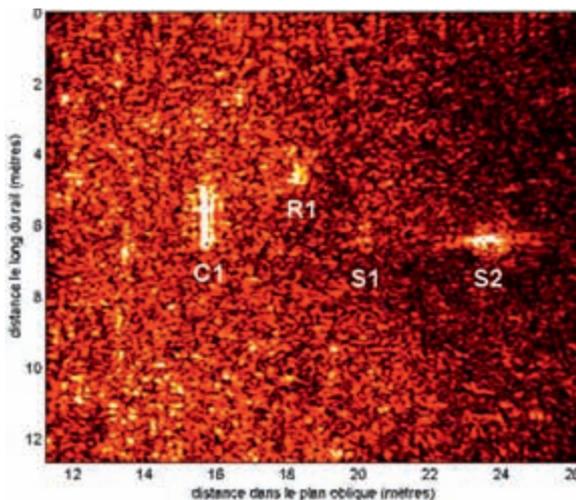


Fig. 8 : Exemple d'image d'objets enfouis ou non à 20 m. Zone de 25 m x 12 m {support, données, traitement GESMA} C1 : cylindre enfoui ; R1 : rocher enfoui ; S1 : sphère enfouie ; S2 : sphère posée sur le fond

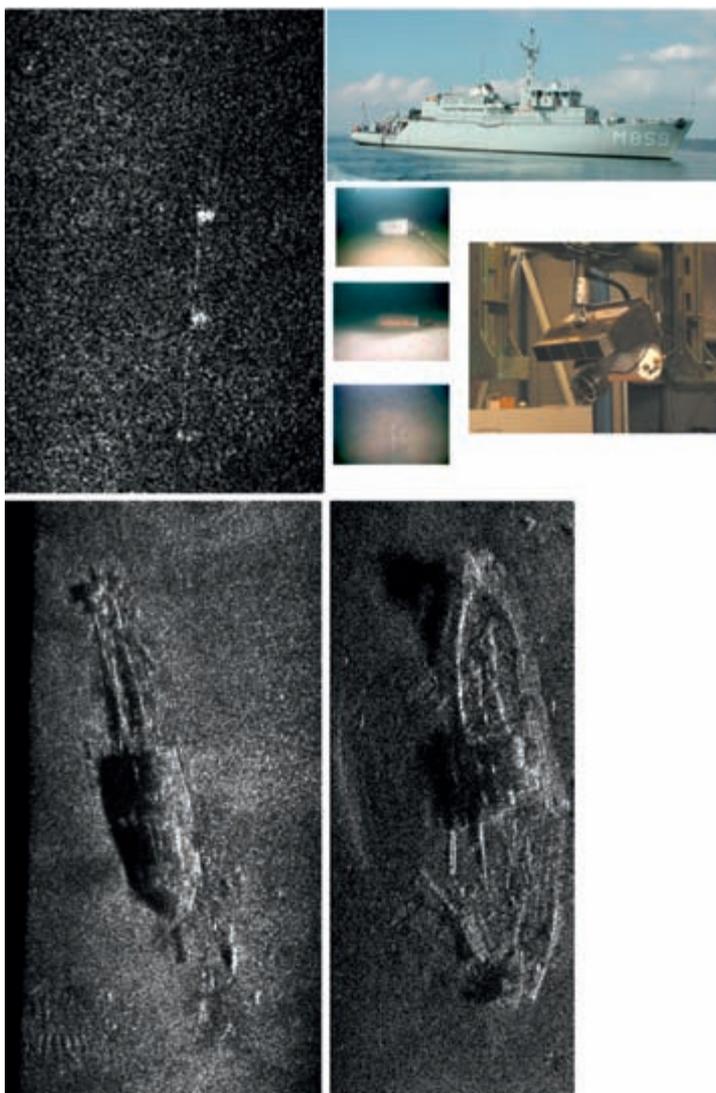


Fig. 9 : Exemple d'images obtenues avec un SAS basse fréquence monté en sonar de coque. En haut, de haut en bas sur l'image : cylindre non enfoui, cylindre semi-enfoui, cylindre enfoui et photos du bâtiment support et du sonar. En bas, images d'épaves en baie de Douarnenez

la France. Pour sa part, le GESMA a conduit de nombreuses expérimentations en mer sur ce sujet depuis la fin des années 1990. Tout d'abord un sonar à ouverture synthétique basse fréquence a été monté sur un rail dans la rade de Brest en 1999. Lors de cette campagne, les fréquences émises étaient comprises entre 14 et 20 kHz [19]. La figure 8 présente une image résultat de ces essais. On remarque la forme allongée des échos constituant le cylindre.

Sur cette image, on voit que l'utilisation des basses fréquences permet de pénétrer le sédiment et donc de détecter les objets enfouis qui ne l'étaient pas précédemment. De plus, on note que les échos sont beaucoup plus contrastés sur cette image, tout comme une absence totale d'ombre pour ces objets. Ceci rend d'autant plus difficile la classification des objets. Par la suite, en 2002, le sonar a été monté en sonar de coque à bord d'un chasseur de mines opérationnel. Les fréquences étaient choisies entre 15 et 25 kHz [20], la figure 9 présente des images de cette campagne. Ces essais ont été réalisés en coopération avec le centre de recherche hollandais TNO, Defence, Security and Safety.

Les perspectives

Aujourd'hui, un certain nombre de sonars à antenne synthétique sont montés à bord de robots sous-marins. En effet, le sonar à antenne synthétique est très adapté aux robots sous-marins. Les dimensions d'antenne sont conformes aux dimensions des robots, ceux-ci apportent une stabilité intéressante pour le traitement et surtout conviennent parfaitement aux contraintes de vitesse imposées par le traitement synthétique. Ces systèmes sont jusqu'à présent des outils d'expérimentation et deviennent de plus en plus sûrs. Dans le même temps, dans un souci d'amélioration de la résolution et afin de parvenir à la classification des objets enfouis, le GESMA se dote d'un sonar utilisant en émission la technique paramétrique et en réception la synthèse d'ouverture. Ce sonar sera monté à bord du robot sous-marin du GESMA : le REDERMOR et devrait permettre d'obtenir une image en trois dimensions des objets enfouis.

Références bibliographiques

- [1] P. Gough, M. Hayes, « Synthetic aperture sonar : the past, the present and the future. », Proc. Institute of Acoustics, Sonar Signal Processing, vol 26 (5), 2004
- [2] G. Walsh, "Acoustic Mapping Apparatus", US patent n° 3484737, 1969
- [3] G. Gilmour, "Synthetic aperture side-looking sonar system", US patent n° 4088978, mai 1978
- [4] F. Spiess et V. Anderson, "Wide swath precision echo sounder", US patent n° 4400803, août 1983
- [5] L. Cutrona, "Comparison of sonar system performance achievable using synthetic-aperture techniques with the performance achievable by more conventional means", J.Acoust. Soc. Am., vol 58 (2), pp 336 - 348, 1975
- [6] L. Cutrona, "Additional characteristics of synthetic aperture sonar systems and a further comparison with nonsynthetic-aperture sonar systems", J.Acoust. Soc. Am., vol 61 (5), pp 1213 - 1217, 1977
- [7] J. Chatillon, A. Adams, M. Lawlor et M. Zakharia, "SAMI : A low frequency prototype for mapping and imaging of the seabed by means of synthetic aperture", IEEE J. Oceanic Eng., vol 24 (1), pp 4 - 15, 1999
- [8] M. Hayes et P. Gough, "Broadband synthetic aperture sonar", IEEE J. Oceanic Eng., vol 17 (1), pp 80 - 94, 1992
- [9] J. Christoff et J. Fernandez, « Dual frequency synthetic aperture imaging sonar », Int. Geoscience and Remote Sensing Symp., pp 624 - 626, juillet 1998
- [10] D. Billon et F. Fohanno, "Two improved ping-to-ping cross-correlation methods for synthetic aperture sonar : theory and sea results", Proc. IEEE Oceans'02, pp 2284 - 2298, Biloxi, Etas-Unis, octobre 2002

[11] A. Bellettini et M. Pinto, "Theoretical accuracy of synthetic aperture sonar micronavigation using a displaced phase-center antenna", IEEE J. Oceanic Eng., vol 27 (4), pp 780 - 789, 2002

[12] A. Hétet, "Evaluation of specific aspects of synthetic aperture sonar, by conducting at sea experiments with a rail, in the frame of mine hunting systems", Fifth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2000, Lyon, France, 2000

[13] D. Billon, F. Fohanno, "Theoretical performance and experimentation results for synthetic aperture sonar self-calibration", Proc. MTS/IEEE Oceans'98, pp 965 - 970, Nice, France, 1998

[14] A. Bellettini, M. Pinto, "Experimental results of a 100 kHz multi-aspect synthetic aperture sonar", 5ième JASM, Brest, France, novembre 2000

[15] D. Billon, F. Fohanno, "Two improved ping-to-ping cross-correlation methods for synthetic aperture sonar : theory and sea results", Proc. MTS/IEEE Oceans'02, Biloxi, Mississippi, Etas-Unis, 2002

[16] M. Legris, M. Amate et A. Hétet, "Navigation data fusion for Low Frequency Synthetic Aperture Sonar Focusing", 7ième JASM, Brest, France, Octobre 2004

[17] H. J. Callow, "Signal processing for synthetic aperture sonar image enhancement", PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003

[18] S.M. Banks and H.D. Griffiths, "The use of Fast Factorised Back Projection for synthetic aperture sonar imaging", 6th European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2002, pp 529-534, Gdansk, Poland, 2002

[18] A. Hétet, "Contribution à la détection de mines enfouies dans le sédiment marin par synthèse d'ouverture basse fréquence", Thèse, Université Paris 6, juillet 2003

[19] A. Hétet, M. Amate, B. Zerr, M. Legris, R. Bellec, J.C. Sabel, J. Groen, «SAS processing results for the detection of buried objects with a ship-mounted sonar», Seventh European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2004, Delft, The Netherlands, 5-8 July 2004