

Recherche d'objets archéologiques sous-marins à partir de données multicateur

ISABELLE LEBLOND¹, LUC JAULIN², ROMAIN SCHWAB², ISABELLE DELUMEAU¹

¹ Irenav EA3634, Ecole Navale

BCRM Brest, Ecole Navale, CC600 29240 BREST CEDEX 9

² Lab-STICC UMR CNRS 6285, ENSTA Bretagne

2 rue François Verny 29806 BREST CEDEX 9

¹isabelle.leblond@ecole-navale.fr, isabelle.knab_delumeau@ecole-navale.fr,

²luc.jaulin@ensta-bretagne.fr, romain.schwab@ensta-bretagne.fr

Résumé – Les capteurs pouvant être utilisés pour la recherche d'objets archéologiques dans le milieu sous-marin sont de nature très diverse. Il s'agit ici d'explorer la faisabilité de réaliser une fusion multicateur pour améliorer la compréhension d'une scène archéologique. Nous présentons les résultats d'une expérimentation réalisée *in situ* à l'aide d'un sonar latéral et d'un magnétomètre vectoriel. Les premiers résultats montrent que le sonar latéral permet de mieux comprendre les différentes anomalies magnétiques détectées et évite ainsi des prospections inutiles.

Abstract – Sensors which can be used for the search of archeological artifacts are very various. Here, we explore the feasibility of realizing a multisensor fusion to improve the understanding of an archeological scene. Results shown in this study are coming from an *in situ* experimentation, realized with a sidescan sonar and a vectorial magnetometer. First results show that the use of a sidescan sonar allow us to have a better understanding of the different detected magnetic anomalies and avoid then unnecessary prospections.

1 Introduction

La recherche d'objets archéologiques en milieu sous-marin peut être réalisée à l'aide de capteurs très divers. La photographie ou les images vidéo sont régulièrement utilisées, mais leur emploi est souvent délicat, du fait de la faible luminosité du milieu, même en utilisant une lumière artificielle. La photogrammétrie, permettant d'avoir une vue globale de la scène par fusion de nombreuses images est une solution possible [5] mais les durées d'acquisition peuvent devenir prohibitifs. Les capteurs acoustiques (sonar latéraux, sondeurs multifaisceau, sondeurs de sédiments, etc.) deviennent alors un moyen d'exploration intéressant : pénétrant sous l'eau sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres, ils permettent ainsi d'avoir une vue globale des champs à explorer et des temps de levé beaucoup plus faibles et automatisés, soit depuis la surface, soit à l'aide d'un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) [10][12]. Egalement, les magnétomètres, en enregistrant les anomalies magnétiques locales, peuvent servir à repérer les objets archéologiques, à condition qu'ils soient constitués d'éléments ferromagnétiques [8][9]. L'avantage de ce type de capteur est de pouvoir percevoir le sous-sol marin, ce qui est impossible à obtenir avec la plupart des capteurs acoustiques, excepté les sondeurs de sédiments ou les sonars latéraux basse fréquence (< 10 kHz). Un inconvénient majeur est l'interprétation de ces anomalies magnétiques, beaucoup moins aisée qu'avec l'imagerie acoustique. L'idée serait donc de profiter des avantages de chaque capteur en réalisant une fusion multicateur. Les travaux présentés ont été effectués dans le cadre de la campagne « Boatbot », réalisée en juillet 2018 dans la rade de

Brest, et qui avait pour but d'automatiser la recherche d'épaves, ici la Cordelière. Les capteurs utilisés sont un magnétomètre vectoriel d'une part, et un sonar latéral d'autre part.

Une première partie sera consacrée à décrire le dispositif expérimental ainsi que la zone d'exploration. Une deuxième partie montrera les différents traitements mis en place sur les données. Enfin, une troisième partie montrera les premiers résultats de fusion multicateur entre les données magnétomètre et sonar latéral, prenant ici la forme d'un outil d'aide à l'utilisateur.

2 Campagne Boatbot

2.1 Acquisition des données

La campagne Boatbot s'est déroulée du 7 au 13 juillet 2018 en rade de Brest. Les objectifs étaient de tester un bateau autonome afin de promouvoir le concept d'archéo-robotique, visant à automatiser l'exploration de sites archéologiques. Egalement, le but était d'assister le DRASSM dans la recherche de la Cordelière et du Régent [3]. La Figure 1. montre la zone explorée durant cette campagne. Elle était découpée en une cinquantaine de briques, chacune faisant une taille de 1 km x 100 m. Chaque brique était constituée de 11 rails parallèles séparés de 10 m chacun. Les données présentées ici ont été réalisées sur la brique n°10, située au nord-ouest de la zone, ayant une bathymétrie moyenne de 13 m (Figure 1. (b)).

Durant l'une des journées, un sonar latéral Starfish 990F et un magnétomètre vectoriel flux-gate 3 axes SENSYS FGM3D/100 ont été déployés en même temps, afin de permettre l'étude de la fusion multicateur. Les principales caractéristiques de ces capteurs sont

rappelées en Tab 1 et Tab 2. Le capteur magnétique a été intégré dans un caisson étanche muni d'ailettes. Ainsi stabilisé, il conserve son assiette et ses performances sont optimales, proches de celles d'un magnétomètre scalaire. La Figure 2. détaille le dispositif expérimental. Il est à noter que le sonar et le magnétomètre étaient tractés indépendamment. Le magnétomètre était muni d'un dépresseur, permettant de maintenir son altitude à environ 5 m du fond.

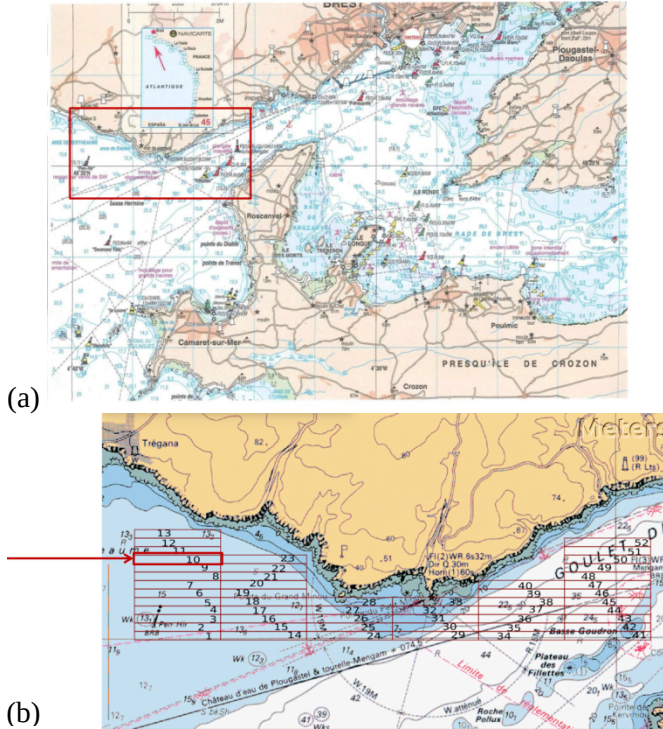


Figure 1. (a) Zone explorée durant la campagne Boatbot
(b) Brique explorée avec un sonar latéral et un magnétomètre.

Tab 1 : Principales caractéristiques du sonar Starfish 990F

Fréquence	1 MHz
Portée	35 m
Pulse	Chirp de 100µs
Ouverture verticale	60° @-3dB
Ouverture horizontale	0.3° @-3dB
Niveau émis	<210dB re 1µPa @1m

Tab 2 : Principales caractéristiques du magnétomètre SENSYS FGM3D/100

Amplitude de mesure	± 100 000 nT
Fréquence d'échantillonnage	400 Hz
Déclinaison entre axes	≤ ± 0.1°
Déclinaison totale	≤ ± 0.12°
Résolution	< 70 pT
Dérive en température	< 0.3 nT/K
Stabilité	< 5 nT

2.2 Résultats à rechercher dans les données

La campagne Boatbot avait notamment pour but d'aider le DRASSM dans la recherche des épaves de la

Cordelière et du Régent. De par leur construction (coque en bois) et leur armement (nombreuses petites pièces d'artillerie en bronze), ces navires de la Renaissance ont peu de pièces magnétiques mis à part les ancres et quelques canons. La masse ferromagnétique totale initiale est estimée à environ 15 tonnes pour la Cordelière, ce à quoi il faut retrancher une perte par oxydation, évaluée à environ 30 à 50% de la masse initiale [7][8]. Vu qu'elle sera répartie tout le long de l'épave, il est probable que l'anomalie recherchée soit inférieure à 10 nT pour une distance de passage inférieure à 15 m [8].

Egalement, il est fort probable que les épaves soient enfouies sous le sédiment. En attendant l'emploi conjoint d'un sondeur de sédiment, l'utilisation d'un sonar latéral haute fréquence, qui ne pénètre pas sous le sédiment, va plutôt permettre d'éliminer les anomalies magnétiques correspondant à des objets non enfouis.

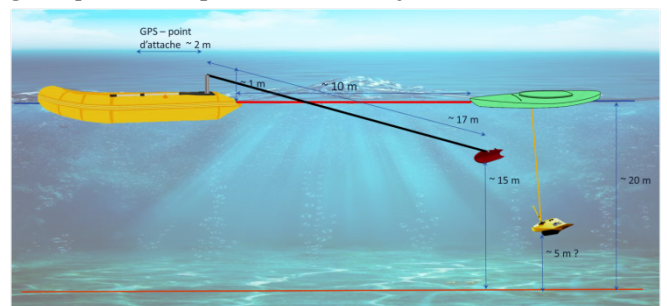


Figure 2. Schéma du zodiac autonome Boatbot tractant le sonar latéral (en rouge) et le magnétomètre (en jaune)

3 Traitement des données

3.1 Analyse locale des anomalies magnétiques

L'amplitude des signatures magnétiques recherchées (10-100 nT voire moins) est de plusieurs ordres de grandeur inférieure au champ magnétique terrestre (47500 nT à Brest) et proche de la sensibilité effective du capteur (1 nT). La signature de cibles magnétiques ponctuelles étant déterministe [7][8], la détection des anomalies magnétiques est souvent réalisée par filtrage adapté [11]. Certaines anomalies peuvent aussi être détectées via la transformée de Hilbert [4]. Afin de tenir compte du facteur d'échelle (lié à la distance de passage capteur-objet) [11] et notamment afin de détecter à la fois les petites anomalies (inférieures à 10 – 30 nT, i.e. inférieures à ce qu'on détecte le plus souvent) et les plus grandes, des outils de traitement de signal comme la décomposition en ondelettes peuvent être particulièrement utiles pour les mettre en évidence [2] [14]. Vu la forme du signal cherché, nous pourrions utiliser ici des ondelettes symétriques de type chapeau mexicain ou asymétriques de type biorthogonale.

Dans un premier temps, ce sont des ondelette chapeau mexicain qui ont été implémentées. Le nombre d'échelles à considérer est fonction de la fréquence d'échantillonnage (ici 400 Hz) et de la vitesse d'avancée du navire. Pour l'échelle maximale intéressante, on peut considérer que cela doit correspondre aux grosses anomalies géologiques présentes dans la zone, due à la présence de dolérite [1][6]. Pour l'échelle minimale, on

considère que cela doit correspondre à des objets de l'ordre de 50 cm de long. Cela donne donc des échelles de 2^5 à 2^{11} échantillons.

Actuellement, l'exploitation des résultats s'est traduit par la mise en place d'un outil d'aide à l'utilisateur. Pour chaque rail, les différentes sorties d'ondelettes sont présentées à l'utilisateur, ce qui lui permet de repérer les signaux d'intérêt selon les critères suivants :

- Amplitudes fortes à l'échelle considérée,
- Et/ou persistance sur plusieurs échelles,
- Et/ou largeur importante,
- Vérification sur le signal d'origine que cela est compatible avec une anomalie magnétique.

L'analyse se fait des échelles grossières vers les échelles fines, afin de ne pas comptabiliser plusieurs fois les détections de grande amplitude. En pratique, l'utilisateur pointe sur les graphes le début et fin d'anomalie et l'algorithme extrait automatiquement un certain nombre d'informations utiles par exemple :

- Image sonar correspondant à la zone,
- Graphe des anomalies,
- Positions géographiques,
- Longueur estimée de l'anomalie.

Ce système permet alors une analyse plus rapide des informations potentiellement intéressantes.

3.2 Exemples de résultats obtenus

3.2.1 Câble sous-marin

Cet endroit de la rade de Brest est riche en présence de câbles sous-marins, dû à la proximité de l'ancienne station de câbles transatlantiques du Déolen [13]. L'armature de ces câbles génère une forte anomalie magnétique. Etant souvent affleurant, ils peuvent être vus au sonar latéral, ce qui permet d'identifier l'anomalie comme telle, ainsi que nous pouvons le voir sur la Figure 3..

3.2.2 Présence de la houle

Sur l'un des rails, la présence d'un signal sinusoïdal sur les données magnétiques pourrait faire considérer ce signal comme venant d'un objet réel. Mais l'analyse des données sonar montrent la présence de houle (visible sur la frontière entre la colonne d'eau et le fond), ce qui permet là encore de classifier l'anomalie (Figure 4.).

3.2.3 Anomalie magnétique sans objet visible au sonar

De nombreuses anomalies ne peuvent pas être expliquées au sonar (pas d'objet visible sur l'image sonar). Parmi celles-ci, une anomalie bipolaire de ± 28 nT sur 58 m de long (Figure 5.). En consultant les abaques donnant la masse ferreuse en fonction de l'anomalie magnétique et l'éloignement à l'objet [8], et considérant un éloignement d'environ 10 m, cela donne une masse ferreuse d'environ 200 kg. A noter que cela

pourrait toutefois correspondre malgré tout à la présence de dolérite.

D'autres anomalies, souvent de l'ordre de ± 3 nT peuvent être détectées sur les données sans pour autant repérer d'objet significatif sur les images sonar. Cela pourrait correspondre à de petits objets de l'ordre de 10 kg environ (ancres modernes par exemple). Il est toutefois à noter que ces anomalies sont quasiment dans l'ordre de grandeur de la stabilité du capteur. C'est bien par leur forme, et par la détection par ondelettes, que de tels signaux peuvent être détectés.

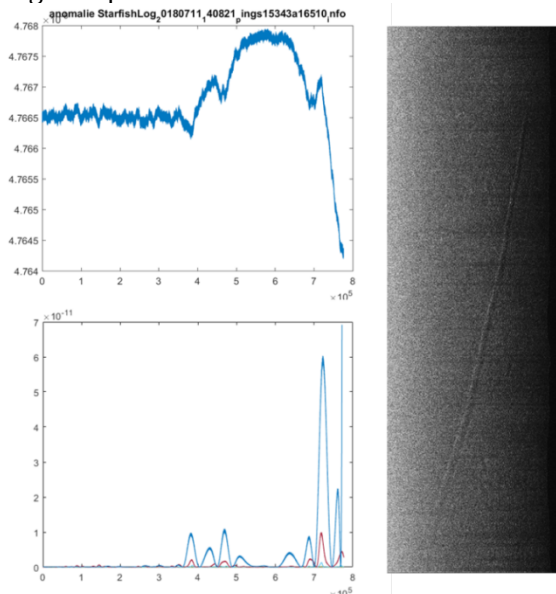


Figure 3. Anomalie magnétique correspondant à un câble sous-marin. En haut à gauche, signal d'origine, en bas à gauche, sortie d'ondelettes, à droite, image sonar correspondante.

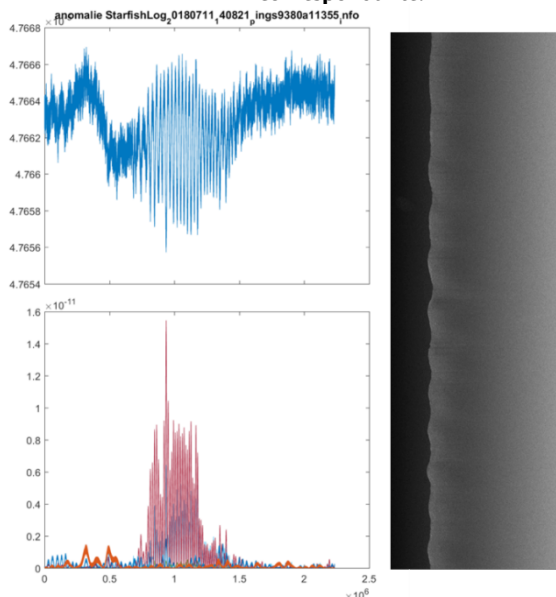


Figure 4. Anomalie magnétique correspondant à la présence de houle. En haut à gauche, signal d'origine, en bas à gauche, sortie d'ondelettes, à droite, image sonar correspondante.

4 Conclusion et perspectives

Le travail présenté ici avait pour but de montrer l'importance d'employer conjointement plusieurs capteurs dans le cadre de la recherche d'objets archéologiques. Le choix a été fait pour le moment d'utiliser un sonar latéral, afin de mieux comprendre la

scène archéologique par l'utilisation de l'image de la réflectivité des fonds marins, et un magnétomètre, permettant de détecter les objets magnétiques, même enfouis sous le sédiment. L'avantage va donc être de pouvoir identifier un certain nombre d'anomalies magnétiques grâce au sonar latéral. Ces deux capteurs, tractés derrière un zodiac autonome, ont été déployés en rade de Brest en juillet 2018 sur une zone de 1 km de long sur 100 m de large, parcourus par 11 rails parallèles de 1 km, espacés de 10 m.

L'analyse des données a pour le moment pris la forme d'un outil d'aide à l'utilisateur, visant à mettre en évidence les signaux magnétiques correspondant à un objet ferreux via une décomposition en ondelettes de type chapeau mexicain. Diverses données sont alors affichées conjointement à l'extrait de signal magnétique parmi lesquels on peut citer l'image sonar correspondante ou encore la position géographique. Cet outil peut alors simplifier le travail des archéologues en permettant de repérer plus facilement les zones d'intérêt à investiguer.

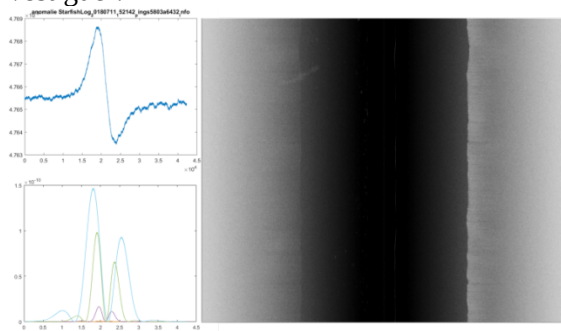


Figure 5. Anomalie magnétique non expliquée par l'image sonar.
En haut à gauche, signal d'origine, en bas à gauche, sortie d'ondelettes, à droite, image sonar correspondante

De nombreuses améliorations sont à envisager si l'on souhaite obtenir un outil pleinement opérationnel. Premièrement, actuellement, le magnétomètre et le sonar sont sur des poissons différents. Afin d'avoir des données facilement recalées entre elles, il faudrait les placer sur le même poisson, en vérifiant la non-influence du sonar sur le magnétomètre. Egalement, localiser précisément chaque instrument sera important, vu qu'ils sont sur un poisson déporté du navire. De même, les capteurs utilisés sont le sonar latéral et le magnétomètre, ce qui permet juste de pouvoir identifier les objets ferreux situés en surface. Pour enrichir l'information, l'utilisation conjointe d'un sondeur de sédiments pourrait permettre d'avoir une idée plus précise de la nature des objets ferromagnétiques enfouis et donc non visibles au sonar latéral.

Sur le plan algorithmique, un travail d'automatisation reste à entreprendre, notamment pour extraire de façon plus systématique les signaux magnétiques. Egalement, une extraction automatique des objets pourra être effectuée sur les images sonar et les images sondeur de sédiments. Tout ce travail sera poursuivi lors d'expérimentations *in situ* en rade Brest. Suite à l'obtention de ces nouvelles données plus conséquentes, un travail statistique pourra être entrepris afin de valider l'ensemble de la démarche.

Remerciements

Les auteurs remercient le DRASSM pour avoir permis la réalisation de cette campagne.

5 Bibliographie

- [1] C. Augris et *al.* - *Atlas thématique de l'environnement marin de la baie de Douarnenez (Finistère)*. Ed. Ifremer - 2005.
- [2] S. D. Billing, F. Hermann. Automatic detection of position and depth of potential UXO using continuous wavelet transforms. *SPIE vol. 5089, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII*, (11 September 2003)
- [3] *Boatbot. Un zodiac autonome équipé de capteurs pour la recherche de la Cordelière.* <https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/boatbot.html>.
- [4] K. Davis et *al.* Automatic Detection of UXO Magnetic Anomalies Using Extended Euler Deconvolution. *Geophysics* Vol. 75, Issue 3, 2010.
- [5] P. Drap. Underwater Photogrammetry for Archaeology. *Special Applications of Photogrammetry*. IntechOpen, April 25th 2012.
- [6] J. Garreau. Fracturation et structure de la péninsule bretonne. *Norois*, Poitiers, n°101, janvier-mars 1979, pp. 67-73.
- [7] M. Guérout. *Recherche archéologique de l'épave de la Cordelière (1512) . Le dernier combat de la Cordelière*, 2017. <hal-01616207>
- [8] M. Guérout. *Recherche magnétique*. HAL Id : hal-01622270, version 1, 2017.
- [9] G. E. Jones et *al.* The use of remote sensing techniques for the location and investigation of heritage wreck sites. *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol 79, 2005
- [10] M. Legris et *al.* Perspectives de l'acoustique sous-marine pour l'archéologie sous-marine. Réunion du 14/05/2013 : *Robotique et Archéologie Sous-Marine DRASSM & GDR ROB, GT2*, Axe robotique marine et sous-marine.
- [11] R. Otness. Static magnetic dipole detection using vector linear prediction, Anderson functions, and block-based adaptive processing. *Oceans 2007 – Europe*, 18-21 June 2007, Aberdeen
- [12] R. M.K. Plets et *al.* 3D Reconstruction of a Shallow Archaeological Site From High-Resolution Acoustic Imagery – A Case Study. Proceedings of the *Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 8th ECUA*, Portugal 12-15 June, 2006.
- [13] R. Salvador. A short History of French Trans-Atlantic Telegraph Cables from French viewpoint. *Instrumentation and Measurement Society Newsletter*, Spring 1995.

[14] Z. Zalevsky et al. Resolution Enhanced Magnetic Sensing System for Wide Coverage Real Time UXO

Detection. *Journal of Applied Geophysics* 84 (2012) 70–76.