



HAL
open science

L'application de la géophysique marine au diagnostic subaquatique

Philippe Pelgas, Simon Ichstchenko, Yann Le faou, Yann Moysan, Bruno Wirtz

► **To cite this version:**

Philippe Pelgas, Simon Ichstchenko, Yann Le faou, Yann Moysan, Bruno Wirtz. L'application de la géophysique marine au diagnostic subaquatique. Archéopages: archéologie & société, 2015, pp.72 - 81. 10.4000/archeopages.1053 . hal-03694877

HAL Id: hal-03694877

<https://inrap.hal.science/hal-03694877>

Submitted on 14 Jun 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'application de la géophysique marine au diagnostic subaquatique

Techniques d'observation des fonds, de pénétration des sédiments et de mesure des anomalies magnétiques

Applying marine geophysics to underwater evaluations. Survey techniques for recording the seabed, penetrating the sediments and measuring magnetic anomalies

Aplicación de la geofísica marina al diagnóstico subacuático. Técnicas de observación de los fondos, de penetración de los sedimentos y de medida de las anomalías magnéticas

Philippe Pelgas, Simon Ichstchenko, Yann Le Faou, Yann Moysan et Bruno Wirtz



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/archeopages/1053>

DOI : [10.4000/archeopages.1053](https://doi.org/10.4000/archeopages.1053)

ISSN : 2269-9872

Éditeur

INRAP - Institut national de recherches archéologiques préventives

Édition imprimée

Date de publication : 1 août 2015

Pagination : 72-81

ISSN : 1622-8545

Référence électronique

Philippe Pelgas, Simon Ichstchenko, Yann Le Faou, Yann Moysan et Bruno Wirtz, « L'application de la géophysique marine au diagnostic subaquatique », *Archéopages* [En ligne], 41 | 10/2014-01/2015, mis en ligne le 01 janvier 2017, consulté le 21 janvier 2022. URL : <http://journals.openedition.org/archeopages/1053> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeopages.1053>

L'application de la géophysique marine au diagnostic subaquatique

Techniques d'observation des fonds, de pénétration des sédiments et de mesure des anomalies magnétiques

Philippe Pelgas *Inrap*

Simon Ichstchenko *Mesuris*

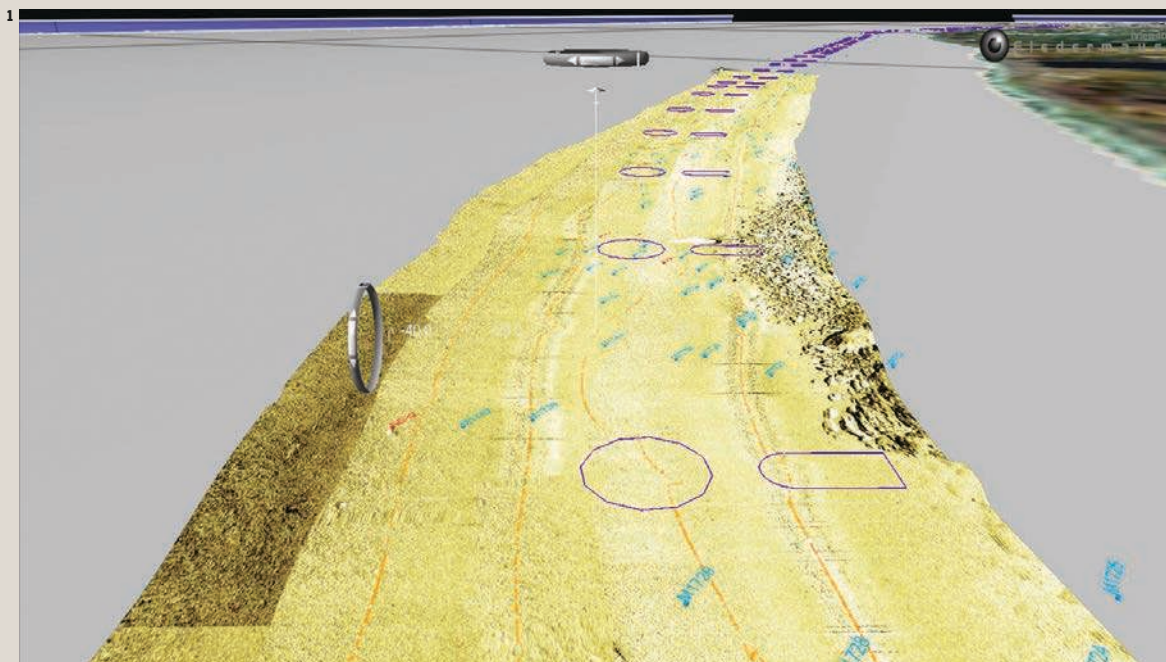
Yann Le Faou et Yann Moysan *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)*

Bruno Wirtz *université de Brest, UMR 6205 « Laboratoire de Mathématiques de Bretagne Atlantique »*

82

Les aménagements en contexte subaquatique concernent souvent des surfaces importantes, dizaines voire centaines d'hectares, peu adaptées à la recherche d'artefacts par le recours à la plongée. En l'absence de moyens mécaniques comparables à ceux utilisés en milieu terrestre, une des premières étapes du diagnostic subaquatique consiste donc à recourir aux moyens de détection en réalisant des levés

géophysiques (Bowens, 2009). À la création du service des activités subaquatiques de l'Inrap en 2011, une réflexion s'est engagée sur l'approche des grands diagnostics en milieu subaquatique. Cet article tend à faire le point sur quatre ans d'expérience et d'utilisation des méthodes géophysiques marines appliquées à l'archéologie préventive.



1. Mosaique de la couverture réalisée au sonar latéral sur le projet de la nouvelle route du Littoral (île de La Réunion). En violet, les formes circulaires et oblongues matérialisent l'emprise des piles du pont du projet.

En rouge à gauche, petite surélévation correspondant à une anomalie sonar. En bleu, emplacement des anomalies magnétiques enfouies.

Qu'il s'agisse de travaux sous-marins, tels que les agrandissements portuaires, de modification de zone d'évitage de navires, de projets autoroutiers au-dessus de la mer, ou de travaux en eaux intérieures, tels que les aménagements ou rectifications de berge, des ouvrages d'art comme les barrages, les surfaces des diagnostics prescrits peuvent très vite frôler le gigantisme. Dès lors, la méthode traditionnelle qui consiste à prospecter la totalité des fonds avec des plongeurs devient très vite inadéquate. Difficile d'imaginer des plongeurs nager sur des km² dans des délais contraints, sans compter sur une visibilité pouvant être faible voire nulle, doublée ou non de courants, avec la quasi-certitude dans certains contextes de trouver des engins de guerre. Ces paramètres s'ajoutent à la durée d'intervention des plongeurs – qui sera inversement proportionnelle à la profondeur de la zone à diagnostiquer – et à la température de l'eau qui sera également une contrainte diminuant le temps d'intervention. La recherche d'artefacts, tant en milieu maritime que fluvial, nécessite donc, outre les recherches documentaires et d'archives qui apportent leurs lots restreints d'informations, le recours aux outils acoustiques et magnétométriques, qui s'impose comme une étape fondamentale dans le diagnostic.

Trois catégories de systèmes sont identifiables dans le cadre de ces retours d'expérience : ceux qui permettent d'« observer » le fond (sonar latéral ou sidescan sonar) voire de le topographier (sondeurs multifaisceaux ou SMF), ceux qui mesurent le champ magnétique et ceux qui pénètrent le sédiment en profondeur (sondeur de sédiments ou subbotom profiler). Il est primordial avant de commencer le diagnostic d'appréhender le contexte géologique, la dynamique sédimentaire, la nature des vestiges attendus, leur taille éventuelle, le tout conditionnant l'usage et la combinaison de telle ou telle technique ; tous, comme nous le verrons ci-dessous, ne sont pas utilisables dans tous les contextes.

À la difficulté que représente la mise en œuvre de ces appareils, s'ajoute l'appropriation de ceux-ci (fonctionnement, paramétrage, logiciel dédié ; enregistrement, format et stockage des données). Dès 2011, en l'absence de savoir-faire, de matériel et de moyens à la mer au sein de notre institut, il fut décidé de se tourner vers les prestataires et les experts rompus depuis des années à ces travaux d'acquisition et de traitements.

Par ailleurs, en raison de l'absence de véritables recommandations sur l'utilisation de ces outils, l'Inrap a décidé de réunir en juillet 2014 les signataires de cet article, experts de chaque outil acoustique. L'objectif était de transposer des protocoles d'acquisition de données géophysiques issues de l'industrie et de la Marine aux opérations de diagnostics préventifs, et d'élaborer des protocoles pouvant permettre de réutiliser les données à des fins archéologiques ou non. Il s'agissait également de porter la réflexion sur ces systèmes et logiciels

qui « filtrent la mesure » et les traitements mathématiques qui analysent le signal et qui, par extension, explorent la donnée. Cet article reprend dans les grandes lignes ces retours d'expérience et les recommandations apportées par chaque participant.

La détection sur les fonds : sonars à balayage latéral et sondeurs multifaisceaux

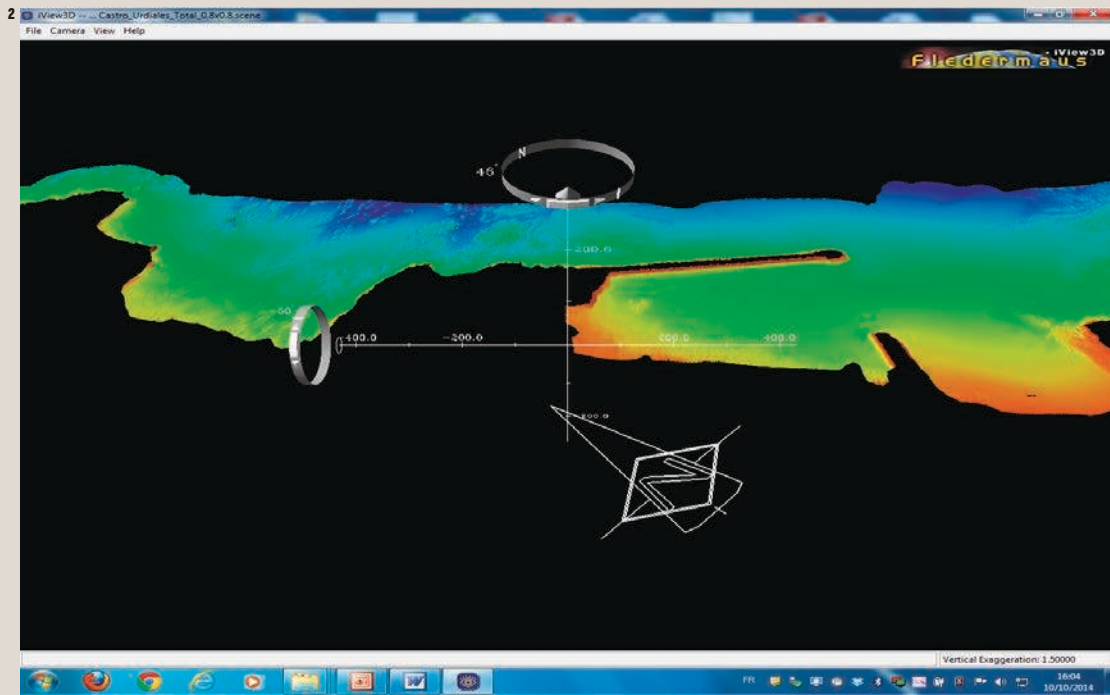
Dans le cas du diagnostic de la route du Littoral à La Réunion¹ (Pelgas, 2013a), le service des activités subaquatiques de l'Inrap a demandé à Mesuris la mise en œuvre d'un sonar latéral Klein 3900, prestation que nous avons pu suivre. Dans le cas du projet Calais « Port 2015 »² (Pelgas, 2013b), les paramètres d'acquisition ont été établis avec Bruno Wirtz et communiqués à l'aménageur qui a directement pris en charge l'acquisition. La prestation fut réalisée par Géomines.

L'usage de sonar à balayage latéral bi-fréquence 445/900 kHz est tout à fait adapté à la recherche de petits objets dont la taille est de l'ordre du mètre voire inférieure, surtout dans la fréquence haute (supérieure à 600 voire 900 kHz). Plus la fréquence est élevée, meilleure est la résolution, et plus il est possible d'observer également de fins détails dans certains contextes géologiques, tels que les ridules de sable sur le fond avec une définition décimétrique (ill. 1).

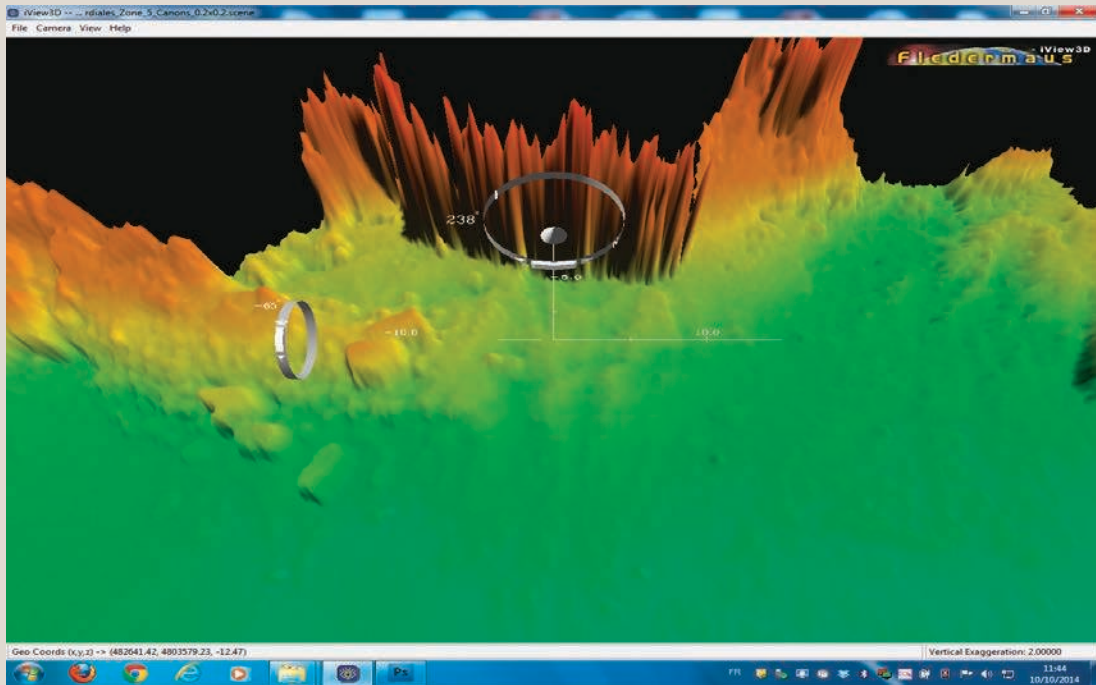
Pour rappel, le principe repose sur l'émission-réception d'ondes acoustiques. L'onde est constituée d'un faisceau émis perpendiculairement au sonar et donc au bateau et réfléchi par le fond pour ensuite être capté par le transducteur. Chaque signal est enregistré et transformé par le transducteur en signal électrique et ensuite traité pour reconstituer l'image acoustique sous forme d'une succession de lignes traduite par le logiciel d'acquisition en fonction de la vitesse du bateau. Le sonar latéral est un outil tracté par une embarcation. La vitesse de déplacement du bateau doit être constante et ne pas dépasser 5 nœuds afin d'obtenir un bon enregistrement des signaux. L'altitude de l'outil acoustique par rapport au fond doit être suffisante (quelques mètres) et constante pour ne pas heurter le fond. Pour une meilleure homogénéité de la fauchée (couverture latérale), il faut s'efforcer de garder le sonar à la même altitude. Les bruits d'hélice, le sillage de celle-ci sont autant de perturbations acoustiques pouvant se répercuter sur l'enregistrement. Le sonar doit donc être tenu à une distance d'au moins 15 à 20 m derrière le bateau.

Le câble coaxial électro-tracteur est connecté au PC d'un côté, où les informations sont traitées par le logiciel dédié Sonar Pro, et à l'outil de l'autre côté. Il est important qu'une poulie crantée soit utilisée pour faciliter la mesure de longueur de câble qui est renseignée dans le logiciel. La position du sonar sera déduite par un calcul basé sur la formule de Pythagore. Un inconvénient majeur quant à son utilisation est la fluctuation

1. Diagnostic mené de décembre 2011 à novembre 2012 sous la coordination de Philippe Pelgas, Inrap.
2. Diagnostic réalisé de janvier à mai 2013 sous la coordination de Philippe Pelgas, Inrap.



2. Bathymétrie 3D interactive sur le port de Castro-Urdiales au moyen d'un SMF (Cantabrie, Espagne).



de son positionnement ; si la plupart des sonars latéraux sont équipés de capteurs de pression renseignant sur la profondeur et la hauteur d'eau entre le fond et les capteurs, le positionnement en XYZ peut devenir vite aléatoire. La navigation (nature du fond rocheux, etc.), les activités de pêche (filet casier) pourront représenter autant d'obstacles susceptibles de compromettre la trajectoire du sonar, voire de causer la perte de l'outil. Par ailleurs, le courant transversal, et tous les types de courants, pourront avoir un impact rédhibitoire sur le positionnement de l'outil, produisant également un effet de laisse sur le câble. Autant de difficultés qui rendent le positionnement délicat voire incertain, avec une marge d'erreur pouvant atteindre plusieurs mètres. Pour l'opération de diagnostic de Calais « Port 2015 », certaines fauchées ne se superposaient pas, les écarts pouvaient atteindre 40 m. Inutile de préciser que c'est toute la chaîne métrologique qui doit être précise. La navigation fut traitée par le logiciel Hypack. Ces deux logiciels reçoivent les informations NMEA (norme utilisée pour les GPS en contexte marin) envoyées en temps réel par un système de positionnement DGPS lui-même autonome. Pour l'acquisition géophysique de la route du Littoral à La Réunion, le matériel de positionnement était un GPS centimétrique (récepteurs POSI-GNSS) RTK (real Time Kinematic) en temps réel avec station de référence fixe à terre en liaison GSM. Le logiciel Leica GEO Office et les fichiers de référence IGN ont servi pour le calcul de positionnement précis de la station de référence.

À La Réunion, l'acquisition des données sur le PC embarqué et le contrôle du positionnement ont été effectués avec le logiciel Quinsy. Préalablement à l'acquisition, des profils de navigation sont préprogrammés dans le logiciel. Le rattachement des hauteurs d'eau est calculé par rapport à un référentiel (zéro IGN ou Zéro hydrographique).

Le degré de précision du positionnement doit être inframétrique. D'autant que trois autres contraintes viennent peser sur la réalisation de la couverture géophysique : le coût de ces outils et leurs mises en œuvre – difficile d'imaginer refaire un levé –, le calendrier de l'opération – lui-même inhérent à chaque opération préventive – et le temps de plongée, fonction de la profondeur d'intervention. Si jusqu'alors les techniques pour retrouver les anomalies étaient basées sur les recherches classiques à vue, il était nécessaire d'évoluer vers des techniques plus récentes. Pour répondre à cet impératif, le service des activités subaquatiques de l'Inrap eut recours au matériel de positionnement sous-marin GIB lite (GPS Intelligent Buoys)³ qui permet un positionnement et un guidage du plongeur en temps réel depuis la surface.

C'est ainsi que 77 cibles ont pu être vérifiées en cinq semaines lors du diagnostic de la route du Littoral à La Réunion, divisant par deux, voire par trois, le temps de recherche des anomalies

incluant la réalisation de sondages. Son utilisation appliquée à l'archéologie sous-marine en France (voire dans la majorité des pays d'Europe) était inédite et a constitué un réel progrès dans ce domaine.

À titre d'exemple, en contexte fluvial, un volet du projet collectif de recherche intitulé « Recensement topographique des points de franchissement du Rhône en lien avec les villes étudiées dans le cadre des atlas urbains de Gaule méridionale » s'est appuyé sur les données de la Compagnie nationale du Rhône, composées entre autres de couvertures bathymétriques réalisées au sondeur multifaisceaux et parfois de couvertures sonar (Brissaud, 2010). La mise en œuvre de ce dernier a permis de caractériser certains vestiges, d'en apprécier les dimensions et la profondeur⁴.

Alors que le positionnement est le maître mot pour obtenir un relevé rigoureux, fiable et facilement exploitable ultérieurement, nous avons vu que l'utilisation du sonar latéral pouvait aboutir à des imprécisions – et non des moindres – dans la localisation, qui peuvent être accentuées en fonction de la nature des fonds et des courants. La météorologie et la courantologie peuvent totalement modifier la configuration du fond entre deux campagnes de relevés. Dans le cas du diagnostic de Calais « Port 2015 », les courants étaient si forts que le sédiment était en suspension dans toute la colonne d'eau. Si de plus, comme nous l'avons précisé *supra*, des erreurs de positionnement sont notables, alors il est presque impossible de retrouver une épave, laquelle peut être enfouie sous plusieurs mètres de sédiments, ce qui rend le diagnostic délicat ou impossible avec les moyens alloués.

Le recours au sondeur multifaisceaux présente de nombreux avantages comme la fiabilité dans le positionnement, la marge d'erreur étant inférieure à 10 cm voire centimétrique pour les dernières générations de SMF tel le SEABAT 7125 de TELEDYNE Reson qui offre une résolution d'image aussi performante qu'un sonar à balayage latéral (511 faisceaux sur un angle de 160° avec un cadencement de 40 prises par seconde). Même si l'anomalie est recouverte de sédiments après le levé, la fiabilité du positionnement offrira de meilleures garanties pour la retrouver. Depuis quelques années, en Europe, ça et là, a été utilisé le SMF afin d'exécuter des relevés de haute précision (Caiti, 2009). D'un point de vue méthodologique, la prospection ou le diagnostic doit s'appuyer sur la cartographie du fond (Juan Fuertes, 2009).

Il convient d'explicitier les avantages de cet outil que nous avons pu observer lors d'opérations de prospection ou de diagnostic en France et à l'étranger. Dans le cas de La Trinité-sur-Mer (Morbihan)⁵, une couverture géophysique avait été demandée par le Drassm en utilisant un sonar latéral ; après reconnaissance de la zone, le choix s'est porté sur le SMF en raison des petits fonds à couvrir, afin d'éviter la perte d'un matériel tracté. Une autre expérience eut lieu en Cantabrie

3. Développé par la société ACSA (Architecture et Conception de Systèmes Avancés) Patent GIB: F 2 643 463 et F 2 699 713 ACSA Company. Mis au point et breveté par ACSA, il fut utilisé une première fois par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) en collaboration avec l'université de Pise en 2002. Information personnelle communiquée par M. Patrice Pla, ACSA.
4. La précision de ce document est de l'ordre de 0,40 à 1,00 m.
5. Levé géophysique réalisé en décembre 2013 par Mesuris, rapport SHOM.

à Castro-Urdiales⁶ (Duo Ramila et Pelgas, à paraître) et, là encore, le choix s'est porté sur le SMF en raison de la nécessité de couvrir une côte rocheuse déchiquetée. Lorsque les moyens financiers ne permettent pas d'utiliser plusieurs systèmes, il est préférable de faire le choix du sondeur multifaisceaux. Le matériel utilisé dans les deux cas fut un sonar SMF Seabat Reson 8101 mis en œuvre par la société Mesuris. La fréquence utilisée fut de 240 kHz, l'angle de couverture pouvait être réglé entre 130 et 210°, et couvrir, pour une colonne d'eau de dix mètres, 50 m de large sur le fond, et, pour une hauteur d'eau de deux mètres, 10 m de large sur le fond en fonction de la hauteur d'eau entre le SMF et le fond. Ce système acoustique émet jusqu'à 40 signaux par seconde via une antenne linéaire, les signaux insonifient une bande suivant la ligne de foi du navire, à la fois sur bâbord et sur tribord. L'antenne de réception constituée de transducteurs échantillonne les échos renvoyés par le milieu (fond, colonne d'eau). On obtient dès lors une matrice contenant les mesures de profondeurs du fond marin ainsi que des informations sur le signal reçu (réflectivité, bruit dans la colonne d'eau).

L'acquisition permet d'obtenir jusqu'à 25 sondes par m² par seconde, soit plus de 44 millions de sondes sur 178 hectares [III. 2]. La détection du fond est réalisée par analyse des faisceaux formés pour toutes les directions. À la valeur de réflectivité de chaque échantillon de signaux acoustiques correspond une intensité acoustique de l'écho. C'est la réflectivité des différents échantillons qui va permettre de créer une imagerie acoustique. L'utilisation de l'imagerie issue du sondeur multifaisceaux permet également des classifications de sédiments voire, dans certains cas, la détection d'objets faiblement enfouis ou de roches sub-affleurantes. Un modèle numérique de terrain bathymétrique haute résolution peut être dressé avec des mailles de 0,20 cm par 0,20 cm. Même si, globalement, il est retenu une sonde sur quatre en moyenne (dans le logiciel Quinsy, la sonde retenue est une moyenne du tapis de sondes), la densité de points livre un Modèle Numérique de Terrain avec une précision centimétrique en XYZ. La haute définition est obtenue également par les autres capteurs de la centrale inertielle (POS mv320) pour la compensation des mouvements de roulis, de tangage, de pilonnement et de cap du bateau afin d'assurer la continuité de cap et de position lors de masquages GPS. Le sondeur multifaisceaux est directement fixé sous la coque du navire et relié à la centrale inertielle. Le GPS RTK est relié au progiciel de navigation Quinsy, l'emplacement du porteur (récepteur GNSS) permet de positionner les signaux reçus dans un référentiel terrestre. Pour produire le MNT, il suffit de programmer le progiciel sur le maillage souhaité. Le progiciel remplira la maille à la condition d'avoir enregistré un minimum de sondes par mailles (par exemple

trois ou quatre sondes pour une maille de 0,2 m* 0,2 m). Un appareil de mesure de la célérité de l'eau est utilisé régulièrement durant l'acquisition pour corriger l'impact des différences de salinité sur la vitesse de déplacement des ondes acoustiques (bathycélérimètre). Il est par ailleurs nécessaire de connaître précisément la distance entre les différents capteurs et le sondeur pour le calcul des bras d'antennes ou offset dans l'espace. L'intérêt d'un sondeur multifaisceaux fixe est de ne pas refaire à chaque fois la calibration. La vitesse d'acquisition dans les expériences précitées fut calée sur 3,5 nœuds. En phase de traitement, le logiciel QuinsyCloud de l'éditeur QPS permet d'épurer et de valider les données (suppression des fausses sondes correspondant à des aberrations liées notamment aux sauts de navigation). À chaque gamme de profondeur est associée une couleur de manière à visualiser la topographie du fond. Les données brutes sont fournies au format KML, XTF, formats propriétaires, et sont livrées en formats normalisés (ASCII...).

À La Trinité et à Castro-Urdiales, la 3D géo-référencée interactive a été réalisée avec le logiciel Fledermaus⁷ permettant de parcourir le fond autant que de besoin. Un viewer IView3D ou 4D offre la possibilité de visualiser en 3D l'image acoustique restituée.

Réalisé par un topographe et des plongeurs, le MNT aurait nécessité plusieurs mois voire des années de travail sur des centaines d'hectares... Autre avantage, il permet l'observation d'objets de petites tailles et des microreliefs que l'œil humain a du mal à percevoir. La dernière génération dont fait partie le 7125 permet de dresser une image presque équivalente à celle d'un sonar latéral avec l'avantage de pouvoir repasser sur zone en différé avec d'autres outils (pénétrateur de sédiments ou magnétomètre) pour superposer les levés. Réaliser le MNT est une étape essentielle pour appréhender le milieu à étudier (artefacts, herbiers, contexte géologique). Les dernières générations de SMF représentent une avancée considérable encore sous-utilisée en archéologie sous-marine.

La détection des artefacts magnétiques

Depuis 2011, le service des activités subaquatiques de l'Inrap a testé une seule fois l'usage d'un magnétomètre en s'appuyant sur le savoir-faire de la société Géomines – compte tenu de la proximité de la problématique de détection des engins de guerre avec celle de détection du mobilier archéologique ferreux – et du Gran (Groupe de recherches en archéologie navale) qui avait déjà réalisé de nombreux levés magnétométriques en mer d'Iroise, dans les départements et régions d'outre-mer (DROM) et dans le port de Valparaiso⁸. Dans le cadre du diagnostic de la route du Littoral, le Drassm avait prescrit l'usage d'un magnétomètre d'une sensibilité inférieure à 1 nT. L'Inrap eut recours à la société Mesuris pour le positionnement, laquelle

6. Prospections géophysiques menées en février 2010.

7. Fledermaus[®] de QPS est le leader de l'industrie des outils de traitement et d'analyse géo-spatiale interactive 4D utilisés pour la cartographie des océans et des projets maritimes.

8. Max Guérout (président du Gran) et Hervé Blanchet (Détection et Recherches Sous-Marines) ont réalisé de multiples campagnes de magnétométrie à des fins de recherches archéologiques.

sous-traite l'acquisition sonar et magnétométrique à la société Géomines. Le magnétomètre à vapeur de Césium G882, qui répondait à cette caractéristique (sensibilité = 0,004 Nt/ $\sqrt{\text{Hz}}$ rms et précision de 0,02 nT), fut mis en œuvre dans le but de détecter d'éventuelles grosses anomalies d'épaves ou de constructions métalliques (pontons d'embarquement) comme de petites révélatrices d'objets. Ce magnétomètre est tout indiqué pour détecter également des masses ferreuses telles que des chaînes d'ancre et de petits objets. La probabilité de mise au jour d'épaves d'époque moderne était suffisamment élevée avec la présence afférente d'objets métalliques en fer (canons, ancres, etc.) pour être détectée par magnétométrie... Cependant, il était important de prendre en considération l'environnement. Dans le cadre de la route du Littoral, plus de 4 700 anomalies distinctes ont pu être détectées par technique magnétométrique. Pour rappel, le magnétomètre mesure l'intensité du champ magnétique (ambiant) et une anomalie magnétique est la différence entre un champ magnétique mesuré in situ et le champ magnétique de référence issu d'un modèle pour la localisation et la date de la mesure⁹. La géologie locale peut être source d'anomalies magnétiques en présence de minéraux ferromagnétiques. De même, réaliser – ce qui fut le cas durant le diagnostic de l'île de La Réunion – une couverture sur fond « malsain » (à proximité de blocs béton à armatures métalliques), peut générer des bruits de fond, ce qui vient compliquer la détection des petites anomalies.

Avant intervention, il est recommandé de vérifier l'étalonnage du magnétomètre. Des fluctuations temporelles du champ magnétique terrestre en un point donné sont également observables en raison de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre. Ces variations d'origine externe, tant temporelles que spatiales, peuvent atteindre quelques dizaines de nT (le champ magnétique de la Terre varie entre 20 000 nT et 60 000 nT) et leur prise en compte permet d'améliorer la précision d'un levé magnétique et donc, sa capacité de détection. Des données de station de référence magnétique mesurant les fluctuations temporelles du champ magnétique terrestre en un point donné peuvent être mises à profit pour apporter ces corrections. Il est possible d'installer pour la durée du levé une station de référence à proximité immédiate de la zone de levé. Le cas échéant, on peut recourir aux données d'observatoires magnétiques proches issues du réseau « Intermagnet » (on privilégie alors un observatoire minimisant autant que possible l'écart en latitude avec la zone de levé).

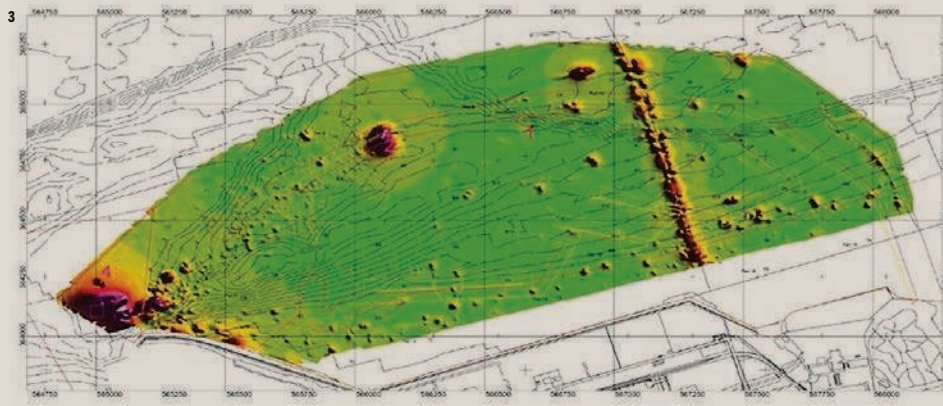
Le magnétomètre doit être tracté à une distance suffisante du porteur afin de ne pas être perturbé par l'influence magnétique de ce dernier (en général, deux à trois fois la longueur du porteur). Le positionnement des acquisitions intègre alors le bras de levier entre le magnétomètre et le porteur,

l'immersion du magnétomètre, la courbure éventuelle du câble (longueur du câble immergé vertical et courbure horizontale en giration). La distance inter-profil résulte de l'analyse préliminaire de la zone de levé ainsi que de la nature des anomalies recherchées. Des profils traversiers doivent également être acquis afin de permettre une qualification du levé par l'analyse de ses écarts aux points de croisements (le SHOM préconise un minimum d'un profil traversier pour cinq réguliers, mais cette densité en profils traversiers peut être augmentée dans certains cas en fonction de l'analyse préliminaire de la zone de levé ou des corrections à apporter, par exemple, si on souhaite apporter une correction diurne à partir de l'analyse des écarts aux points de croisements). Sur petit fond, il est même recommandé de positionner le magnétomètre à l'étrave « tête dans l'eau » plutôt qu'en position tractée, afin de ne pas subir les perturbations générées par le moteur et les hélices ; cependant, il est impératif de disposer d'un porteur amagnétique car on ne peut pas éloigner autant le magnétomètre du porteur que s'il est tracté derrière celui-ci.

Avant de démarrer l'acquisition, il est prudent d'établir un profil de contrôle sur une anomalie connue. Un profil de contrôle consiste en un profil aller et un profil retour sur une même anomalie permettant, outre de valider la répétitivité de la mesure, d'évaluer une erreur éventuelle de positionnement du magnétomètre. Deux formats de données sont possibles : à l'issue de l'acquisition, les données brutes sont au format longitude, latitude, date, heure, champ magnétique mesuré et nom de profil. Les données traitées (correction diurne intégrée) sont quant à elles au format longitude, latitude, date, heure, magnétisme mesuré, magnétisme de référence (IGRF), anomalie brute, anomalie corrigée de la composante BF de la station de référence, anomalie corrigée des composantes BF+HF de la station de référence, profil. La vitesse d'acquisition doit être inférieure à 10 nœuds tout en garantissant un échantillonnage spatial suffisant pour la détection éventuelle de petites anomalies. À titre d'exemple, une ancre peut avoir une réponse de quelques dizaines de nT suivant sa masse et ses dimensions. Comme l'ont montré les recherches du Gran, le signal peut même être considérablement plus élevé suivant la position de l'objet dans le sédiment. Mais il est un paramètre essentiel à prendre en compte, déjà soulevé par le Gran et Détection et Recherches Sous-Marines en 1999 sur l'anomalie que représentait l'épave de l'Hermione (1793)¹⁰ : celui de la hauteur du magnétomètre par rapport au fond. Il est important que le magnétomètre soit au plus près du fond car le champ magnétique est inversement proportionnel au cube de la distance entre l'appareil et la source magnétique. À mesure que l'on s'éloigne du fond et de la source magnétique, le signal diminue. Le signal peut même être

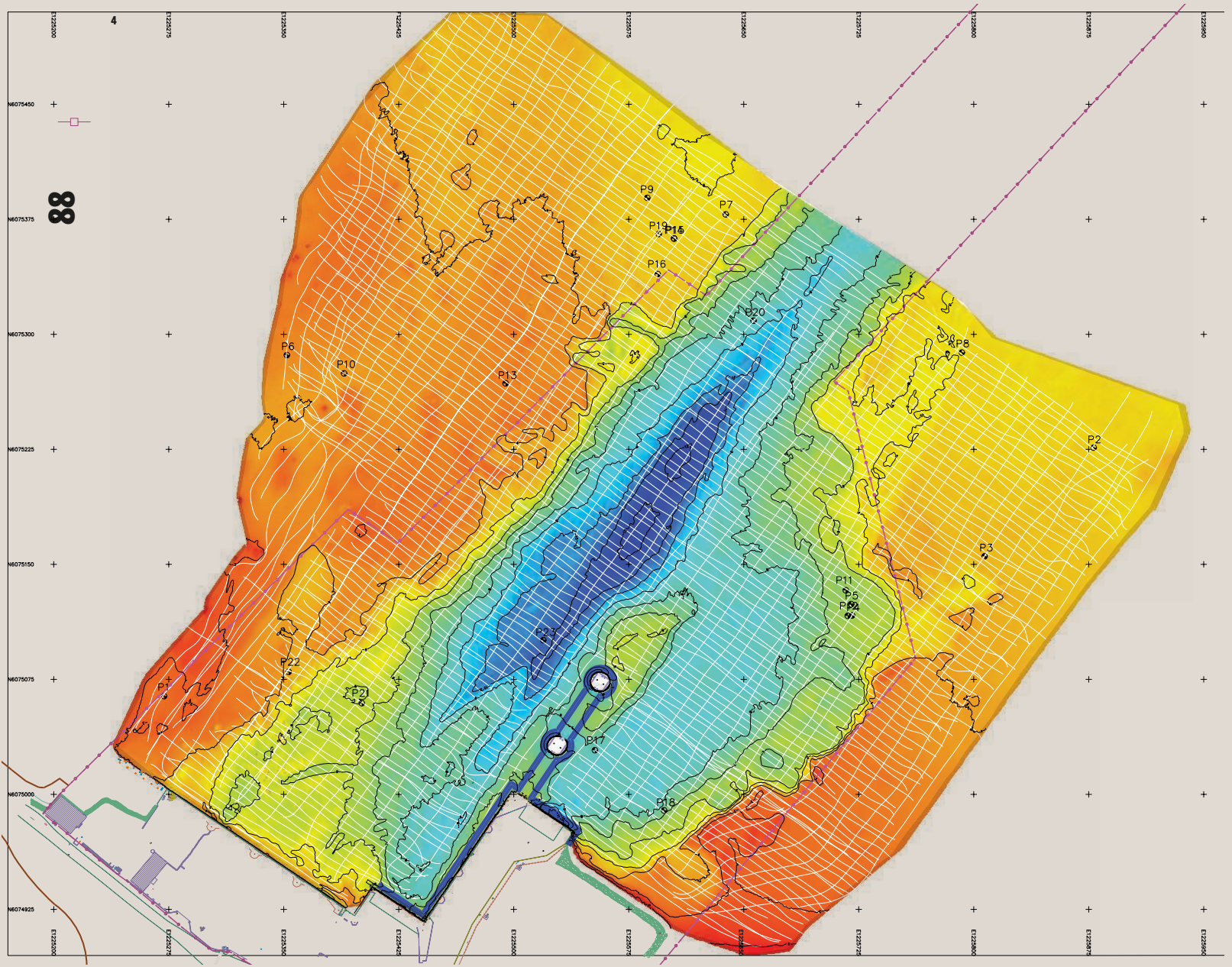
9. En prospection, on utilise un modèle IGRF réactualisé tous les 5 ans soit, pour la période 2015-2020, l'IGRF 2015.

10. Prospections magnétométriques menées en 1992 par Max Guérout, Gran.



3. Restitution des anomalies magnétiques devant le port de Calais dans le cadre du diagnostic Calais « Port 2015 ». La grosse anomalie est celle du remorqueur l'Hercule coulé en 1942. À gauche sur la digue, concentration de masses métalliques. À droite, d'axe SSE-NNO, exutoire d'acide de l'usine de TiOxide.

4. Après avoir réalisé une bathymétrie haute résolution dans le port de commerce de Porto-Vecchio, les lignes blanches matérialisent les coupes réalisées avec le sondeur de sédiments, soit 189 profils espacés tous les cinq mètres de sorte qu'une embarcation de moins de neuf mètres puisse être plus facilement décelable.



totalelement atténué ; en fonction de l'orientation de l'objet par rapport aux lignes de champ, il est possible qu'il ne génère pas d'anomalie. Pour donner un ordre de grandeur, des ancres peuvent présenter des signaux de quelques nT à quelques dizaines de nT, un bateau en métal de quelques centaines à quelques milliers en fonction de la distance entre le magnétomètre et l'anomalie. Dans le cas du levé de la route du Littoral, la profondeur oscillait entre 3 et 14 m, ce qui obligeait à une vigilance constante pour maintenir le magnétomètre suffisamment près du fond avec la possibilité de le relever en fonction du relief.

Au final, le levé magnétométrique fournit des fichiers à exporter dans un fichier interopérable. À partir du logiciel dédié Geosoft, une image restituant les anomalies peut être livrée [III. 3]. Cependant, dans le cas de La Réunion, il fallut tenter de différencier des anomalies pouvant être d'origine anthropique des anomalies d'origine géologique. Il fut nécessaire de retraiter les signaux enregistrés par des calculs que nous évoquons ci-dessous.

Pour de très faibles anomalies enfouies dans un sédiment par exemple, outre le fait de rapprocher au maximum le magnétomètre du fond, il peut être envisagé un recours à de la gradiométrie magnétique, soit deux (ou plus) magnétomètres couplés afin de mesurer un gradient magnétique. Cette gradiométrie offre en outre l'avantage de faciliter la localisation des sources (profondeur d'enfouissement notamment).

En amont du levé magnétique, des étapes sont incontournables pour se donner le maximum de chances de détecter un objet : il est nécessaire de prendre en compte la quantité de métal recherché, son oxydation, l'aimantation des roches locales, la bathymétrie du fond, etc., afin de parvenir à une bonne détection (distance inter-profil, orientation des profils, etc.). En aval du levé, on ne peut s'affranchir d'un certain niveau de traitement afin de localiser plus précisément les anomalies magnétiques (une anomalie n'est pas centrée à la verticale de la source sauf aux pôles magnétiques), afin d'analyser le signal et de différencier son caractère géologique ou anthropique.

Dans la mise en œuvre de ces systèmes, les bonnes pratiques ou protocoles déjà établis par le SHOM sur de grandes épaves peuvent être transposés à des fins de recherches archéologiques.

Les pénétrateurs de sédiments

Ce système est recommandé pour obtenir sans intrusion une coupe du sédiment permettant en fonction du type de sondeur d'envoyer des ondes sur les premiers mètres voire dizaines de mètres. Dans la sismique, d'autres systèmes, aux fréquences plus basses, permettent d'analyser le sédiment sur plusieurs centaines de mètres voire plus à d'autres fins (recherches pétrolières mais avec des résolutions verticales parfois décimétriques...). Dans le cas de l'archéologie subaquatique, ce sont

les premiers mètres sur lesquels va porter toute notre attention. La profondeur d'enfouissement des anomalies pourra être déterminée (Pelgas *et al.*, 2014). Dans tous les cas, il existe une difficulté à obtenir à la fois la pénétration des sédiments et la résolution verticale. La sismique peut donner de bons résultats dans des sédiments vaseux alors que les utilisations de radar ne donnent pas pour l'heure d'aussi bons résultats pour détecter des vestiges baignant dans un environnement très humide. La présence de sel entraîne une perte quasi totale du signal même sur une plage à marée basse.

Deux diagnostics émis par le Drassm ont prescrit le recours au pénétrateur de sédiments, l'un en Corse dans le cadre des travaux d'aménagement du port de commerce de Porto-Vecchio, dont le diagnostic fut interrompu par l'aménageur¹¹, l'autre dans le cadre de la couverture géophysique à réaliser lors de l'opération de diagnostic déjà évoquée ci-dessus à La Trinité-sur-Mer sur la zone du Grazu. Dans le premier cas comme dans le second, il n'était pas préconisé de réaliser la bathymétrie au moyen d'un SMF et même dans le second, l'autorité prescriptrice nous demandait la mise en œuvre d'un sonar à balayage latéral.

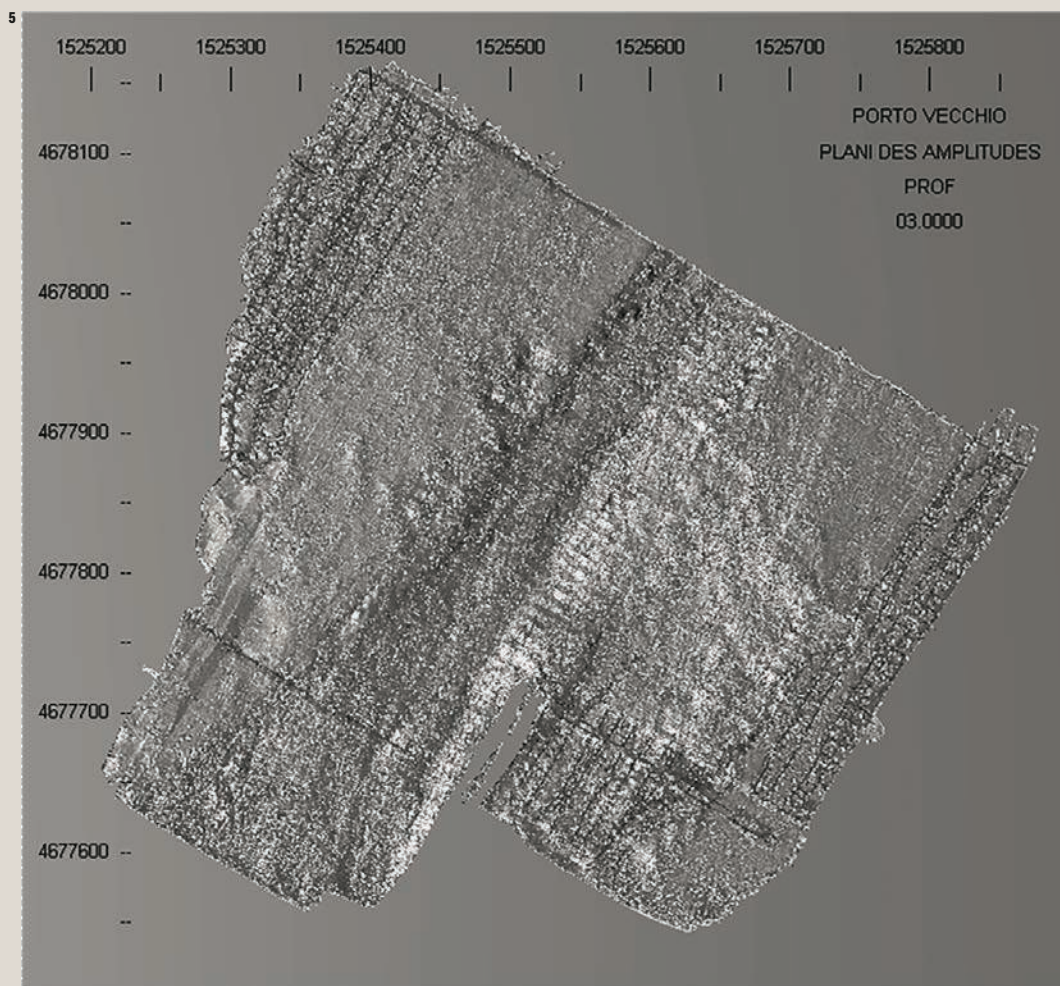
Sur les conseils d'experts du SHOM, l'acquisition a été couplée avec un sondeur multifaisceaux, la donnée sismique seule étant souvent qualifiée d'inexploitable sans données de carottages ou de bathymétrie [III. 4]. L'objectif était de retrouver d'éventuelles structures portuaires ou autres aménagements anthropiques, ainsi que d'éventuelles épaves dont la longueur pouvait être inférieure à une dizaine de mètres. Il était donc nécessaire d'avoir des profils resserrés (dans les cas présents, nous avons choisi des profils tous les 5 m).

Le pénétrateur utilisé dans les deux diagnostics fut l'ECHOES 10000 de la société iXBlue, l'acquisition fut mise en œuvre par Mesuris après concertation avec l'Inrap sur le nombre de profils. La gamme de fréquence de l'ECHOES 10000 est comprise entre 5 et 15kHz pour une résolution verticale inférieure à 10 cm et une directivité maximale de 20°. Les transducteurs sont gérés électroniquement par le logiciel « Delph Seismic Acquisition », et les données peuvent être lues par le logiciel Deplh Sismic Interprétation. Les données natives en XTF ont été exportées au format SEG-Y (format libre) mais ne peuvent pas toujours être lues sous Hypack¹². Elles sont lisibles avec d'autres logiciels de pointage sismique (Kogeo, Kingdom Suite, etc.).

À l'issue des levés au sondeur sur les deux diagnostics, quelques recommandations doivent cependant être observées (Le Faou, 2013) :

- une vitesse d'acquisition la plus réduite possible (2 nœuds) ;
- un positionnement du porteur est primordial pour superposer à la bathymétrie les coupes réalisées au pénétrateur ;
- un système fixé au navire est préférable à un système remorqué ;

11. Campagne géophysique dans le cadre du diagnostic réalisé en février 2013 sous la direction de Philippe Pelgas, Inrap.
12. <http://www.hypack.com/>



5. Planimétrie de réflectance acoustique à Porto-Vecchio.

- l'établissement d'une redondance des profils selon des axes d'acquisition différents ;
 - la densification des profils selon la taille des cibles ;
 - l'exportation des données traitées avec le logiciel propriétaire dans un format accessible et connu ; le logiciel propriétaire doit permettre d'exporter vers d'autres logiciels (Hypack, permettant une lecture des fichiers type SEG-Y).
- Par ailleurs, il est recommandé d'utiliser des données annexes :
- une bathymétrie fine et réalisée simultanément ;
 - un modèle de marée ou des mesures in situ pour caler verticalement les profils (fonds inférieurs à 200 m dans la Manche et l'Atlantique notamment) ;
 - la mise en œuvre des prélèvements à la benne ou par carottages ou forages ;
 - l'analyse de la carte géologique environnante ;
 - la consultation de la base de données sédimentologiques du SHOM (BDSS), les levés au plomb suiffés peuvent apporter leurs lots d'indices pour les XVIII^e et XIX^e siècles ;
 - l'étude des données historiques, cartes et plans pouvant nous renseigner sur des phénomènes d'érosion ou d'engraissement de sédiments.

Les levés au plomb suiffés (plombs de sonde employés avec des lignes de chanvre munis d'une cavité enduite de suif permettaient de recueillir différentes sortes de sédiments), réalisés aux XVIII^e, et XIX^e voire XX^e siècles peuvent apporter des renseignements sur un sédiment aujourd'hui disparu, et même si le levé au plomb suiffé ne permet pas d'établir une cartographie avec une grande densité d'informations, ils participent à notre connaissance de l'évolution des fonds marins. Ils peuvent aussi donner des éléments pour l'interprétation des sédiments enfouis. Dans le cas du levé de La Trinité, il était notable que la dynamique sédimentaire dans le secteur du Grazu avait engendré un retrait d'1,50 à 2 m de sédiments en un peu plus d'un siècle.

Les données SEG-Y furent mises en forme et analysés par la chaîne de transformation « Sism O shom-V1.11 » développée par le SHOM. Les fichiers de métadonnées incorporent :

- la position des différents bruits d'émission sismique ;
- la vitesse du navire ;
- la dénomination de chacun des profils acquis ;
- le numéro de bruit.

Ces paramètres permettent de vérifier le positionnement des profils acquis et la constitution de fichiers nécessaires à la constitution de SIG. Les fichiers SEG-Y, analysés par « Sism O shom » sont ensuite intégrés dans le logiciel Kingdom 2D/3D PAK Advanced V8, ce qui permet de consulter chaque profil [ill. p 80-81]. Le géoréférencement de chaque profil permet de voir si les pointages réalisés sur un profil sont cohérents avec les profils adjacents (artefacts, effet de pente). Tous ces pointages géoréférencés sont exportés pour être intégrés ensuite dans un SIG « Quantum GIS (QGIS) V2.8 »¹³. Les fichiers Shape contiennent les informations nécessaires à leur visualisation et les fichiers autres au format .dbf englobent toutes les métadonnées, générées en coordonnées WGS84 mondiales non projetées. Les mosaïques obtenues par Mesuris sont en coordonnées RGF93/Lambert 93, ce système étant le système légal de référence en France métropolitaine. La superposition des différentes données au sein du SIG a permis une classification plus aisée des éléments rencontrés (géologiques, faux écho hyperbolique, anthropiques, etc.).

Les traitements mathématiques

Si nous avons vu quels outils utiliser dans la détection, il n'en reste pas moins que les logiciels dédiés livrent souvent une interprétation du fond par filtrage de la donnée. Il est essentiel de pouvoir doubler ces interprétations par un traitement

mathématique analysant au sens propre les données brutes par exploration de la donnée. L'application de traitements mathématiques par les procédés Magsalia et Sybaris permet de faire un focus sur l'anomalie en appliquant des calculs faisant appel aux fonctions complexes, au calcul différentiel, au remplacement de calcul algébrique par des algorithmes basés sur la géométrie projective. Si le procédé est adapté au terrestre, pour le milieu marin il fallut procéder à des adaptations pour corriger les différences de profondeur, l'effet de marée, d'où la mise en place du procédé Sybaris (Système barycentrique d'interpolation du signal). Les résultats permettent d'augmenter le repérage des anomalies. Dans le cadre des données issues du sondeur multifaisceaux et des données sismiques, une projection orthogonale polynomiale a été développée sur les données initiales en utilisant une matrice de Gram inversée [ill. 5].

Les résultats permettent d'appréhender avec plus de précision l'enfouissement et la localisation de l'anomalie.

L'application de ces techniques constitue une étape fondamentale dans la réalisation d'un diagnostic subaquatique en offrant sur de grandes superficies des informations multiples. Il n'en demeure pas moins que cette étape n'est pas une fin en soi et doit être suivie par la reconnaissance visuelle et la mise en place ou non de sondages.

13. Il a l'avantage d'être d'accès libre et largement diffusable, et facile de mise en forme.

Références bibliographiques

- « Geophysical and Remote Sensing Surveys », in BOWENS A. (éd.), 2009, 2^e éd., *Underwater Archaeology, The Nautical Archaeology Society Guide to principles and practice*. Portsmouth, Wiley, p. 103-112.
- BRISSAUD L., 2010, « Recensement topographique des points de franchissement en lien avec les villes étudiées dans le cadre des atlas urbains de Gaule méridionale », in HEJMANS M. (dir.), *Topographie urbaine de Gaule Méridionale*, rapport de PCR, Inrap, 27 p.
- CAITI A., 2009, « Metodi di esplorazione acustica per l'archeologia subacquea : ecoscandagli multifascio, sonar a scansione laterale, profilatori sismici », in CAU M. A., NIETO X. (dir.), *Arqueologia Nàutica Mediterrània*, Monografies del CASC 8, Girone, Museu d'Arqueologia de Catalunya, Centre d'Arqueologia Subacuàtica de Catalunya, p. 143-162.
- DUO RAMILA M., PELGAS P., à paraître, « Campaña de prospecciones arqueológicas submarinas en Castro-Urdiales, octubre 2010 (Cantabria) », in *Actuaciones arqueológicas en Cantabria (2004-2011)*, Gobierno de Cantabria, Consejería de Cultura, turismo y Deporte.
- JUAN FUERTES C. DE, 2009, « La prospección arqueológica subacuática. Principios y métodos », in CAU M. A., NIETO X. (dir.), *Arqueologia Nàutica Mediterrània*, Monografies del CASC 8, Girone, Museu d'Arqueologia de Catalunya, Centre d'Arqueologia Subacuàtica de Catalunya, p. 121-132.
- LE FAOU Y., 2013, *Diagnostic d'évaluation archéologique de la zone portuaire de Porto-Vecchio, Analyse de profils d'un sondeur de sédiments*, rapport d'opération, SHOM, 1 vol., 44 p.
- PELGAS P., 2013a, « Acquisition et analyse des données géophysiques et étude documentaire », in *La Réunion de Saint-Denis à la Possession, la nouvelle route du Littoral*, rapport d'opération, Inrap-Drassm, vol. 1, p. 70-79.
- PELGAS P., 2013b, « Couvertures géophysiques et géotechniques », in *Calais « Port 2015 »*, rapport d'opération, Inrap-Drassm, vol. 1, p. 55-60.
- PELGAS P., WIRTZ B., DUO RAMILA M., 2014, « Applications of acoustic, magnetometric and topographic submarines devices for an underwater archaeological method research in preventive archaeology », in *The Age of Sensing, 5th International Conference on Remote Sensing in Archaeology. A Space to Place Initiative, 13-15 October 2014, Durham (north Carolina, USA)*, Duke University, résumés des communications, p. 54-55.