

Le sondeur multifaisceaux en hydrographie : utilisations actuelles et futures

■ Arnaud ABADIE - Christophe VIALA

Couramment utilisé en hydrographie, le sondeur multifaisceaux (ou SMF) est un appareil capable d'émettre et de recevoir des signaux sonores grâce à un grand nombre de capteurs. Sa spécificité réside essentiellement dans le calcul numérique de nombreux faisceaux par formation de voies, ce qui permet d'obtenir une fauchée large tout en conservant une excellente résolution. Depuis sa création à la fin des années 1970, le sondeur multifaisceaux a été majoritairement utilisé pour la réalisation de mesures bathymétriques. Cependant, ses évolutions techniques au cours des dernières décennies permettent désormais d'obtenir simultanément un grand nombre d'informations sur la morphologie et la nature du fond, ainsi que sur la colonne d'eau, avec un unique système de coque. Nous proposons ici un tour d'horizon des applications actuelles des SMF, ainsi qu'un aperçu des perspectives d'utilisations en hydrographie.

■ MOTS-CLÉS

Hydrographie, bathymétrie, acoustique sous-marine, sondeur multifaisceaux, cartographie sous-marine

veloppement de nouveaux appareils de mesure. Le fruit de cet intense travail scientifique a notamment abouti à la mise au point du sondeur multifaisceaux (ou SMF) qui fait actuellement figure d'appareil de pointe en matière d'acoustique sous-marine active.

Cette synthèse propose, dans un premier temps, de retracer brièvement les étapes clés du développement de l'acoustique sous-marine aboutissant à la mise au point du SMF et à ses multiples applications. Nous nous intéresserons ensuite à son utilisation classique dans le cadre de mesures bathymétriques et nous décrirons ses capacités actuelles. Nous aborderons dans les deux parties suivantes les techniques d'imagerie du SMF permettant d'obtenir une image acoustique du fond et de la colonne d'eau. Enfin, nous détaillerons les applications récemment développées en matière de reconnaissance de la nature des fonds marins.

Introduction

Les besoins en termes de connaissance de la morphologie et de la nature des fonds marins sont actuellement multiples et ont évolué dans le temps depuis la création des premiers systèmes acoustiques au siècle dernier. Ainsi, au début du XX^e siècle, la demande était issue du milieu militaire dans le cadre des opérations marines des grands conflits (p. ex. la détection des navires et des sous-marins ennemis) et de la détection d'obstacles à la navigation (p. ex. hauts-fonds, icebergs) (D'Amico et Pittenger, 2009 ; Rolt, 1994). Après la Seconde Guerre mondiale, de nouveaux besoins ont émergé sur des thématiques de prospections des fonds marins pour la recherche de ressources naturelles et la sécurité de la navigation (Lurton, 2002). Plus récemment, le besoin de connaissance des fonds marins se porte sur des sujets environnementaux tels que la conservation des habitats et l'évaluation des ressources halieutiques (Anderson et al., 2008).

Du fait des propriétés physiques de l'eau de mer, les moyens d'observation

en milieu marin sont bien plus limités qu'en milieu terrestre avec pourtant une surface potentielle d'exploration beaucoup plus importante, les océans recouvrant plus de 70 % de la surface du globe. Ainsi, l'emploi de moyens optiques (comme la photographie aérienne et le lidar) pour cartographier à grande échelle reste très peu usité et permet de n'obtenir des informations que dans les cinquante premiers mètres de profondeur dans de bonnes conditions (Pastol, 2011). La meilleure solution pour obtenir des données à grande échelle spatiale en milieu marin est donc l'utilisation d'ondes acoustiques qui y bénéficient de meilleures caractéristiques de propagation que dans l'air avec notamment une vitesse plus importante sur une distance plus longue, ainsi qu'une atténuation moindre (qui augmente cependant avec la fréquence des ondes émises) (Lurton, 1998).

Cette nécessité de réaliser des mesures acoustiques à grande échelle a mené à un enchaînement de recherches dans le domaine de la propagation des ondes en milieu aquatique et dans le déve-

Du premier transducteur piézo-électrique au sondeur multifaisceaux

L'histoire moderne de l'acoustique sous-marine débute au début du XX^e durant la Première Guerre mondiale avec la mise au point par Paul Langevin d'un transducteur piézo-électrique pour la détection acoustique active de sous-marins (voir Figure 1) (Katzir, 2012). Ce système de mesure a été développé sous la direction franco-britannique du *Allied Submarine Detection Investigation Committee* ou ASDIC, terme qui sera par la suite repris pour désigner les systèmes de détection acoustique actifs (D'Amico et Pittenger, 2009). S'en suit durant l'entre-deux-guerres une période de développement intense de systèmes

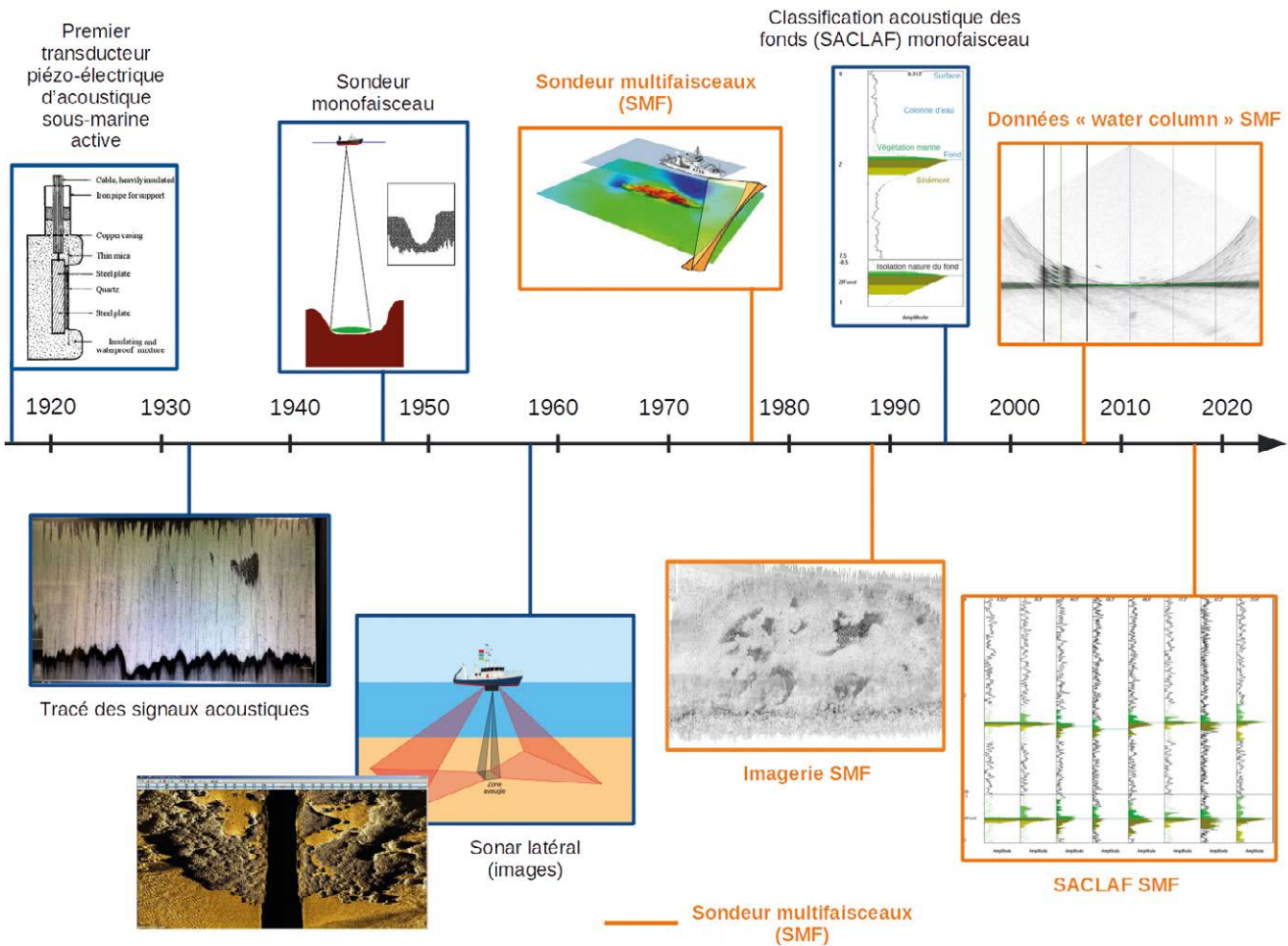


Figure 1. Historique du développement des appareils de mesure et des techniques en acoustique sous-marine



acoustiques actifs et passifs ainsi que la théorisation de la propagation des ondes acoustiques en milieu aquatique (Lurton, 1998). Ces recherches sont principalement menées par des laboratoires américains dont les systèmes acoustiques sont nommés sonars (*sounding navigation and ranging*) à partir de 1942 par analogie au terme radar (*radio detection and ranging*). L'ensemble des efforts de recherche en acoustique sous-marine durant les deux guerres a abouti à la mise au point des premiers sondeurs monofaisceau (*precision depth recorders* ou PDR) (Vilming, 1998), et au développement de sonars latéraux (Sternlicht, 2017) à la fin des années 1950 (voir Figure 1).

Les premiers sondeurs multifaisceaux (SMF) font leur apparition à la fin des années 1970 (voir Figure 1) (Vilming, 1998). La première campagne a lieu en 1975 avec un sondeur "Bo'sun" de 21 faisceaux pour une portée maximum de 800 m et une fréquence

d'émission de 36 kHz (Burke et Robson, 2015). En 1977, la portée du SMF Sea-Beam est testé jusqu'à 6 000 m de profondeur par le CNEXO (futur IFREMER) au large des côtes armoricaines (Renard et Allenou, 1979). Le fonctionnement du SMF repose sur le principe des faisceaux croisés. Généralement, l'émission de l'onde acoustique se fait dans un faisceau large transversalement et étroit longitudinalement. La réception quant à elle est réalisée, grâce à un algorithme de formation de voies, dans un lobe étroit transversalement et large longitudinalement (Blondel, 2012). L'intersection entre le faisceau d'émission et le faisceau de réception est appelée "ped de faisceau" et correspond à la zone du fond insonifiée (voir Figure 2). La mesure est ainsi réalisée sur une multitude de points répartis le long d'une ligne perpendiculaire à la trajectoire du navire. Selon les modèles de SMF, la détection du fond est réalisée sur l'amplitude ou la phase de l'onde

acoustique reçue, c'est-à-dire lorsque le signal franchit une certaine valeur pour l'amplitude, et lorsque le "déphasage" entre deux signaux reçus par deux parties voisines du transducteur de réception est nul.

L'intérêt du SMF réside dans le fait que la directivité en réception n'est pas due à la géométrie du récepteur, mais plutôt à l'utilisation de plusieurs capteurs peu directifs associés à un calcul numérique de formation de voie. Ce calcul est répété plusieurs fois pour obtenir des mesures dans toutes les directions.

Limité dans ses premières utilisations à la réalisation de mesures bathymétriques (White, 1971), le SMF a régulièrement évolué au cours des années qui ont suivi sa création, avec notamment la capacité d'obtenir des images de la réflectivité du fond à la fin des années 1980 (Clarke et al., 1996) et des images acoustiques de la colonne d'eau au début des années 2000 (voir Figure 1) (Clarke, 2006).

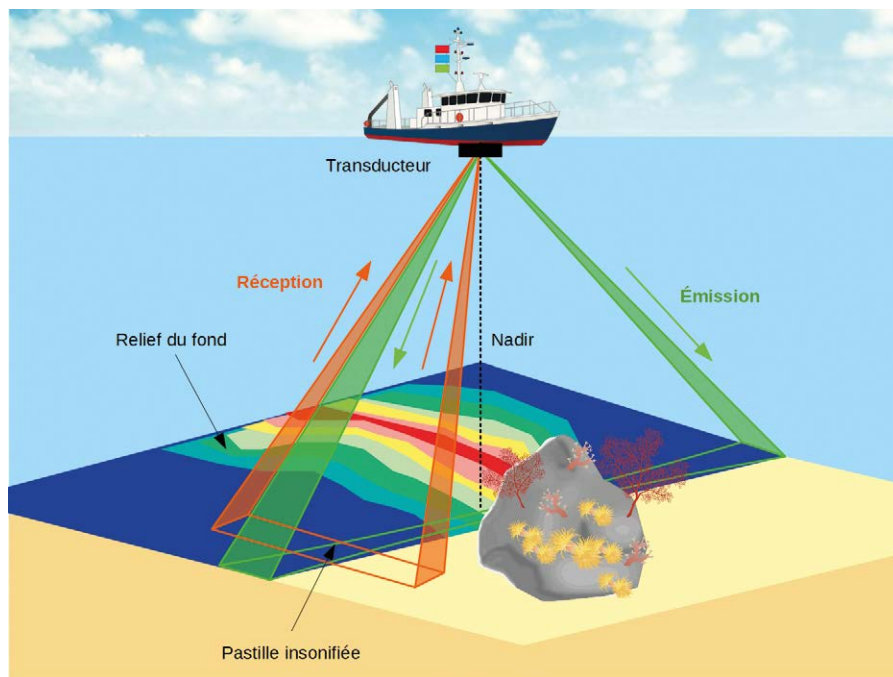


Figure 2. Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux

Utilisation classique : les mesures bathymétriques

L'utilisation première du SMF est la réalisation de mesures bathymétriques. Le principe de mesure de la profondeur par un SMF est similaire à celui d'un sondeur monofaisceau : la mesure du temps de retour d'une onde émise, réfléchi par le fond puis réceptionné. La spécificité des SMF réside dans sa multiplicité de faisceaux émis et réceptionnés simultanément qui leur permet de réaliser des mesures bathymétriques sur des surfaces plus importantes que celles couvertes par les sondeurs monofaisceau, et ainsi d'obtenir un important gain de temps sur la réalisation des levés. La portée des SMF dépend des fréquences auxquelles ils peuvent émettre (voir Tableau 1). Plus la profondeur à mesurer sera importante, plus la fréquence

d'émission devra être basse du fait de l'amortissement du son dans l'eau qui augmente avec la fréquence (Lurton, 2002). Par exemple, dans le cas d'une utilisation en eaux côtières sur des fonds ne dépassant pas 100 m de profondeur, ce seront des fréquences comprises entre 200 et 450 kHz qui seront privilégiées. Cette gamme de fréquence constitue un compromis entre une bonne résolution (haute fréquence) et une portée de mesure optimale. Pour réaliser des mesures bathymétriques sur des grands fonds de type plaines abyssales (profondeur supérieure à 3 000 m), ce seront des fréquences comprises entre 10 et 15 kHz qui seront employées (voir Tableau 1). Les variations de fréquences ne permettent pas seulement de pénétrer des masses d'eau de profondeurs différentes, elles influent également sur la résolution spatiale (qui sera meilleure

avec des fréquences élevées). De plus, la réponse acoustique de certaines cibles dépend de la fréquence d'émission du sondeur (Lurton, 1998).

Le nombre de faisceaux par fauchée des SMF varie grandement selon la gamme d'équipement et peut actuellement atteindre plusieurs centaines de faisceaux pour plus d'un millier de points de sonde (p. ex. le Reson SeaBat IDH T20). Ce nombre a notamment régulièrement augmenté depuis les premiers SMF de la fin des années 1970 qui possédaient 21 faisceaux (Burke and Robson, 1975). Selon les modèles, les faisceaux sont émis sous un angle d'ouverture compris entre 4° (par exemple le Odom Hydrographic MB1) et 0,5° (p. ex. le Kongsberg Em® 712). La répartition des faisceaux peut se faire de façon équiangulaire avec un angle θ d'ouverture constant, ou bien de façon équidistante avec une distance au fond constante entre chaque pied de faisceau. La fauchée du SMF durant les mesures bathymétriques dépendra donc non seulement de l'ouverture angulaire totale (qui peut atteindre 160° pour les R2Sonic 2022, 2024 et 2026), mais également de la profondeur. Ainsi, plus la hauteur d'eau est importante, plus la fauchée du SMF sera large. Par exemple, pour un angle d'ouverture de plus ou moins 120°, la zone insonifiée par la fauchée correspond à 3,5 fois la profondeur. Pour un angle de 150°, la fauchée sera de 7,4 fois la profondeur. La résolution des cartes bathymétriques obtenues dépendra principalement de la densité des points de sonde sur la fauchée du SMF. Ainsi, pour un nombre de sondes constant, plus la fauchée sera importante et plus la densité de points sera faible, mais la surface cartographiée sera plus importante.

| Modèle | WBMS | 2022 | ME70 | Seabat 7160 | EM 124 |
|---|--|--|--------------|-------------|-----------------|
| Fabricant | Norbit | R2Sonic | Simrad | Teledyne | Kongsberg |
| Fréquences d'émission | 200 – 700 kHz | 170 – 700 kHz | 70 – 120 kHz | 41 – 47 kHz | 10,5 – 13,5 kHz |
| Ouverture angulaire transversale par faisceau | 0,9° x 0,9° à 400 kHz 0,5°x0,5° à 700 kHz | 1° x 1° à 400 kHz 0,6° x 0,6° à 700 kHz | 2° x 2° | 2° x 1,5° | 0,5° x 1° |
| Ouverture angulaire transversale totale | 210° | 160° | 140° | - | - |
| Portée | 275 m | 400 m | 700 m | 3000 m | |

Tableau 1. Exemples de sondeurs multifaisceaux et de leurs caractéristiques. À noter que chaque fabricant propose plusieurs gammes de sondeurs avec des portées et des caractéristiques intrinsèques différentes

La bathymétrie, comme toute mesure réalisée avec un SMF, nécessite une correction d'attitude liée aux mouvements du navire réalisant les mesures. Selon un axe orthonormé en trois dimensions avec pour référentiel le navire de mesure, trois phénomènes d'oscillation influent sur le calcul de la bathymétrie : (i) le roulis soit l'oscillation du navire autour de l'axe longitudinal X ; (ii) le tangage soit l'oscillation autour de l'axe transversal Y ; (iii) le lacet soit les rotations autour de l'axe Z. À ces trois phénomènes d'oscillation s'ajoutent trois phénomènes de translation toujours sur le même axe orthonormé : (i) le cavalement soit le mouvement de translation sur l'axe longitudinal X (dans la direction de l'avant du navire) ; (ii) l'embarquée soit la translation sur l'axe transversal Y ; (iii) le pilonnement soit les translations verticales sur l'axe Z. L'ensemble de ces variations liées au mouvement du navire sont mesurées en temps réel par une centrale d'attitude couplée au SMF afin de corriger les erreurs qu'elles induisent sur la mesure bathymétrique, ainsi qu'au système de positionnement pour corriger la dérive de l'embarcation.

En plus de corrections liées à l'attitude du navire, il est nécessaire d'apporter des corrections en fonction de la réfraction des ondes acoustiques. En effet, la trajectoire de l'onde sonore dépendra de la célérité du son dans l'eau et pourra être déviée dans le cas de profils de célérité particuliers (thermocline, arrivée d'eau douce) (Brekhovskikh et al., 2003). Chaque mesure bathymétrique s'accompagne donc obligatoirement d'un contrôle de la célérité en continu à proximité du sondeur et de la réalisation régulière de profils de célérités en fonction de la profondeur. Ces mesures permettent ainsi de corriger la réfraction et d'éviter les artefacts induits par la mauvaise correction de la célérité.

Enfin, tout levé bathymétrique, qu'il soit réalisé ou non avec un SMF, nécessite un système de positionnement permettant un géoréférencement précis. La technique généralement retenue pour obtenir la meilleure précision de positionnement implique l'utilisation d'un système GNSS (*Global Navigation Satellite System*) RTK (*Real Time*

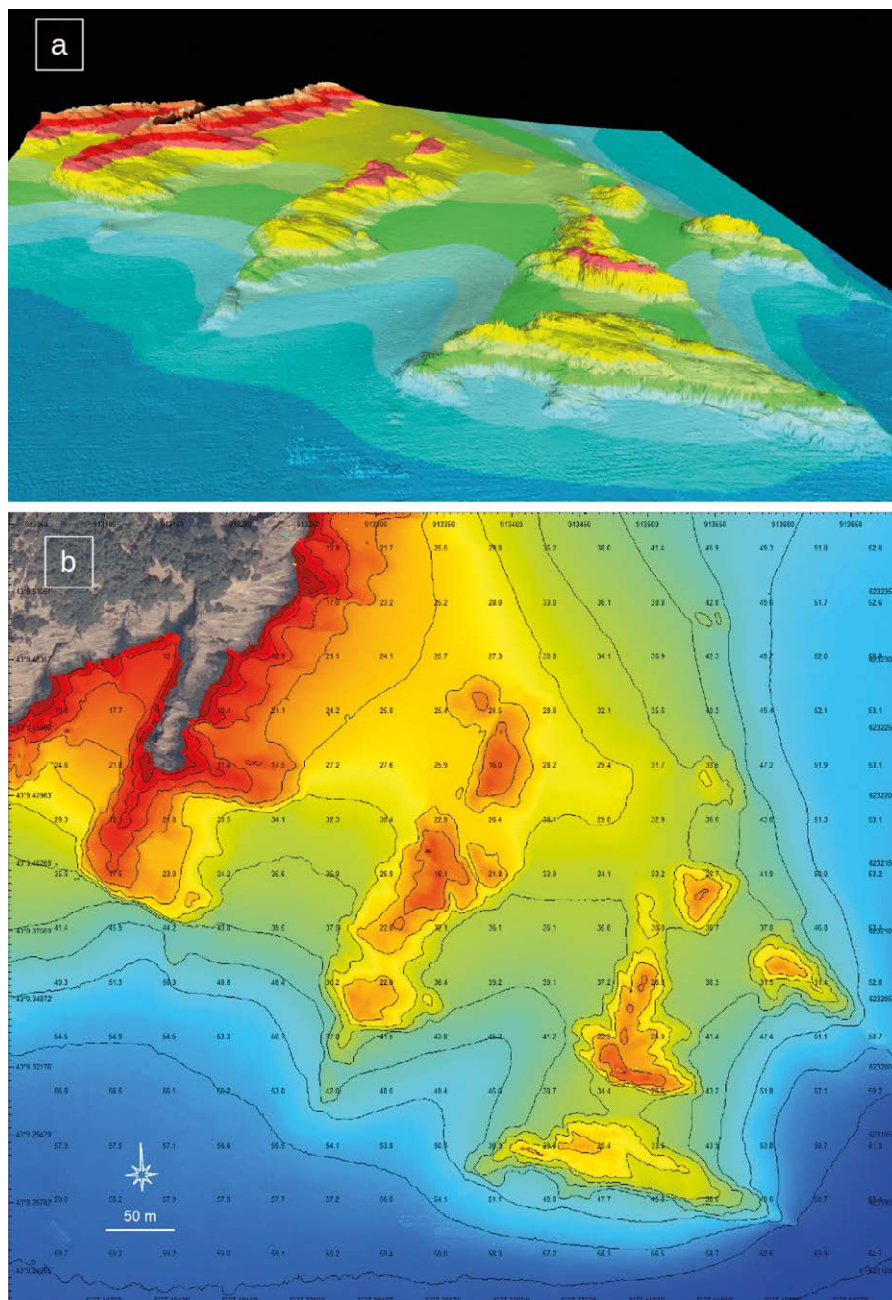


Figure 3. Rendus d'un levé au sondeur multifaisceaux R2SONIC 2022 à proximité de l'Île Verte à La Ciotat (Bouches-du-Rhône) : a) Carte bathymétrique en "fausses couleurs" avec isobathes et points de sonde ; b) Carte bathymétrique 3D de la même zone.

Kinematic) comprenant un récepteur GNSS, deux antennes et une base pour des mesures en mode différentiel. Selon la gamme du matériel et le constructeur, le récepteur peut être intégré à la centrale d'attitude (comme les sondeurs R2Sonic et les centrales Applanix) et ainsi fournir des précisions de positionnement potentiellement supérieures au RTK en intégrant les corrections d'attitude au géoréférencement classique, et en fournissant une position en continu même en cas de masquage (Stubbing et Smith, 2015). Selon les objectifs et

les limitations logistiques de l'étude, d'autres systèmes de positionnement moins précis peuvent être utilisés tels que des DGPS (*Differential GPS*) pour une précision de quelques mètres ou la méthode PPP (*Precise Point Positioning*) pour une précision de quelques décimètres (Clarke, 2018).

Une fois les données acoustiques (élimination des faux échos), de célérité et de positionnement traitées et compilées, un modèle numérique de terrain (MNT) est alors généré sous la forme d'un nuage de points de sonde géoréférencé en trois

dimensions représentant les variations d'altitude des fonds marins. Ce nuage de points peut être fourni sous la forme d'une carte en trois dimensions du fond marin (voir Figure 3a). Les rendus cartographiques peuvent aussi se présenter sous la forme de cartes en deux dimensions représentant les isobathes des profondeurs selon une densité de points de sonde préétablie ou les variations de profondeur symbolisées par des changements de couleur (voir Figure 3b).

La réalisation de mesures bathymétriques requiert donc une grande rigueur technique, que ce soit lors de la réalisation des levés ou durant le traitement des données acoustiques. Dans cette optique, l'Organisation hydrographique internationale (OHI) propose un ensemble de normes (OHI, 2011) et de documents de référence (réglementation en vigueur dans chaque pays, documents techniques) afin de définir un standard de qualité pour les levés hydrographiques à l'échelle internationale. En France, ces standards sont repris par l'Association francophone d'hydrographie (AFHY) sous la forme de recommandations pour les levés bathymétriques (AFHY, 2008).

Imagerie SMF

Utilisés classiquement pour réaliser des levés bathymétriques, les SMF possèdent cependant la capacité de fournir en parallèle d'autres types de données acoustiques. La réflectivité en fait notamment partie. Le principe de fonctionnement de l'imagerie du SMF est relativement proche de celui du sonar à balayage latéral, un faisceau acoustique étroit avec un certain angle d'incidence permettant de mesurer l'intensité de la réflectivité du fond, cette dernière variant selon sa nature (sable, roche, vase, herbiers...) (Nishimura, 1997). La génération de telles images acoustiques est rendue possible par la large ouverture des SMF (Lurton, 1998). Les premières cartes de réflectivité fournies par les SMF étaient cependant de moindre qualité comparée à celles obtenues avec les sonars latéraux du fait de la résolution longitudinale inférieure et du faible angle d'incidence des faisceaux du SMF (Le Bas et Huvenne,

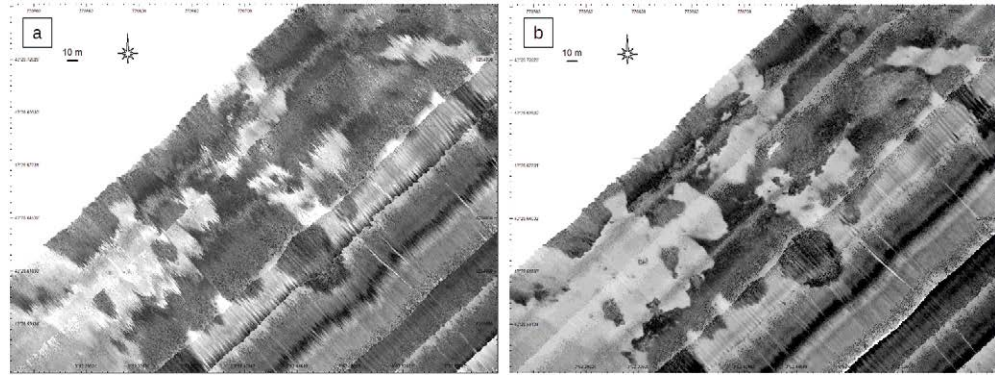


Figure 4. Amélioration des images sonar d'un sondeur multifaisceaux avec moyennage sur les "snippets" : a) avant moyennage ; b) après moyennage.

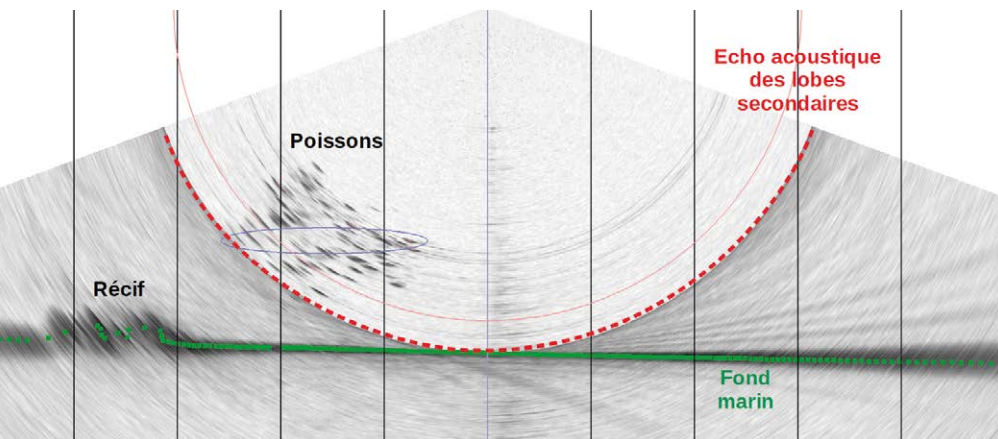
2009). Les progrès techniques des dernières décennies en matière de collecte et de traitement des données SMF combinés à l'acquisition simultanée de la bathymétrie permettent désormais d'obtenir une imagerie fournissant autant d'informations, voire plus, que celles des seuls sonars latéraux (Brown et Blondel, 2009). L'une des sources d'amélioration de la qualité de l'imagerie SMF a pour origine l'analyse poussée du signal retour des faisceaux émis selon une incidence oblique (voir Figure 4). Plus exactement, le signal acoustique émis, interagissant avec le fond avant qu'il n'atteigne son niveau de réponse maximum, se propage dans le faisceau. Il en résulte un écho allongé du fond marin dont la signature acoustique est appelée "snippet" (Lurton et al., 2015). En moyennant l'ensemble des points de mesure au voisinage de l'extrémité du faisceau, il est possible de réduire le bruit de mesure et ainsi d'obtenir une image de réflectivité plus nette.

L'imagerie est utilisée dans une optique de détection de structures naturelles dont les roches et récifs et artificielles immergées comme les épaves, récifs artificiels, mines, et de classification de la nature des fonds marins en complément des informations apportées par le relief (bathymétrie). Concernant cette dernière application, sa principale utilisation est la détermination de la nature sédimentaire du fond. Au cours des dernières décennies, de nouvelles méthodes d'analyse ont vu le jour afin d'aller plus loin dans la détection de la nature du substrat pour aboutir à des techniques de classification des habitats (par exemple roche, herbiers

sous-marins, couverts algaux) (Hasan et al., 2012). Généralement, deux types d'analyses permettent d'exploiter les images sonar fournies par les SMF : (i) l'approche géoacoustique consistant à identifier des signatures acoustiques correspondant à des types spécifiques de fonds marins d'un point de vue sédimentaire (granulométrie, porosité, densité, etc.) ou biocénotique (nature du substrat, type de peuplement). Cette recherche de signatures acoustiques est couplée à l'utilisation de données additionnelles (p. ex. des observations de terrain et des prélèvements) ; (ii) la classification orientée objet consistant à identifier sur les images des attributs particuliers sous la forme de regroupement de pixels (Brown et al., 2011). Ce dernier type d'analyse est notamment couramment utilisé sur les images de sonars latéraux.

À la haute résolution des images sonar acquises avec un SMF récent s'ajoute une précision de positionnement supérieure à celle fournie par les sonars tractés. Il est en effet évident que le positionnement des mosaïques sonar issues d'un appareil fixé à la coque d'un navire, couplé à une centrale d'attitude avec des excentres (*offsets*) d'intégration maîtrisés, est plus précis que celui d'un appareil tracté dont la position est définie en fonction de celle du navire l'employant, de sa profondeur, de la longueur de câble déroulé et de l'angle de ce dernier. Ainsi, tandis que la précision de positionnement obtenue avec sonar tracté est métrique, celle du SMF est équivalente à celle du système de positionnement du navire et peut ainsi potentiellement être centimétrique (Brissette et Clarke, 1999).





L'imagerie colonne d'eau

En complément de la bathymétrie et de l'imagerie du fond, les SMF sont également capables de fournir un troisième type de données acoustiques : une imagerie acoustique de la totalité de la colonne d'eau ou "water column imaging" (WCI) en anglais. Classiquement, les SMF se limitent à la mesure de la profondeur en filtrant grâce à des algorithmes les données acoustiques présentes au-dessus du fond marin. Le WCI consiste ainsi à récupérer ses données sur l'ensemble des faisceaux du SMF afin de produire une image acoustique de la colonne d'eau (von Deimling et Weinrebe, 2014). Le WCI prend la forme d'images de l'ensemble de la colonne d'eau (de la position du sondeur jusqu'au fond) sur laquelle figurent des échos réverbérés lors d'un cycle émission/réception (voir Figure 5). Les données sont originellement enregistrées dans un système de coordonnées polaires et sont ensuite converties dans un repère cartésien pour obtenir une représentation graphique plus aisément interprétable (ce qui explique la forme d'éventail de l'image). Les lignes courbes apparaissant sur les images sont dues à des échos issus des lobes secondaires indésirables de la fonction de directivité du transducteur (Clarke, 2006). Jusqu'à une date récente, l'important volume de données générées par cette technologie ne permettait pas de la mettre en œuvre sur des zones de grande taille. Cette difficulté, bien que toujours présente, n'est plus un obstacle du fait de l'amélioration des capacités de transfert et de stockage des fichiers informatiques. Ainsi, l'acquisition de données pour le WCI peut désormais être réalisée tant avec des bâtiments océanographiques de haute mer, qu'avec des embarcations de tailles plus modestes en eaux côtières.

Le WCI permet de reconnaître plusieurs types de cibles acoustiques dans la colonne d'eau dont voici une liste non exhaustive : (i) la traînée du bateau (voir Figure 6a) qui constitue des échos acoustiques pouvant masquer d'autres cibles ; (ii) les émanations gazeuses comme le largage de CO₂ par des fissures sous-marines ou les bulles des plongeurs (voir Figure 6b) ; (iii) les objets

Figure 5. Exemple d'image de la colonne d'eau obtenue avec un sondeur multifaisceaux R2SONIC 2022.

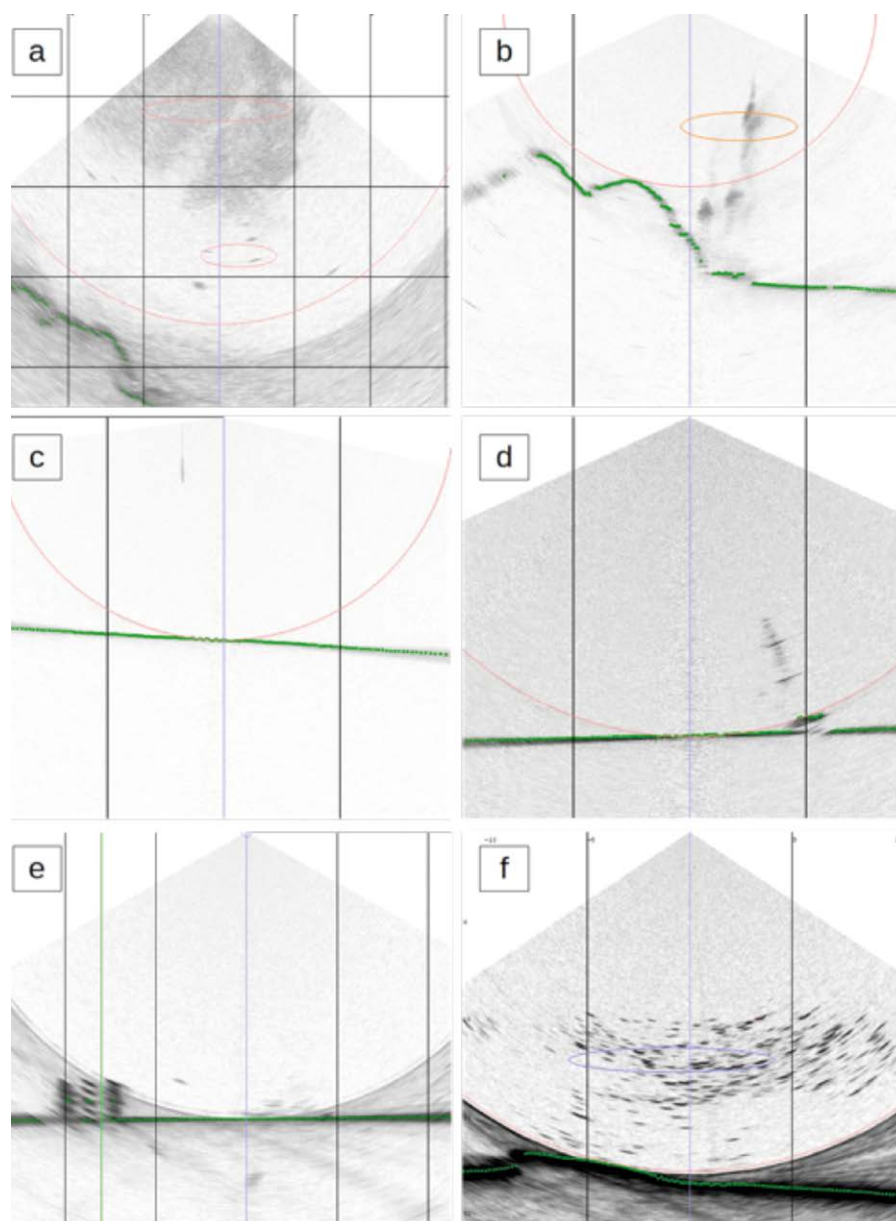
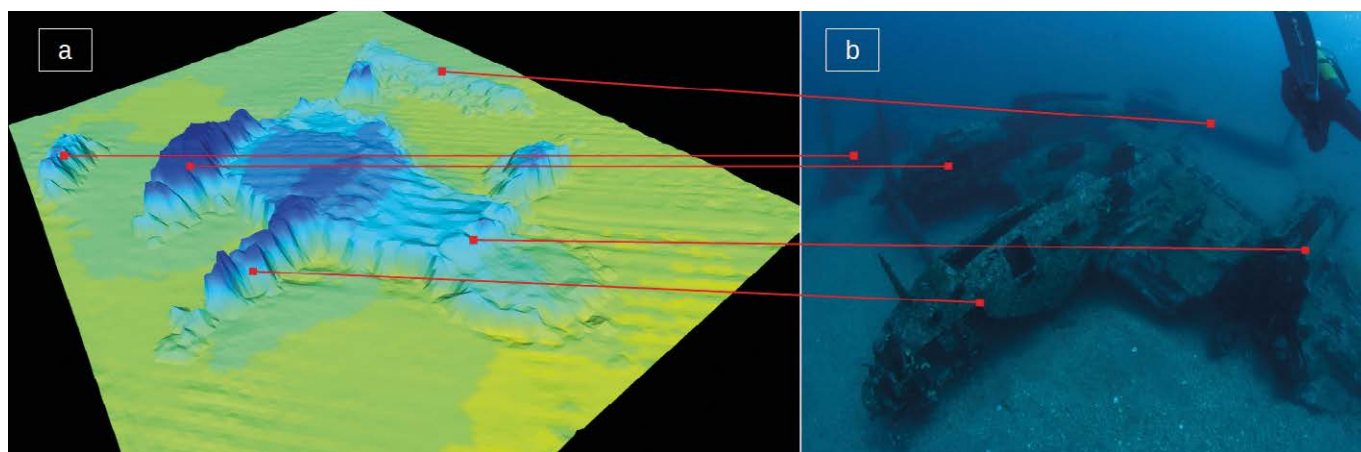


Figure 6. Exemples de cibles acoustiques identifiables sur l'imagerie de la colonne d'eau : a) sillage du navire ; b) bulles de plongeurs ; c) bout ; d) épave de voilier ; e) récif artificiel ; f) banc de poissons.



(Photo : A. Abadie)

Figure 7. Exemple de cartographie fine en 3D d'une épave de chasseur P38 de la Seconde Guerre mondiale avec a) la bathymétrie 3D obtenue avec un sondeur multifaisceaux R2SONIC 2022 comparée à b) une photographie de l'épave réalisée en plongée sous-marine.

flottants entre deux eaux ou arrimés au fond tels que des bouts (voir Figure 6c) ou des débris d'arbres ; (iv) des structures artificielles reposant sur le fond tel que des épaves (voir Figure 6d) et des récifs artificiels (voir Figure 6e) ; (v) les bancs de poissons (voir Figure 6f) (Colbo et al., 2014).

Le champ d'utilisations des données obtenues à partir du WCI est vaste. Les principales applications actuelles concernent l'amélioration des cartes bathymétriques produites en récupérant des données acoustiques pertinentes éliminées par les algorithmes de traitement des SMF ou non détectées, ainsi que l'étude des ressources halieutiques. Si le nombre de thématiques d'étude est potentiellement important, l'analyse des images de la colonne d'eau reste limitée par le manque de méthodes de traitement automatisées. Cependant, la possibilité d'acquérir et de stocker ce type de données étant récente (moins de dix ans), de nouvelles techniques d'analyse telles que la *particle imagery velocimetry* (PIV) pour la détection des bulles de sources gazeuses (Von Deimling et Papenberg, 2012), ou la détection automatique de poissons (Melvin et Cochrane, 2015), devraient être pleinement opérationnelles dans les prochaines années.

Évolutions et nouvelles applications

Les évolutions majeures dans les utilisations des SMF sont indissociables de l'amélioration du matériel de mesure,

et donc de l'effort de recherche et développement réalisé par les fabricants de matériel acoustique. De même que le matériel permettant de réaliser les mesures est primordial, les développements de logiciels permettant de visualiser, traiter et analyser les données acoustiques sont un enjeu majeur pour étendre les domaines d'utilisation des SMF. La mise au point de logiciels de dépouillement et de traitement des données acoustiques brutes est réalisée par des organismes privés généralement dissociés des fabricants de sondeurs (p. ex. les logiciels QINSy et Hypack). Les logiciels d'analyse des données et la recherche de nouvelles applications sont quant à eux le plus souvent de l'initiative de structures de recherche publique (c'est le cas en France d'Ifremer, du Shom et des universités) et de projets de R&D privés.

L'un des principaux domaines d'amélioration logiciel concerne la gestion de l'important volume de données généré lors des levés au SMF. Les méthodes actuellement en cours de développement se basent sur l'utilisation de réseaux artificiels de neurones pour réduire la taille des fichiers de données et ainsi faciliter leur traitement (Wlodarczyk-Sielicka et Stateczny, 2016). Après l'acquisition et le stockage des données, un effort de recherche informatique est également réalisé au niveau de leur traitement avec notamment la mise au point d'algorithmes de détection et de qualification des sondes des SMF, permettant notamment la qualification en temps réel de la mesure

acoustique et une meilleure représentation des cibles sous-marines (épaves) (Ladroit, 2012). Enfin, les réseaux artificiels de neurones sont également employés lors de l'analyse des produits issus des données des SMF (bathymétrie, mosaïques d'images acoustiques) pour générer automatiquement des cartes de la nature des fonds (Marsh et Brown, 2009).

L'amélioration constante des performances des SMF se traduit par une augmentation régulière du nombre de sondes fournies pour une même ouverture angulaire totale. À cet accroissement du nombre de points de sonde s'ajoute une augmentation des fréquences maximales d'acquisition. L'ensemble de ces améliorations se traduit sur les cartographies par une meilleure résolution des cartes bathymétriques produites et notamment de la finesse des modèles 3D qui en découlent (voir Figure 7). L'augmentation de la résolution de mesure du relief sous-marin en trois dimensions permet ainsi un suivi plus détaillé de l'évolution de structures naturelles (mouvement d'un banc de sable, apports en sédiments et érosion d'une plage...).

La réalisation de levés bathymétriques n'est pas le seul domaine impacté par les évolutions techniques des SMF. Leur fonctionnement est également modifié avec la disponibilité de l'option dite "multispectrale" chez certains fabricants (par exemple Norbit avec le iWBMSse, R2Sonic avec le 2022) qui permet d'acquérir des données alternativement avec des paramètres différents



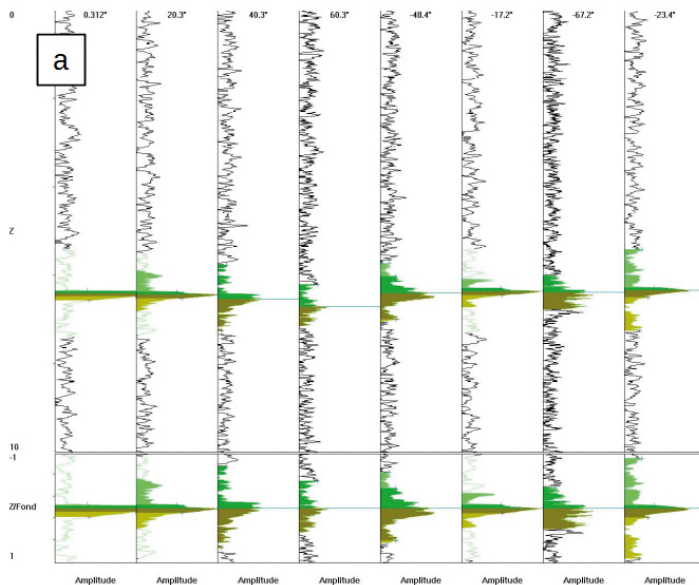
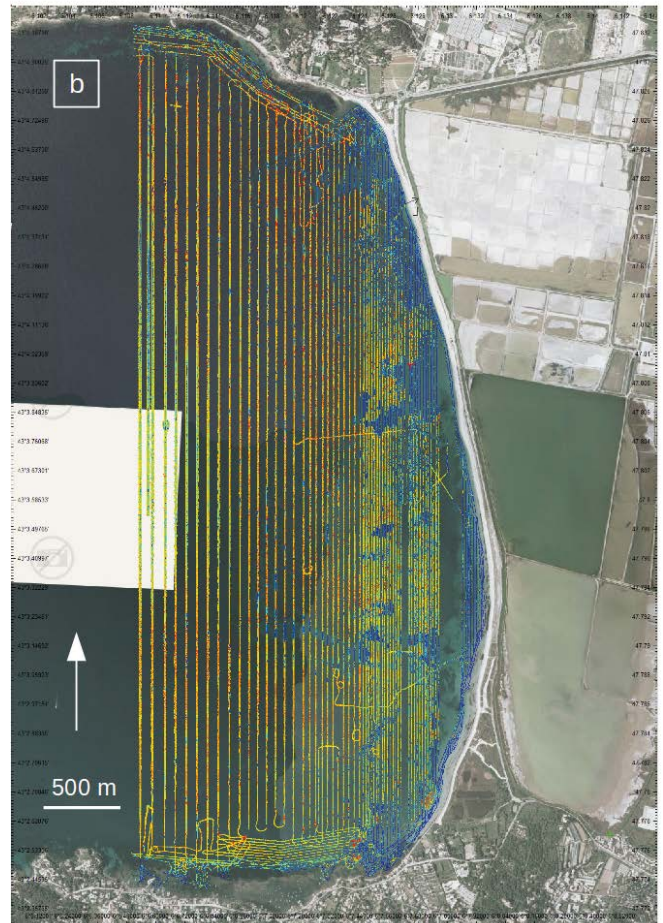


Figure 8. L'écho-intégration au sondeur multifaisceaux : a) analyse automatique du signal sur plusieurs faisceaux ; b) carte de l'écho-intégration d'un herbier sous-marin sur la partie ouest du Tombolo de Giens.



(dont fréquence et angle d'ouverture). Cette fonction, récemment disponible, est utilisée en imagerie SMF et permet notamment une meilleure discrimination des variations de nature sédimentaire des fonds marins (Feldens et al., 2018).

Les évolutions matérielles tendent également vers la production de modèles de SMF de taille plus réduite, permettant ainsi de les embarquer sur des navires de taille modeste pour réaliser des mesures hydrographiques en zone côtière et en eaux intérieures sur des zones difficiles d'accès. Ces systèmes peuvent même être employés sur des drones autonomes de surface (*unmanned survey vessel* ou USV) pour réaliser des levés acoustiques à très faible profondeur ou dans des zones difficiles d'accès pour un navire classique (Abadie et al., 2018).

La polyvalence des SMF et les récentes avancées techniques en informatique accélèrent l'émergence de techniques innovantes d'analyse des signaux et de l'imagerie acoustique. Ainsi, les systèmes acoustiques de classification des fonds (SACLAF) qui étudient la nature du fond marin, en détectant une signature acoustique sur le signal de la colonne d'eau au voisinage du substrat (Ehrhold, 2003), ne sont plus réservés aux sondeurs monofaisceau grâce aux dernières évolutions du

matériel multifaisceaux décrits dans le chapitre précédent. Depuis le début des années 2010, des SACLAF ont été adaptés à l'emploi des SMF non seulement en reproduisant la méthode classique, mais également en créant de nouvelles exploitant leur large fauchée et leur haute densité de points de sonde. L'adaptation du SACLAF monofaisceau au SMF correspond ainsi à appliquer une analyse d'écho-intégration non plus sur un unique faisceau au nadir, mais sur l'ensemble des faisceaux constituant la fauchée du SMF (*voir Figure 8*). Cependant, même avec un SMF, l'écho-intégration n'est efficace qu'au voisinage du nadir car l'augmentation de l'angle d'incidence du faisceau déforme de façon importante la réponse impulsionnelle.

Par ailleurs, la perturbation du signal reçu due aux lobes secondaires est beaucoup plus importante sous les angles de fortes incidences. En intégrant l'énergie réfléchi au voisinage de l'écho du fond, dans des intervalles pertinents par rapport à la classification recherchée, la méthode SACLAF reste

performante pour identifier la végétation sous-marine (intégration avant l'écho du fond) et détecter les variations de faciès sédimentaires (intégration après l'écho du fond) (Viala et al., 2007). Néanmoins, comme toute méthode de classification des fonds, cette technique ne s'affranchit pas de caractérisations visuelles et est employée en complément des images sonar et d'échantillonnages *a posteriori* (Ehrhold, 2003).

Afin de pallier au manque de couverture surfacique de l'écho-intégration pour la classification des fonds, un second SACLAF nommé BATCLAS (*Bathymetric Automated Treatment for Classification of the Seafloor*) a été récemment mis au point par Abadie et al. (2018) pour mettre automatiquement en évidence les structures naturelles et anthropiques. Cet algorithme de traitement n'utilise plus les données de la colonne d'eau, mais calcule la rugosité du fond avec une très haute résolution à partir des données bathymétriques. Cette méthode est particulièrement efficace pour détecter les herbiers sous-marins, les roches immergées (même affleu-

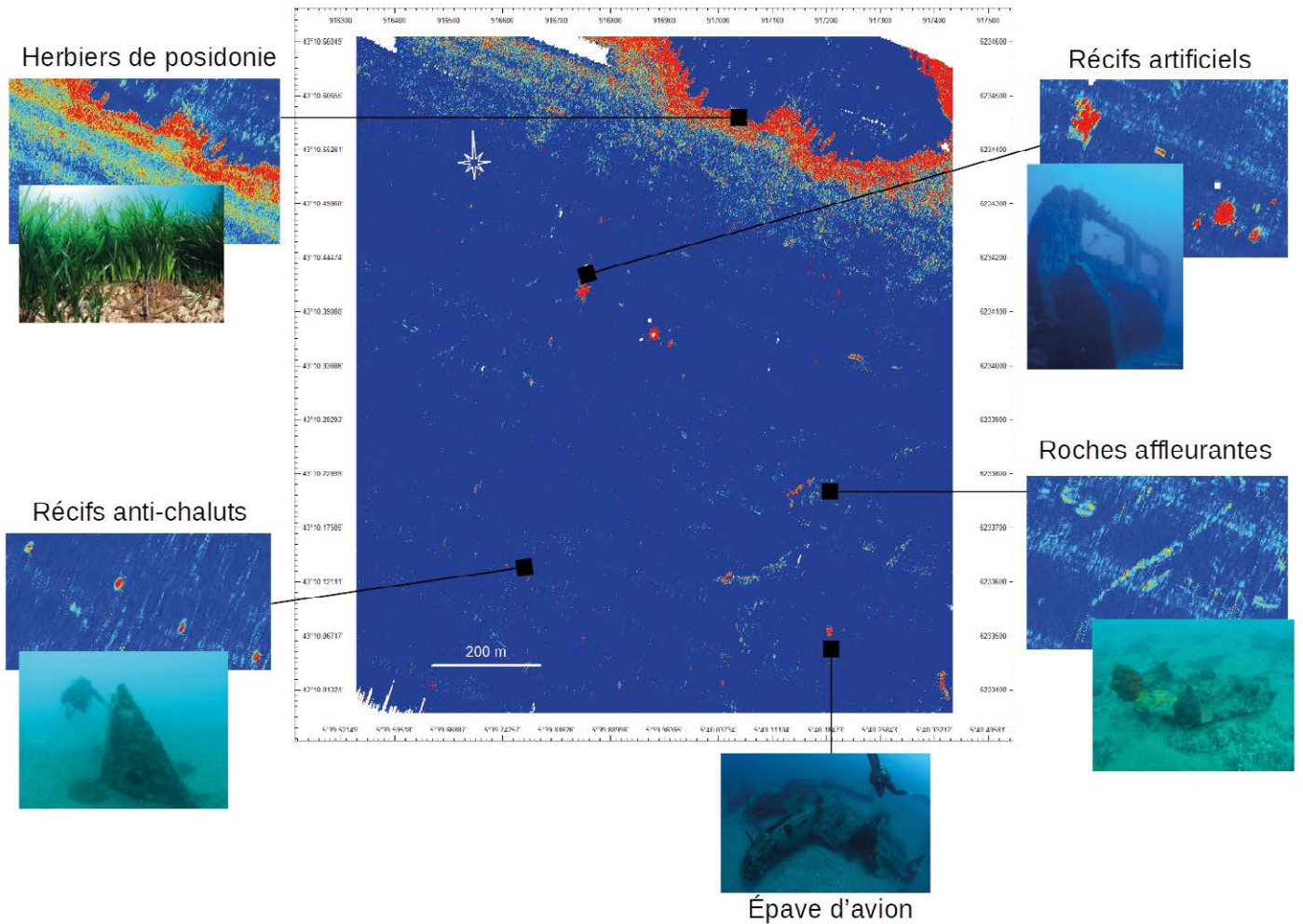


Figure 9. Exemple d'application du calcul de la rugosité (BATCLAS) pour cartographier les habitats marins et détecter les structures naturelles et artificielles.

rant à peine le sédiment), les épaves et autres structures artificielles (*voir Figure 9*). Les champs d'applications sont très vastes, allant de la cartographie fine de la structure des herbiers sous-marins à la détection de roches et d'objets artificiels de petite taille et leur positionnement précis.

En réalisant une mesure acoustique sur l'ensemble de la colonne d'eau, l'écho-intégration permet également d'obtenir des données halieutiques en trois dimensions (Gerlotto et al., 1999). Tout comme les SACLAF, ce système a été initialement développé sur des sondeurs monofaisceau pour être ensuite adapté à des SMF. Le premier sondeur multifaisceaux halieutique (ou SMFH), le ME70 de Simrad, a été testé par l'Ifremer en 2005 afin de déterminer ses capacités à détecter des bancs de poissons dans la colonne d'eau (Trenkel et al., 2008).

Ce système permet d'obtenir une vision en deux, trois ou quatre dimensions des échos acoustiques dans la colonne d'eau en réalisant l'écho-intégration sur des tranches bathymétriques. Plus récemment, un système multifaisceaux complexe (le SeapiX) combinant plusieurs transducteurs montés en croix pour obtenir en temps réel une imagerie en trois dimensions de la colonne d'eau a été développé par la société iXblue. Le principe de détection des poissons du SeapiX repose sur la détection des échos de poissons dans la colonne d'eau en mesurant l'intensité et un coefficient volumique de la réflectivité des cibles acoustiques (Mosca et al., 2016).

Conclusions et perspectives

Parmi l'ensemble des appareils acoustiques actifs actuellement disponibles pour réaliser des mesures hydrogra-

phiques, le SMF apparaît comme étant le plus polyvalent en regroupant les caractéristiques permettant de réaliser des mesures par formation de voie sur plusieurs faisceaux acoustiques avec une précision de positionnement centimétrique et une haute résolution des rendus, tout en bénéficiant d'une large fauchée de mesure et d'une forte densité de points de sonde (*voir Tableau 2*).

Les performances des SMF les rendent de plus en plus attractifs pour des organismes publics et privés même de petite taille (comme les ports et les bureaux d'études) et ne sont donc plus réservés aux organismes publics de recherche. De plus, l'augmentation de la diversité des applications, et donc de la demande, devrait mener à l'émergence de systèmes simplifiés et moins coûteux adaptés aux besoins des structures privées de petite taille, leur permettant ainsi de répondre aux attentes des

| Type d'appareil | Sondeur monofaisceau | Sonar à balayage latéral | Interféromètre | Caméra acoustique | Sondeur multifaisceaux |
|---|--|---|---|---|--|
| Type de mesure | Réponse impulsionnelle | Réponse impulsionnelle | Réponse impulsionnelle. Améliorée par la connaissance de l'angle au cours du temps | Plusieurs centaines de réponses impulsionnelles calculées par formation de voie | Plusieurs centaines de réponses impulsionnelles calculées par formation de voie |
| Nombre d'angles de mesure (transversalement) | Un angle fixe (nadir) dû à la directivité du transducteur | Plusieurs mal déterminés - 1 ^{er} écho supposé au nadir - Puis l'hypothèse fond plat permet d'affecter un angle en fonction du retard de propagation | Par interférométrie, mal discriminé au nadir | Plusieurs centaines dues à la formation de voie | Plusieurs centaines dues à la formation de voie |
| Fréquences | 1 à 500 kHz | 100 à 900 kHz | 100 à 500 kHz | 1,35 à 2,25 MHz | 12 à 500 kHz |
| Ouverture angulaire longitudinale | 5 à 30° | 0,5° | 1° | 30° | 0,5° |
| Ouverture angulaire transversale par faisceau | 5 à 30° | 1° | 1° | 1° | 0,5 à 4° |
| Ouverture angulaire transversale totale | 5 à 30° | 180° | 180° | 42 à 76° | 150° |
| Portée | 3 à 4 000 m | 1 à 15 m (par rapport au fond) | 30 cm à 200 m | 30 à 100 m (autour de l'emplacement de la caméra) | 1 à 12 000 m |
| Prix | 10 000 à 50 000 € | 30 000 à 80 000 € | 40 000 à 100 000 € | 30 000 à 130 000 € | Supérieur à 50 000 € |
| Applications | Bathymétrie Structures géologiques Processus sédimentaires Archéologie Classification des fonds Halieutique | Faciès sédimentaires Cartographie des habitats marins Détection de structures artificielles | Faciès sédimentaires Cartographie des habitats marins Détection de structures artificielles | Bathymétrie Inspection Suivi d'ouvrage | Bathymétrie Archéologie Classification des fonds Halieutique Faciès sédimentaires Cartographie des habitats marins Détection de structures artificielles |

Tableau 2. Comparaison des caractéristiques des différents appareils de mesure en acoustique sous-marine active.



gestionnaires en charge de la sécurité de la navigation et de la gestion des ressources environnementales.

Si les SMF développés dans les années à venir sont plus compacts, moins coûteux et déployés sur des embarcations autonomes et de taille réduite, quelles seront les technologies acoustiques de mesure utilisées en hydrographie dans un futur plus lointain ? L'avenir de l'hydrographie semble se tourner vers une utilisation plus poussée de l'analyse en trois dimensions des données acoustiques (par exemple estimation des ressources halieutiques, détection d'épaves, inspection d'ouvrages immergés), et une augmentation de la résolution des données acquises pour un élargissement permanent des domaines d'applications qui ne se

limitent plus désormais aux mesures bathymétriques et à l'imagerie de la réflectivité des fonds. ●

Références

Abadie, A., Marty, P., Viala, C., 2018. *BATCLAS index: A new method to identify and map with high resolution natural and artificial underwater structures on marine wind turbine sites*, in: 3rd Wind Energy and Wildlife Seminar. pp. 120-127.
 AFHY, 2008. *Recommandations pour la conduite d'un levé bathymétrique réalisé dans le domaine portuaire, côtier ou fluvial*. AFHY.
 Anderson, J.T., Van Holliday, D., Kloser, R., Reid, D.G., Simard, Y., 2008. *Acoustic seabed classification: current practice and future directions*. ICES J. Mar. Sci. 65, 1004-1011.
 Blondel, P., 2012. *Bathymetry and its*

applications. InTech Open Access Publisher, Croatia.

Brekhovskikh, L.M., Lysanov, Y.P., Lysanov, J.P., 2003. *Fundamentals of ocean acoustics*, Third. ed. Springer Science & Business Media, New York.

Brissette, M., Clarke, J.E., 1999. *Side scan versus multibeam echo sounder object detection: Comparative analysis*. Int. Hydrogr. Rev. 76, 21-34.

Brown, C.J., Blondel, P., 2009. *Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping*. Appl. Acoust. 70, 1242-1247.

Brown, C.J., Smith, S.J., Lawton, P., Anderson, J.T., 2011. *Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 92, 502-520. <https://doi.org/10.1016/j.ECSS.2011.02.007>



- Burke, R., Robson, J., 1975. *An Evaluation of the BO'SUN Multi-Beam Sonar System*. Int. Hydrogr. Rev. 52.
- Clarke, J.E.H., 2018. *Multibeam echosounders*, in: Micallef, A., Krastel, S., Savini, A. (Eds.), *Submarine Geomorphology*. Springer, pp. 25–41.
- Clarke, J.E.H., 2006. *Applications of multibeam water column imaging for hydrographic survey*. Hydrogr. J. 120, 1–33.
- Clarke, J.E.H., Mayer, L.A., Wells, D.E., 1996. *Shallow-water imaging multibeam sonars: a new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf*. Mar. Geophys. Res. 18, 607–629.
- Colbo, K., Ross, T., Brown, C., Weber, T., 2014. *A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 145, 41–56.
- D'Amico, A., Pittenger, R., 2009. *A brief history of active sonar*. Aquat. Mamm. 35, 426–434.
- Ehrhold, A., 2003. *L'application des Systèmes Acoustiques de Classification Automatique des natures de Fonds pour la cartographie des habitats : SACLAF*.
- Feldens, P., Schulze, I., Papenmeier, S., Schönke, M., von Deimling, J.S., 2018. *Improved Interpretation of Marine Sedimentary Environments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data*. Geosciences 8, 214.
- Gerlotto, F., Soria, M., Fréon, P., 1999. *From two dimensions to three: the use of multibeam sonar for a new approach in fisheries acoustics*. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 56, 6–12.
- Hasan, R.C., Ierodiaconou, D., Laurenson, L., 2012. *Combining angular response classification and backscatter imagery segmentation for benthic biological habitat mapping*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 97, 1–9.
- Katzir, S., 2012. *Who knew piezoelectricity? Rutherford and Langevin on submarine detection and the invention of sonar*. Notes Rec. R. Soc. rsnr20110049.
- Ladroit, Y., 2012. *Amélioration des méthodes de détection et de qualification des sondes pour les sondeurs multifaisceaux bathymétriques*. Télécom Bretagne, Université de Rennes 1.
- Le Bas, T.P., Huvenne, V.A.I., 2009. *Acquisition and processing of backscatter data for habitat mapping-comparison of multibeam and sidescan systems*. Appl. Acoust. 70, 1248–1257.
- Lurton, X., 2002. *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media, Chichester, UK.
- Lurton, X., 1998. *Acoustique sous-marine : présentation et applications*. Editions Quae, Plouzané, France.
- Lurton, X., Lamarche, G., Brown, C., Lucieer, V.L., Rice, G., Schimel, A., Weber, T., 2015. *Backscatter measurements by seafloor mapping sonars: guidelines and recommendations*, A collective report by members of the GeoHab Backscatter Working Group.
- Marsh, I., Brown, C., 2009. *Neural network classification of multibeam backscatter and bathymetry data from Stanton Bank (Area IV)*. Appl. Acoust. 70, 1269–1276.
- Melvin, G.D., Cochrane, N.A., 2015. *Multibeam acoustic detection of fish and water column targets at high-flow sites*. Estuaries and coasts 38, 227–240.
- Mosca, F., Matte, G., Lerda, O., Naud, F., Charlot, D., Rioblanco, M., Corbières, C., 2016. *Scientific potential of a new 3D multibeam echosounder in fisheries and ecosystem research*. Fish. Res. 178, 130–141.
- Nishimura, C.E., 1997. *Fundamentals of acoustic backscatter imagery*. Naval Research Lab Washinton DC Marine Physics Branch.
- OHI, 2011. *Normes OHI pour les levés hydrographiques*. Publication S-44. Bureau Hydrographique International, Monaco.
- Pastol, Y., 2011. *Use of airborne LIDAR bathymetry for coastal hydrographic surveying: the French experience*. J. Coast. Res. 6–18.
- Renard, V., Allenou, J.-P., 1979. *Le sea-beam, sondeur à multi-faisceaux du N/O Jean Charcot description, évaluation et premiers résultats*. Rev. Hydrogr. Int. 56, 557–593.
- Rolt, K.D., 1994. *The Fessenden oscillator: History, electroacoustic model, and performance estimate*. J. Acoust. Soc. Am. 95, 2832.
- Sternlicht, D.D., 2017. *Historical development of side scan sonar*. J. Acoust. Soc. Am. 141, 4041.
- Stubbing, D., Smith, K., 2015. *Surveying from a vessel using a Multibeam Echosounder and a terrestrial laser scanner in New Zealand*, in: Australasian Coasts & Ports Conference 2015. Engineers Australia and IPENZ, p. 860.
- Trenkel, V.M., Mazauric, V., Berger, L., 2008. *The new fisheries multibeam echosounder ME70: description and expected contribution to fisheries research*. ICES J. Mar. Sci. 65, 645–655.
- Viala, C., Noel, C., Coquet, M., Zerr, B., Lelong, P., Bonnefont, J.-L., 2007. *Pertinence de la méthode DIVA pour l'interprétation des mosaïques sonar latéral*, in: Third Mediterranean Symposium on Marine Vegetation, Marseille.
- Vilming, S., 1998. *The development of the multibeam echosounder: An historical account*. J. Acoust. Soc. Am 103, 1637–1638.
- von Deimling, J.S., Papenberg, C., 2012. *Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images*. Ocean Sci. 8, 175–181.
- von Deimling, J.S., Weinrebe, W., 2014. *Beyond bathymetry: Water column imaging with multibeam echo sounder systems*. Hydrogr. Nachrichten 31, 6–10.
- White, D.J., 1971. *BO'SUN, A Multi-Beam Sonar for Search and Survey*, in: *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Wlodarczyk-Sielicka, M., Stateczny, A., 2016. *Comparison of selected reduction methods of bathymetric data obtained by multi-beam echosounder*, in: *Geodetic Congress (Geomatics), Baltic*. IEEE, pp. 73–77.

Contacts

Arnaud ABADIE

Seaviews - ingénieur de recherche
abadie@seaviews.fr

Christophe VIALA

Seaviews - président
viala@seaviews.fr

ABSTRACT

Commonly used in hydrography, the multibeam echo sounder (or MBES) is an underwater acoustic sensor which is able to emit and receive sound signals on several beams. Its functioning rely on the emission of a sound signal reflected by the seafloor under the shape of an echo picked up by the device receiver. Since its creation at the end of the seventies, the multibeam echo sounder has classically been used to perform bathymetric surveys. However, its technical evolution over the last decades allows users to obtain simultaneously various information about the nature and the morphology of the seafloor, as well as in the water column, with a single sensor. The reader will find here a review of current multibeam echo sounder applications along with an insight of innovative techniques in hydrography.