

Les équipements acoustiques des navires océanographiques

Hervé Bisquay, Henri Floch, Xavier Lurton

IFREMER

Centre de Brest

Département Navires, Systèmes et Engins

Technopôle de Brest-Iroise

BP 70

29280 Plouzané

France

Tél. : 02 98 22 40 40

E-mail : herve.bisquay@ifremer.fr

E-mail : henri.floch@ifremer.fr

E-mail : xavier.lurton@ifremer.fr

Résumé

Les navires océanographiques modernes utilisent une large variété de systèmes acoustiques dont la définition, l'installation et la mise en œuvre font l'objet d'efforts particuliers. On décrit ici les fonctionnalités et les performances typiques de ces divers systèmes, en s'appuyant sur des exemples de navires français récents.

Abstract

Modern oceanographic vessels make use of a wide variety of acoustical systems, whose definition, installation and operation justify specific care. The functionalities and typical performances of these various systems are described here, using examples of recently-built French ships.

Les navires océanographiques

Les navires océanographiques sont employés par les instituts de recherche scientifique ou les services hydrographiques pour une large variété de tâches d'observation et de mesure de l'océan :

- Cartographie des fonds marins : mesures bathymétriques, imagerie des fonds marins, investigation sismique des sédiments superficiels ou profonds, prélèvements sédimentaires ;
- Observation de la biomasse : évaluation des stocks halieutiques à des fins scientifiques ou réglementaires ;
- Mise en œuvre d'engins autonomes ou téléguidés pour l'exploration géologique et biologique des grands fonds océaniques : mesures, visualisation et prélèvements ;



Fig. 1 : NO Pourquoi pas ?

Navire « polyvalent optimisé chantier », pouvant travailler en survey comme en station, et déployer dans la même campagne deux gros équipements submersibles. 107 mètres de long, propulsion diesel-électrique, 750 m² de surface de laboratoires et locaux scientifiques. Système de carottage et treuils grands fonds, appareils de mise en œuvre d'engins sous-marins lourds et de vedettes hydrographiques.

- Mesures des caractéristiques hydrologiques (courants, caractéristiques de l'eau de mer...);

Les navires affectés à ces missions sont aujourd'hui spécifiquement conçus à cet effet. Ils sont de taille très variable en fonction de leurs zones d'intervention (côtière ou hauturière) et peuvent être soit très spécialisés soit au contraire polyvalents.

La flotte océanographique française actuelle se compose de 6 navires hauturiers et une dizaine de navires côtiers, opérés par plusieurs organismes : l'IFREMER (Institut Français pour la Recherche et l'Exploration des Mers), le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), l'IPEV (Institut Paul Émile Victor), l'IRD (Institut de Recherche et Développement) et l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers).

Les équipements acoustiques des navires océanographiques

Les navires océanographiques sont équipés d'une large variété de systèmes acoustiques sous-marins, que l'on peut classer en plusieurs catégories :

- **Sonars de cartographie** : sondeurs mono et multifaisceaux, sondeurs pénétrateurs de sédiments, sonars latéraux ;
- **Sondeurs et sonars halieutiques** ;
- **Systèmes de sismique remorqués** ;
- **Systèmes de positionnement acoustique et de transmission** : récepteur pinger, base ultracourte, télécommande acoustique ;
- **Systèmes de navigation** : sondeur, loch Doppler ;
- **Autres systèmes** : courantomètre Doppler, système de monitoring acoustique.

Le tableau 1 liste à titre d'exemple les systèmes acoustiques équipant de manière permanente le *NO Pourquoi pas ?*. Des systèmes mobiles (sonar latéral, sismique) peuvent venir compléter cet ensemble. On ne décrit dans cet article que les systèmes de positionnement, de courantométrie Doppler, et les sondeurs multifaisceaux.

Installation des transducteurs

Les sonars sont équipés de transducteurs assurant l'émission (projecteurs) et la réception (hydrophones) des signaux sonores, et dont la taille varie en fonction de la fréquence et de la directivité des faisceaux acoustiques émis ou reçus.

	Fournisseur	Équipement	Fréquences (kHz)	Mesure
Sondeur monofaisceau	Kongsberg	EA 600	12/38/200	Profondeur à la verticale
Sondeurs multifaisceaux	Reson	Seabat 7150 Seabat 7111	12/24 100	Topographie du fond
Sondeurs multifaisceaux	Kongsberg	EM 3002	300	Topographie du fond en zones côtières (équipement des vedettes hydrographiques)
Pénétrateur de sédiments	IXSEA/IFREMER		2 à 8	Épaisseur des premières couches sédimentaires du sous-sol sous-marin
Base ultracourte	IXSEA	Posidonia	16	Positionnement d'un véhicule sous-marin
Récepteur pinger	Genavir	Sepia	12	Mesure de l'altitude d'un capteur au-dessus du fond
Télécommande acoustique	IXSEA	TT801	8 à 16	Dialogue avec une balise acoustique (ordre de largage, activation d'un transpondeur...) – mesures de distances
Courantomètre Doppler	RDI	Ocean Surveyor	38/150	Profil de courant
Monitoring acoustique	IFREMER	Sabrina	0,5 Hz à 300 kHz	Contrôle des performances acoustiques du navire
Loch Doppler	Skipper	DL 500	540	Vitesse du navire
	RDI	Workhouse navigator	1 200	
Sondeur de navigation	Kelvin Hughes	GDS101	50/200	Profondeur à la verticale

Tabl. 1 : Systèmes acoustiques équipant le *NO Pourquoi pas ?*

Bruit des navires océanographiques

Les caractéristiques acoustiques des navires océanographiques font aujourd'hui l'objet d'attentions particulières, du fait de la haute qualité attendue des sonars qui les équipent. L'accent est mis d'une part sur le niveau de bruit propre, venant perturber les équipements acoustiques portés par le navire lui-même, et d'autre part sur les performances en bruit rayonné, particulièrement pour les navires à vocation halieutique, dont la discrétion vis-à-vis de la biomasse doit être aussi bonne que possible. Les précautions à prendre lors de la construction sont les mêmes que celles prises pour la discrétion des sous-marins (voir article *Dirninger et al. dans ce numéro d'A&T*), avec des contraintes de performances moindres : propulsion diesel-électrique, design des hélices, optimisation hydrodynamique, protection contre le parasitage électrique, suspension des équipements bruyants, découplage des transducteurs... Les navires les plus récents (*Thalassa*, *Beautemps-Beaupré*, *Pourquoi pas ?*) ont été très soignés de ce point de vue par les chantiers navals, et présentent des caractéristiques très performantes (Fig. 2). Des hydrophones de monitoring du bruit permettent de contrôler régulièrement les caractéristiques de bruit du navire en situation d'opérations à la mer, et de détecter d'éventuels dysfonctionnements de systèmes acoustiques.

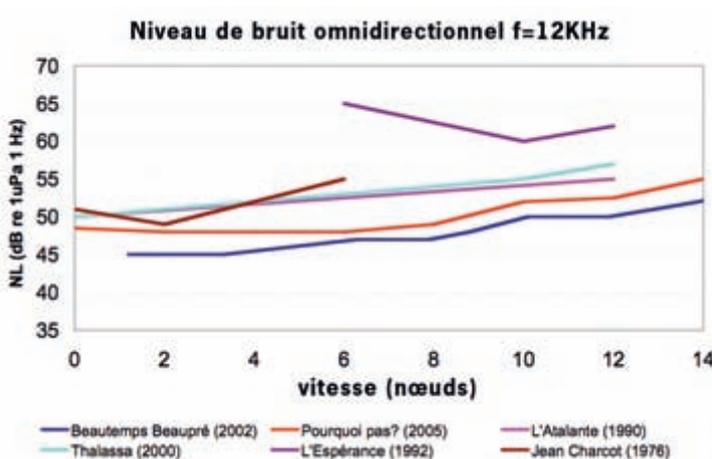


Fig. 2 : Niveaux de bruit propre mesurés à bord de divers navires océanographiques

Leur dimension peut être très importante : les antennes des sondeurs multifaisceaux grands fonds peuvent mesurer par exemple jusqu'à 8 mètres de long (afin de former des faisceaux de largeur 1° à une fréquence de 12 kHz).

De plus en plus fréquemment pour les navires hauturiers devant accueillir des antennes de grande taille, la majeure

partie des transducteurs (ceux des systèmes utilisés lorsque le navire est en route) est installée dans la partie avant du navire sur une «gondole», structure suspendue sous la quille du navire, et qui permet de disposer d'une grande surface horizontale et plane. Elle a également pour fonction d'écarter au maximum les transducteurs de la coque : le bruit généré par le navire et subi par les transducteurs est ainsi atténué, et les bulles d'air venant de la surface et susceptibles de perturber le fonctionnement des sonars ont tendance à passer au-dessus de la gondole.

Lorsque ce principe n'est pas retenu, l'ensemble des transducteurs est regroupé en une zone de la coque suffisamment plane et dégagée, où les effets de perturbation par le bruit, l'hydrodynamique et les bulles sont minimaux.



Fig. 3 : Transducteurs sous la coque du NO Thalassa



Fig. 4 : Montage de la gondole sous la coque du BHO Beautemps-Beaupré

Systèmes de positionnement sous-marin

Le déploiement d'engins sous-marins téléguidés (ROV) ou autonomes (AUV) impose de mettre en œuvre des dispositifs de localisation de ces mobiles au sein de la colonne d'eau. Cette fonction est assurée par des systèmes de positionnement à base ultracourte (BUC), qui permettent de localiser avec une grande précision un ou plusieurs véhicules sous-marins, au moyen de balises acoustiques (émetteurs autonomes fixés sur les mobiles) et d'une antenne BUC fixée sous la coque du navire. Dans le cas du système IXSEA *Posidonia* installé sur

la plupart des navires français, cette antenne comprend un émetteur et 4 récepteurs montés en croix.

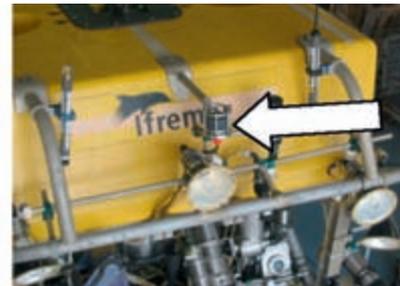


Fig. 5 : BUC IXSEA *Posidonia* – Antenne BUC installée sous la coque et balise acoustique montée sur le ROV Victor6000

Le fonctionnement du système est basé sur l'échange bidirectionnel de signaux acoustiques entre les balises et la BUC du navire. La BUC transmet des commandes à la balise via son antenne acoustique et déclenche l'émission du signal de réponse de la balise. Ce signal, reçu par les quatre récepteurs de l'antenne est décodé et traité de façon à déterminer la direction et la distance de la balise par rapport au navire. La direction du signal est obtenue en exploitant les différences de phases entre les quatre récepteurs (technique interférométrique). Connaissant la position, l'attitude (roulis, tangage) et le cap du navire, ainsi que le profil de célérité (afin de corriger la réfraction des rayons sonores), le système en déduit la position de la balise : latitude, longitude, profondeur. Les erreurs de mesure sont de l'ordre de 0,5% de la hauteur d'eau.

Posidonia permet de gérer simultanément jusqu'à quatre balises. Il est également possible de travailler en mode différentiel en utilisant une balise fixe posée sur le fond (de position connue). Cela permet de réduire l'erreur de mesure sur la ou les balises mobiles.

Signaux BUC-> balise	
fréquence	8 à 14 kHz
signaux	CW (14 ms)
récence	5 à 25 s
Signaux balises -> BUC	
fréquence	14,5 à 17,5 kHz
signaux	FM (25 ms)
Performances	
Zone couverte	Cône de +/- 45° sous le navire
Précision	# 0,5 % de la distance (20 m à 4 000 m)
Portée maximum	8 kms

Tabl. 2 : Principales caractéristiques de la BUC IXSEA *Posidonia*.

Systèmes Doppler

Les courantomètres ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) permettent de mesurer le profil de courant entre la surface et une profondeur dépendant de la fréquence de travail, pouvant aller jusqu'à 1 000 mètres.

Dans le cas des courantomètres de type *RDI Ocean Surveyor*, équipant les navires les plus récents, un transducteur fixé sur la coque émet des signaux sonores au travers de quatre faisceaux directs (ouverture entre 3° et 5°) et inclinés de 30° par rapport à la verticale. Le système se décline en plusieurs modèles correspondant à des fréquences comprises entre 38 kHz (mesures sur toute la hauteur d'eau) et 1,2 MHz (mesures sur quelques mètres).

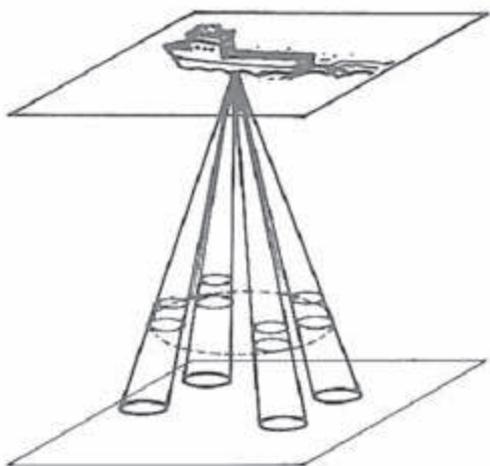


Fig. 6 : Géométrie des faisceaux d'un ADCP

Le signal est rétrodiffusé par les divers diffuseurs présents dans l'eau (plancton, particules, bulles d'air...) et qui se déplacent au gré des courants. La vitesse relative entre le navire et les diffuseurs induit un effet Doppler entre le signal émis et le signal rétrodiffusé : la fréquence Doppler reçue après le trajet aller et retour est proportionnelle à la vitesse relative V navire/diffuseurs :

$$f_D = 2f_0 \frac{V}{c}$$

où c est la célérité du son dans l'eau, et f_0 la fréquence émise.

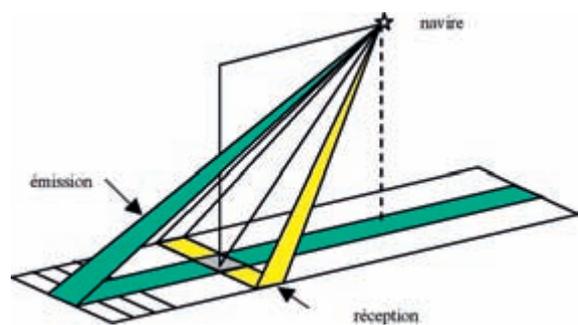


Fig. 8 : Méthode des faisceaux croisés

Des quatre mesures Doppler effectuées à travers les quatre faisceaux, associées à la connaissance de la vitesse et du cap du navire, on déduit un vecteur à 3 dimensions du courant pour une couche d'eau donnée : Nord/Sud, Est/Ouest, Vertical. Cette mesure effectuée à l'intérieur de cellules d'extension verticale fixée par la résolution temporelle du signal utilisé permet de constituer des profils verticaux de courants.

En dépit du caractère local de la mesure effectuée, l'utilisation des ADCP est un élément très important dans l'étude de la dynamique générale des océans ; leurs données sont acquises de manière routinière par les navires scientifiques en route, et intégrées dans des bases de données océanographiques.

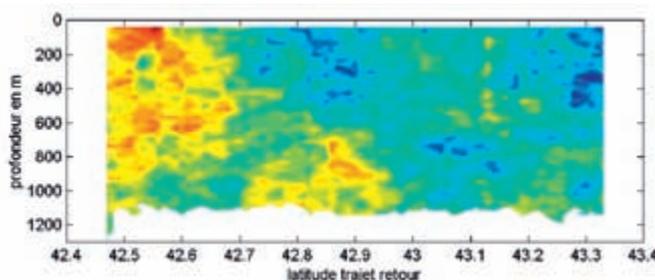


Fig. 7 : Exemple de profil de courant mesuré par un ADCP 38 kHz

Le même principe est utilisé dans les lochs Doppler, qui sont des instruments de navigation : la mesure est alors destinée à estimer la vitesse du navire soit par rapport à la masse d'eau (si l'écho provient de diffuseurs en pleine eau) soit par rapport au fond (si l'écho provient du fond).

Sondeurs multifaisceaux

Un sondeur multifaisceau mesure simultanément la profondeur selon plusieurs directions (au moins une centaine, jusqu'à plusieurs milliers dans les systèmes récents les plus performants), déterminées par les faisceaux de réception du système. Ces faisceaux forment une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire. On explore ainsi le fond sur une large bande (4 à 5 fois la profondeur, éventuellement jusqu'à 7 fois et plus selon les modèles).



Fig. 9 : Antennes du sondeur multifaisceau grands fonds du NO Pourquoi pas ?

Les sondeurs multifaisceaux fonctionnent le plus souvent selon la technique dite des « faisceaux croisés » : une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'émission étroit dans la direction longitudinale (de l'ordre de 1°) et large dans la direction transversale (de 120° à 150°). La réception se fait à l'aide de faisceaux étroits dans le plan transversal (de l'ordre de $0,5^\circ$ à 3°). Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée (« pied de faisceau ») est donnée par l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception.

Cette méthode implique une antenne d'émission longue dans le sens longitudinal et étroite transversalement, et l'inverse pour l'antenne de réception. Pour les sondeurs haute fréquence, les géométries d'antennes peuvent être différentes, la même antenne pouvant servir en émission et en réception.

Pour chaque faisceau, le système mesure la distance oblique navire/fond à un angle donné et en déduit la profondeur locale (mesure de bathymétrie). Les sondeurs multifaisceaux sont de plus capables d'exploiter l'amplitude du signal rétrodiffusé de façon à déterminer la réflectivité du fond (imagerie sonar).

La mesure bathymétrique par les sondeurs multifaisceaux est effectuée à angle donné (celui imposé lors du pointage des faisceaux). À l'intérieur d'un faisceau, le signal, reçu sous forme d'une série temporelle, est traité de deux manières différentes :

- Près de la verticale, où les signaux reçus sont très courts, on effectue une recherche de l'instant d'arrivée du signal à partir de l'analyse de son enveloppe ; la recherche du maximum ou du barycentre donne en général des mesures d'une précision suffisante, d'autant meilleure que les faisceaux sont étroits ;
- En incidence oblique, où l'étalement temporel du signal interdit une telle détection, on mesure la différence de phase entre les signaux temporels issus de deux sous-faisceaux constitués à partir de deux sous-antennes : l'instant où la différence de phase s'annule correspond à l'arrivée du signal très exactement dans l'axe de l'interféromètre ainsi constitué (voir l'article de Llort et al. dans ce numéro d'A&T).

La mesure d'angle et de temps d'arrivée est ensuite transformée en estimation de hauteur d'eau locale (ou « sonde ») selon le faisceau considéré. Ce calcul implique de manière impérative la prise en compte des effets de réfraction des ondes sonores

lors de la propagation dans la colonne d'eau par les variations de célérité avec l'immersion. Les mesures d'angles étant effectuées relativement à l'antenne, il importe aussi de corriger systématiquement les mouvements angulaires du porteur (roulis, tangage, cap) ainsi que ses mouvements verticaux (pilonnement). La précision de mesure bathymétrique obtenue par les meilleurs sondeurs actuels peut atteindre $0,1\%$ de la hauteur d'eau. Les données sont finalement mises sous une forme géoréférencée, à l'aide des données issues des centrales de navigation et d'attitude, afin de constituer des cartes du relief sous-marin.

Après compensation de divers effets liés à la propagation dans l'eau et à la dépendance angulaire de la rétrodiffusion par le fond, la mesure de l'amplitude des signaux temporels reçus dans les faisceaux permet, en corrigeant des caractéristiques d'émission-réception du sondeur (sensibilité des transducteurs et de l'électronique, fonctions de directivité), d'accéder à l'indice de rétrodiffusion du fond. Cet indice étant fortement corrélé à la nature du fond, on peut ainsi réaliser des cartes de réflectivité très informatives de la répartition des types sédimentaires. Ces cartes d'imagerie viennent idéalement compléter la cartographie du relief.

La tendance permanente des sondeurs multifaisceaux est à l'augmentation du nombre de sondes simultanément disponibles, et l'amélioration de la résolution des faisceaux (3 500 sondes par fauchée dans le récent Reson Seabat 7150, avec des faisceaux de $0,5^\circ$ à 24 kHz) ; toutefois d'autres technologies sont aussi possibles, privilégiant la détection de sondes multiples à l'intérieur d'un nombre limité de faisceaux (voir l'article de Llort et al.).

La technologie des sondeurs multifaisceaux, jusqu'ici limité à la cartographie des fonds, peut aussi être appliquée à l'investigation de la colonne d'eau. Un prototype de sondeur multifaisceau halieutique (70-120 kHz, 45 faisceaux de 2° formés par une antenne matricielle de 800 capteurs) a été construit récemment par la société SIMRAD pour l'IFREMER, et est actuellement en essais sur le *NO Thalassa*. Un tel système, très innovant, permet une investigation de la structure spatiale des bancs de poissons (fig. 13), et donc une estimation de la biomasse, beaucoup plus riches que celles obtenues avec les sondeurs monofaisceaux classiques (fig. 12).

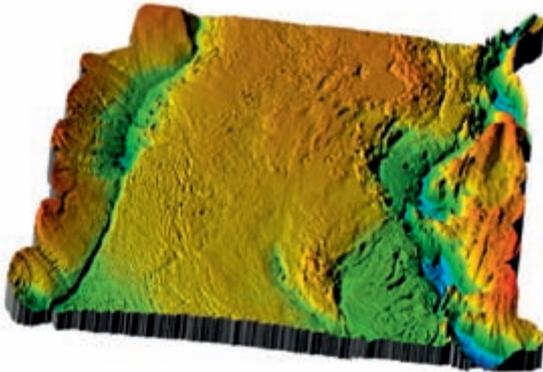


Fig. 10 : Représentation 3-D de la bathymétrie mesurée au sondeur multifaisceau 12 kHz sur la zone comprise entre la Libye et la Crète (environ 250 x 200 kms)

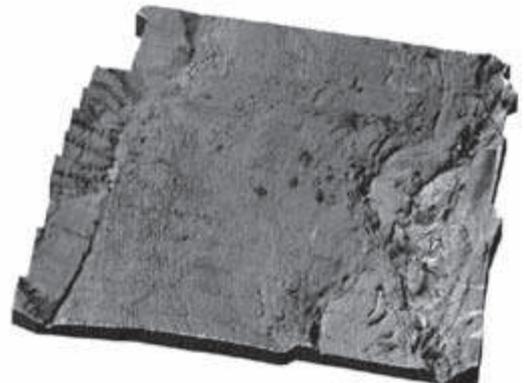


Fig. 11 : Donnée d'imagerie correspondant à la figure 10, drapée sur la bathymétrie 3-D. Les teintes sombres correspondent à de fortes réflectivités

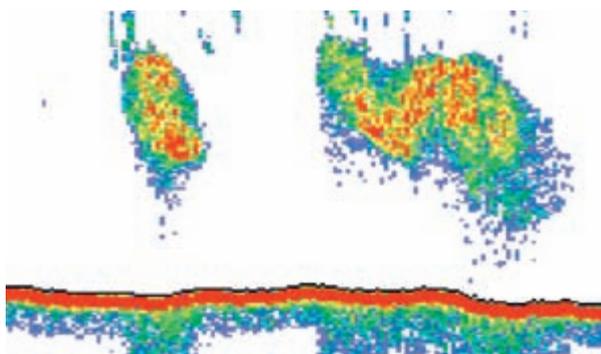


Fig. 12 : Coupe de deux bancs de harengs, obtenue au sondeur monofaisceau

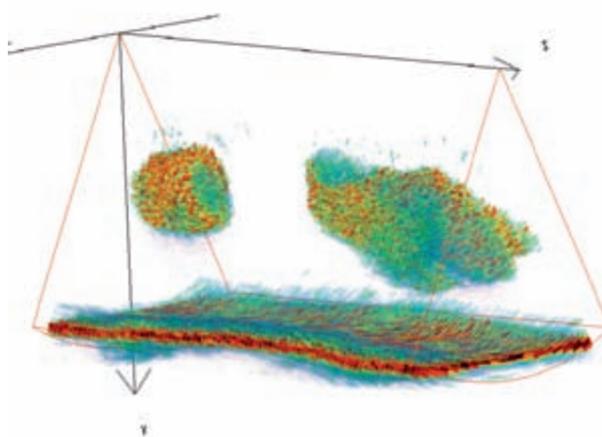


Fig. 13 : Représentation 3D des données obtenues à l'aide du sondeur multifaisceau du NO Thalassa sur les bancs de la figure 12

Systèmes associés : capteurs auxiliaires, centrale de synchronisation

On a vu que le fonctionnement des sonars nécessite la connaissance d'informations auxiliaires telles que la position et les mouvements du bateau, le cap, la vitesse du son sur l'antenne ou dans la colonne d'eau (profil bathycélérimétrique)... C'est pourquoi les systèmes acoustiques doivent impérativement être associés à différents capteurs :

- **un système de navigation** pour la fourniture de la position du navire. On utilise aujourd'hui presque exclusivement le système GPS, en mode naturel, différentiel ou cinématique, selon la précision de positionnement attendu. Le mode cinématique, qui offre une très grande précision (de l'ordre du centimètre), est couramment utilisé en zone côtière pour la mesure de l'altitude de l'embarcation, c'est-à-dire la hauteur de la marée.

- **une centrale d'attitude** pour la mesure de l'attitude (roulis, tangage, cap) et du pilonnement du navire. L'état de l'art consiste à utiliser une centrale inertielle de technologie FOG (gyroscopes à fibre optique). Les équipements les plus modernes mesurent l'attitude avec une précision de l'ordre du centième de degré, et le pilonnement avec une précision décimétrique. Ils ont de plus l'avantage de lisser et entretenir la position (en cas de coupure GPS).

- **une horloge de référence** pour synchroniser précisément l'ensemble des équipements scientifiques du navire. L'horloge est elle-même calée à l'aide des signaux GPS.

- **un célérimètre de coque** pour la mesure de la célérité au voisinage des transducteurs. Cette information est utilisée par les sondeurs multifaisceaux pour le pointage des faisceaux.

- **un système de mesure du profil de célérité**, pour les corrections de réfraction dans la colonne d'eau. Par petits fonds, on utilise généralement un bathycélérimètre (mesure de la pression et de la célérité) qui est mis en œuvre navire en

	EM 120	EM 300	EM1002	EM 3002
Fréquence	12 kHz	33 kHz	95 kHz	300 kHz
Profondeur max	12 000 m	4 000 m	600 m	100 m
Ouverture angulaire	140°	140°	150°	130°
Niveau d'émission (dB re 1uPa @1m)	242	237	225	216
Durée d'impulsion en ms	2/5/15	0,7/2/5/15	0,2	0,15
Nombre de canaux réception	128	64	128	
Nombre de faisceaux réception	191	127	111	254
Largeur des faisceaux (émission x réception)	1 x 1°	1 x 2°	2,3 x 2,3°	1,5 x 1,5°
Stabilisation des faisceaux	lacet/roulis/tangage	lacet/roulis/tangage	roulis	roulis/tangage
Navire Porteur	BHO Beautemps Beaupré (SHOM)	NO Le Suroît (IFREMER)	NO L'Alis (IRD)	Vedettes hydrographiques du SHOM

Tabl. 3 : Principales caractéristiques des sondeurs multifaisceaux récents de la gamme Kongsberg actuellement en service sur des navires scientifiques ou hydrographiques

station. Par grands fonds, des mesures peuvent être faites en route en utilisant des sondes perdables (type XBT : mesure du profil de température). Le profil célérité/profondeur est obtenu en combinant la mesure de température avec la salinité issue de bases de données statistiques.

L'opération simultanée d'outils acoustiques multiples sur la même plate-forme cause un risque d'interférences entre systèmes travaillant à des fréquences proches. Les filtrages fréquentiels ou spatiaux (directivité) des divers systèmes ne suffisent pas à les protéger contre les signaux parasites issus des voisins. Ceci impose donc l'utilisation d'une **centrale de synchronisation acoustique**, qui permet de gérer de façon optimale les instants d'émission de chaque système.

Conclusion

Les navires océanographiques modernes mettent en œuvre une très riche variété de systèmes acoustiques sous-marins. L'évolution des performances de mesures leur confère des capacités très performantes d'investigation du milieu marin

dans ses diverses composantes (géologique, biologique, physique). La conception des navires doit largement tenir compte de ce rôle de plate-forme instrumentée, tant dans leur structure que dans leurs caractéristiques acoustiques propres de niveau de bruit. La mise en œuvre simultanée de multiples systèmes acoustiques doit s'accompagner de précautions spécifiques.

Références internet

- [1] Site internet de la flotte IFREMER : www.ifremer.fr/flotte
- [2] Site internet Teledyne RDI : www.rdinstruments.com
- [3] *Posidonia* – manuel utilisateur – Thomson Marconi Sonar – janvier 1999
- [4] Site internet Kongsberg : www.km.kongsberg.com
- [5] Site internet Reson : www.reson.com
- [6] Site internet IXSEA : www.ixsea.com

