

CHAPITRE 4

DÉTECTION DES RELÈVEMENTS DE FOND ET CLASSIFICATION DES FONDS

1. INTRODUCTION

1.1 L'hydrographie a pour but de décrire les fonds marins pour répondre aux besoins de l'ensemble des usagers, et pas seulement à ceux concernés par la sécurité de la navigation. Le développement des sonars et des sondeurs multifaisceaux permet en effet aujourd'hui d'accéder à une description plus complète des fonds pour les différents usages. Il n'est évidemment pas possible de décrire toutes les caractéristiques ni tous les détails à toutes les profondeurs, aussi l'OHI a-t-elle déterminé une taille minimum des structures à rechercher et à mesurer. La classification des fonds est utilisée depuis longtemps en guerre des mines mais l'avènement des logiciels de classification automatique a permis d'étendre leur usage, en particulier pour la pêche et l'exploitation des ressources naturelles.

1.2 Dans ce chapitre, les expressions 'classification', 'caractérisation' ou 'nature des fonds', 'détection des détails ou objets sous-marins', 'recherche de roches', sont apparentées.

2. DÉTECTION DES RELÈVEMENTS DE FOND

2.1 Contexte

2.1.1 Pour assurer la sécurité de la navigation il est nécessaire de détecter les détails du fond susceptibles de représenter un danger pour la navigation, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle. Un relèvement de fond est défini comme étant un détail nettement différent du fond avoisinant, allant de la roche isolée sur fond plat et sableux à l'épave ou à l'obstruction. L'activité hydrographique correspondante est connue sous le nom générique de « recherche ». La détection des relèvements de fond peut être aussi utilisée pour détecter et identifier des structures présentant un intérêt pour les autres usagers de la mer, tels que les têtes de puits et les mines. Ces dernières peuvent ne pas être significatives pour les navigateurs tout en étant importantes pour certaines catégories d'usagers.

2.1.2 Un levé hydrographique traditionnel commence par une série régulière de profils de sondage couvrant la zone et connue sous le nom de « levé régulier ». Les sondeurs multifaisceaux (SMF) et sonars latéraux sont utilisés pour détecter les relèvements de fond et fournir des informations sur la classification des fonds, la recherche étant dans certains cas plus importante que l'acquisition des données bathymétriques elles-mêmes. Les détails spécifiques repérés par le SMF ou le sonar latéral requièrent habituellement une vérification approfondie de leur position et de leur cote minimale.

2.2 Normes

2.2.1 Il existe un certain nombre de normes de détection d'objets dont les plus importantes sont celles contenues dans les publications S-44 et S-57 de l'OHI.

2.2.2 OHI S-44 – Normes minimales pour les levés hydrographiques

2.2.1.1 Le tableau 1 de la S-44, résumé dans les tableaux 4.1 et 4.2 ci-dessous, spécifie quand, et avec quelle classe de système de détection, une recherche doit être effectuée pour chaque ordre de levé.

2.2.1.2 La position et la profondeur de tous les détails considérés comme significatifs doivent être déterminées selon les normes détaillées dans le tableau 1 de la S-44.

Ordre de précision de la S-44 et description des zones		Type de recherche
Ordre spécial	Zones pour lesquelles la profondeur sous la quille est un paramètre critique	Recherche approfondie.
Ordre 1a	Zones de fonds de moins de 100 mètres pour lesquelles la profondeur sous la quille est moins critique, mais susceptible de comporter des détails intéressants pour la navigation de surface.	Recherche approfondie.
Ordre 1b	Zones de fonds de moins de 100 mètres pour lesquelles la profondeur sous la quille n'est pas critique pour le type de navires susceptibles de s'y trouver.	Recherche approfondie facultative.
Ordre 2	Zones généralement de plus de 100 mètres pour lesquelles une description générale des fonds est considérée comme suffisante.	Recherche approfondie facultative.

Tableau 4.1 “ Critères de recherche de la publication S-44 de l’OHI ”

Ordre de la S-44	Performances du système de détection
Ordre spécial	Détection d'un cube d'arête >1.0 m
Ordre 1a	Détection d'un cube d'arête >2.0 m jusqu'à 40 m ou 10% de la profondeur au-delà.
Ordre 1b	Sans objet
Ordre 2	Sans objet

Tableau 4.2 “ Performances du système de détection en regard des normes de la S-44 ”

2.2.3 OHI S-57 – Normes de transfert aux cartographes des données hydrographiques

2.2.3.1 Le supplément N°2 à la publication S-57 de l’OHI définit les « Zones de Confiance » (ZOC) comme étant une méthode de codage de la qualité des données. Les ZOC ont été adoptées comme moyen simple et logique de classer toutes les données bathymétriques et d’informer le navigateur sur le degré de confiance que l’autorité cartographique nationale leur accorde. Les zones sont classées selon le degré de confiance attribué à leurs données en fonction de critères combinant précisions des profondeurs et du positionnement, exhaustivité des recherches et conformité au niveau de qualité approuvé.

2.2.3.2 Les ZOC A1, A2 et B sont créés dans l’optique des levés modernes et futurs. Les ZOC A1 et A2 requièrent des recherches exhaustives et une localisation précise associées à une couverture surfacique totale tandis que la ZOC B demande une bonne précision mais une couverture non surfacique ; les ZOC C et D correspondent à une précision et une densité de données moindres et les ZOC U à des données non ou pas encore qualifiées. Les ZOC ont été conçues pour être représentées sur les cartes papiers en remplacement des diagrammes des sources encore utilisés actuellement et sur les ECDIS.

2.2.3.3 Il faut signaler que les ZOC sont des normes cartographiques qui n’ont pas été conçues pour spécifier les normes des levés hydrographiques ou pour gérer la qualité des données par les services hydrographiques. La précision des profondeurs et des positions spécifiées pour chaque ZOC fait référence aux erreurs des sondes finales représentées sur les cartes ; elle n’inclut pas seulement les erreurs de levé mais aussi les autres erreurs introduites durant le processus de production des cartes.

2.2.3.4 Les critères de détection des fonds en regard des ZOC de la S-57 sont présentés ci-après :

ZOC de la S-57	Nature des investigations (recherches de roches ou ‘RR’)
ZOC A1	Recherches exhaustives dans toute la zone ; tous les détails significatifs du fond ont été détectés et leurs profondeurs ont été cotées. (voir note)
ZOC A2	

ZOC B	Recherches incomplètes dans la zone ; des structures dangereuses pour la navigation mais non cartographiées peuvent encore subsister
ZOC C	Recherches incomplètes dans la zone ; s'attendre à rencontrer des anomalies bathymétriques dangereuses pour la navigation
ZOC D	Recherches incomplètes dans la zone ; s'attendre à rencontrer des anomalies bathymétriques de grandes dimensions
ZOC U	Éléments insuffisants pour qualifier les données bathymétriques

Tableau 4.3 «Classement des ZOC en fonction de la qualité des recherches »

Note : les détails significatifs mentionnés par la S-57 correspondent à des structures qui s'élèvent au-dessus des profondeurs indiquées sur la carte de plus de:

- 0,1 fois la profondeur par fonds inférieurs à 10 m,
- 1,0 m par fonds compris entre 10 et 30 m, et
- 0,1 fois la profondeur moins 2,0 m par fonds de plus de 30 m.

2.2.3.5 La S-57 fournit également une information détaillée sur la précision des positions et des profondeurs des objets détectés.

2.2.4 Détection des structures dangereuses

2.2.4.1 L'hydrographe doit rester conscient du fait que de nombreuses structures potentiellement dangereuses pour la navigation ne rentrent pas dans le critère des « objets cubiques » de la S-44, par exemple les mâts d'épaves et les têtes de puits. Cependant, les critères des ZOC tiennent compte de ces structures si elles s'élèvent de la valeur prescrite au-dessus des profondeurs représentées sur les cartes. La capacité de détecter de telles structures est une question critique au moment du choix du type de système à utiliser pour la détection. Par exemple, ces types de structures sont détectés normalement par le sondeur monofaisceau mais peuvent ne pas l'être par le SMF, le lidar ou les systèmes semblables en raison, par exemple, de l'empreinte des faisceaux ou des algorithmes de filtrage.

2.2.4.2 Du point de vue de l'hydrographe, le but d'un système surfacique est d'insonifier la région située entre profils adjacents pour détecter toute structure significative et dangereuse pour la navigation. Bien qu'aucune définition stricte de la longueur minimale d'une épave ne soit donnée, les objets de moins de trois mètres ont peu de chance de s'élever significativement au-dessus du fond, encore qu'il y ait des circonstances où ce ne soit pas le cas (par ex. dans les régions coralliennes ou au cours des recherches de mâts). L'hydrographe devra examiner toutes les sources d'informations disponibles avant de décider de la longueur minimale des objets qu'il souhaite détecter.

2.2.4.3 Noter que dans tous les calculs qui suivent et qui mentionnent des vitesses fond à ne pas dépasser, il est question de longueur des structures mais pas de leur hauteur. Pour les calculs, on s'intéresse à la longueur maximale des structures qui reçoivent moins de cinq pings, ce chiffre étant considéré comme le seuil minimum pour détecter un objet. La quantité d'énergie des cinq pings rétrodiffusés par la structure dépend :

- de la forme, de l'étendue, de la composition et de l'aspect de l'objet,
- des conditions de propagation,
- de la nature des fonds et d'autres facteurs.

2.2.4.4 L'intensité de l'enregistrement dépendra de l'énergie réfléchi par la structure.

2.2.5 Les besoins militaires

- 2.2.5.1 Les forces ont souvent besoin de détecter des objets plus petits ou plus profonds que les structures intéressant la sécurité de la navigation. D'aucuns, par exemple, s'efforceront de détecter des objets de 0,5 m³ mouillés sur le plateau continental par des profondeurs de 200 m et les chasseurs de mines équipés de senseurs spécialisés cherchent à détecter et à classer des objets encore plus petits. Bien que de telles performances ne soient pas normalement requises par les hydrographes chargés de la production des cartes marines, elles influencent le développement des systèmes capables de les réaliser et qui deviennent disponibles sur le marché.

2.2.6 Signalisation des dangers pour la navigation

- 2.2.6.1 Bien qu'il soit souhaitable d'examiner toutes les structures répondant aux critères précités, ceci ne sera pas possible dans les zones complexes. Les hydrographes devront alors faire appel à leur jugement pour adapter le degré d'exhaustivité des recherches aux moyens disponibles, aux caractéristiques de la navigation dans la zone (tirant d'eau des bateaux, etc.) et à l'allure des structures par rapport aux profondeurs moyennes rencontrées. Par exemple, un banc de sable coté 26 m dans des profondeurs moyennes de 28 m ne nécessitera pas une investigation supplémentaire si le tirant d'eau des bateaux qui fréquentent la région n'est que de 12 m, mais en revanche, une profondeur de 20 m sera préoccupante. Il peut suffire alors de s'assurer qu'il n'existe pas d'indices de remontées de fond en doublant par exemple les profils, ou en mettant en œuvre un sonar latéral, etc.
- 2.2.6.2 Les critères précités doivent servir aussi à décider si une structure doit être ou non incluse dans le rapport particulier[□]. Dans les régions complexes, cette liste peut devenir trop longue, aussi, le rapport particulier devra-t-il s'en tenir aux objets pertinents en regard des profondeurs moyennes et des risques possibles pour la navigation.
- 2.2.6.3 À la fin de chaque levé, l'hydrographe, qui est la seule personne à disposer de l'ensemble des informations, doit se prononcer clairement sur chaque structure, examinée ou non, c.à.d. épave, relèvement de fond, etc., et faire part de ses conclusions dans le rapport particulier*. Les structures récemment découvertes et qui peuvent être dangereuses pour la navigation de surface ou sous-marine, ainsi que les détails cartographiques modifiés significativement, doivent être signalés immédiatement au service hydrographique national (NHO) responsable de l'entretien des cartes marines.

La publication S-4 de l'OHI édicte un certain nombre de recommandations générales relatives aux informations importantes pour la navigation qu'il est nécessaire de porter à la connaissance des marins par Avis aux Navigateurs (AN), annexes graphiques ou nouvelles éditions limitées (NEL). Ces règles font la distinction entre les dangers considérés comme importants pour la navigation de surface (Art. B-620.3 a), correspondant à des profondeurs classées par tranches de 0 à 10 mètres puis de 10 à 31 mètres, et les modifications significatives pour les sous-marins, chalutiers et autres opérateurs de sub-surface (Art. B-620.3 b), qui correspondent à des profondeurs classées par tranches de 31 à 200 mètres, 200 à 800 mètres et au-delà.

2.3 Méthodes de détection des relèvements de fonds

2.3.1 Généralités

- 2.3.1.1 Il y a plusieurs méthodes pour détecter les relèvements de fonds. Parmi celles-ci, le sonar latéral a bien prouvé sa capacité de détection et peut être considéré comme le moyen le plus fiable, mais il présente cependant des limitations opérationnelles parce qu'il est généralement remorqué derrière le navire hydrographique, ce qui entraîne notamment des

[□]* NdT : terminologie en usage dans les missions hydrographiques françaises pour désigner un rapport de levé.

erreurs de positionnement des relèvements de fonds. On peut remédier à ces erreurs en dotant le poisson remorqué d'un transpondeur acoustique et/ou en insonifiant la structure dans des directions opposées pour obtenir une position moyenne. De plus, les levés au sonar latéral laissent une zone aveugle à l'aplomb, ce qui impose un recouvrement suffisant entre les passes pour tout détecter.

2.3.1.2 Une des limitations principales du sonar latéral est sa vitesse d'exploration réduite afin de garantir une insonification suffisante de chaque structure ; celle-ci est de l'ordre de 6 nœuds ce qui nuit au rendement. En autorisant des détections à plus grande vitesse, l'avènement du SMF a permis d'améliorer le rendement, mais sa capacité de détecter des objets de la taille prescrite par l'ordre spécial de la S-44 et les ZOC A1/A2, ou d'autres détails plus petits et potentiellement dangereux, ne peut pas être garantie, à moins de prendre certaines précautions telles que la réduction des largeurs de fauchées et l'adoption d'une vitesse appropriée à une cadence suffisante de pings.

2.3.1.2.1 La géométrie du transducteur du sonar latéral par rapport aux structures immergées est le facteur déterminant qui en fait un instrument de détection efficace. L'ombre portée par les détails du fond est le signe qu'ils ont bien été insonifiés alors que la géométrie du transducteur du SMF ne lui permet pas de bénéficier de cette capacité à projeter des ombres. L'hydrographe qui souhaite utiliser le SMF pour détecter des objets devra faire appel aux autres caractéristiques du système pour les recherches, à savoir sa haute résolution bathymétrique et l'amplitude des rétrodiffusions qui, associées à la précision de son positionnement, permettent d'obtenir une excellente répétabilité. De plus, alors que les structures sont normalement détectées par le sonar latéral en cours de levé, la détection par SMF est beaucoup moins évidente et nécessite un post-traitement pour voir les résultats.

2.3.1.3 Les autres senseurs susceptibles d'être utilisés pour les recherches incluent le sondeur monofaisceau, le sonar à vision vers l'avant, le magnétomètre et les systèmes aéroportés tels que le lidar et le sondeur électromagnétique (AEMB). Les méthodes mécaniques, moins utilisées de nos jours, incluent le dragage à fil et à rail ainsi que les plongeurs.

2.3.2 Le sonar latéral (ou sondeur latéral)

2.3.2.1 Le sonar latéral à double voie est maintenant reconnu comme un instrument de base et aucun levé moderne du plateau continental ne saurait être considéré comme complet s'il ne comportait pas une exploration au sonar latéral avec investigation de tous les contacts.

2.3.2.2 En plus de la localisation des épaves et des obstructions entre profils, le sonar latéral fournit aussi un nombre considérable d'informations sur le fond. Combinées aux isobathes et aux prélèvements pour classer les natures de fond, ces informations présentent un intérêt majeur pour les opérations amphibies, la guerre des mines et les opérations sous-marines. Elles ont pris tellement d'importance au fil des années que, dans beaucoup de levés, c'est le sonar latéral et non plus les sondeurs qui dictent la direction et l'espacement des profils. Il faut cependant se montrer vigilant dans la préparation et la validation des données du sondeur latéral pour en réaliser tout le potentiel.

2.3.2.3 En travaux hydrographiques, le sonar latéral possède quatre fonctions principales qui sont :

- La détection des épaves et des obstructions. Bien qu'il ne soit pas en mesure de déterminer les positions et les cotes avec précision, un sonar latéral correctement réglé et utilisé détectera pratiquement tous les détails intéressants situés entre les profils.
- La détection d'autres structures immergées. Mis en œuvre convenablement, le sonar latéral peut détecter de très petits objets sur le fond. Même si ces objets, ou groupe d'objets, ne sont pas dangereux pour la navigation, ils peuvent avoir une grande

importance pour les opérations sous-marines et la guerre des mines.

- Le recueil de données de classification des fonds. La connaissance de la granularité combinée aux prélèvements est d'une grande importance pour les zones de poser de sous-marins et de guerre des mines, les pêcheries et le développement des ressources.
- L'identification de zones de fonds instables. La présence de dunes de sable et de rides est un signe de variabilité des fonds. Les voies navigables importantes peuvent périodiquement faire l'objet de levés de contrôles pour assurer la sécurité de la navigation.

2.3.3 Considérations théoriques

2.3.3.1 L'énergie du signal réfléchi par une cible quelconque dépend de plusieurs facteurs liés entre eux par la formule dite de l'« équation du sonar » qui peut être utilisée pour savoir si un type d'objet sera détecté ou non. Une bonne définition des termes entrant dans cette équation est donnée par le « *Report on the Detection of Depth Anomalies* » (Rapport sur la détection des anomalies bathymétriques) publié par la FIG/OHI en 1981. Le manuel standard à consulter pour en savoir plus est le « *Principles of Underwater Sound* » (Principes de propagation du son dans l'eau) de R. J. Urick. Quoi qu'il en soit, cette équation n'est qu'un point de départ dans l'évaluation des performances du sonar latéral car il n'est pas possible d'en connaître tous les termes.

2.3.3.2 Couverture à courte portée. Il se peut qu'il y ait des zones aveugles à proximité du poisson. Ces zones aveugles doivent être considérées dans les deux plans suivants (Figure 4.1) :

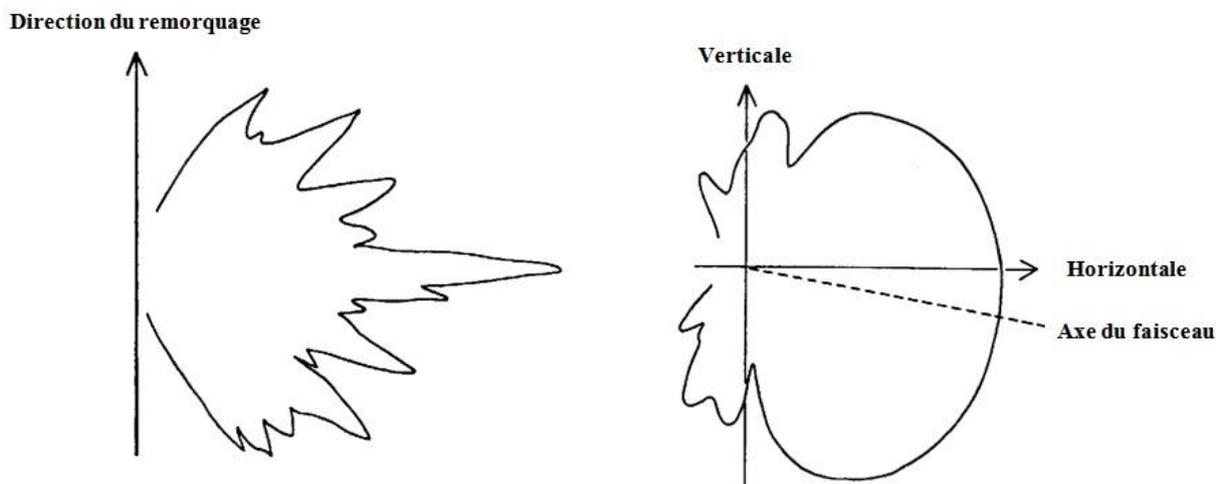


Fig. 4.1 « Couvertures horizontale et verticale du faisceau du sonar latéral »

- Plan vertical. L'ouverture angulaire du lobe principal dans le plan vertical du sonar est d'environ 50° , avec un axe incliné de 10° vers le bas. On voit qu'à l'aplomb du poisson se trouve une zone extérieure au lobe principal et dont la dimension dépend de la hauteur des transducteurs au-dessus du fond. L'affirmation fréquente que cette zone n'est pas du tout insonifiée est inexacte car, sauf si le poisson est très loin du fond, elle est couverte par les lobes latéraux des transducteurs et certaines parties peuvent recevoir un peu d'énergie des bordures du lobe principal, car la soi-disant « bordure » n'est qu'une ligne de demi-énergie au-delà de laquelle il en subsiste encore une fraction. Cette zone aveugle existe, mais elle est considérablement plus petite qu'on imagine et peut ne mesurer que quelques mètres de large. Quoi qu'il en soit, elle doit faire l'objet de recouvrements.
- Plan horizontal. Le « champ proche » situé à proximité du poisson est caractérisé par

des rayons insonifiés à bords quasi-parallèles entre lesquels se trouvent des zones aveugles, fonction de la vitesse du bateau et de la cadence d'impulsions. Au-delà du champ proche, l'épanouissement des faisceaux couvre les trous et produit une couverture totale ce qui fait qu'on peut manquer plus facilement un contact rapproché qu'un objet lointain.

2.3.3.3 Les zones de recherche peuvent être planifiées selon deux méthodes différentes :

- Détection des échos près du poisson. La recherche est conduite de telle sorte que le plus petit écho possible près du poisson soit détecté. Le cas limite exige que ces échos, situés dans le champ proche reçoivent cinq impulsions ; à l'extérieur de ce champ, l'épanouissement du faisceau est tel que les échos recevront au moins cinq impulsions.
- Détections des échos loin du poisson. La zone au-delà de laquelle les petits échos ne peuvent pas être détectés peut être calculée pour une portée et une vitesse-fond données. L'espacement entre les profils peut alors être ajusté afin que les fauchées adjacentes couvrent au moins les vides. Alternativement, l'espacement entre les profils peut être fixé et la vitesse ajustée pour assurer une couverture totale. Ainsi, pour une portée de 150 m et une vitesse telle que les petits échos ne peuvent pas être détectés dans les premiers 25 m, l'espacement entre les lignes ne doit pas dépasser 125 m.

2.3.3.4 La deuxième méthode précitée est préférée habituellement pour les recherches car elle autorise une vitesse plus rapide. Pour un espacement entre profils de 125 m et une portée de 150 m, les obstacles d'un mètre de longueur seront détectés dans le champ proche à une vitesse d'exploration de 3,6 nœuds seulement alors que la détection à partir de profils adjacents permettra de porter cette vitesse à 7 nœuds. Les calculs sont détaillés plus loin aux paragraphes relatifs à la détection des hauts-fonds (§ 2.3.6) et au calcul de la vitesse de progression (§ 2.3.7).

2.3.3.5 Confirmation des performances du sonar latéral : les calculs ne fournissant que des capacités théoriques, il est indispensable de confirmer les performances du sonar latéral sur le terrain avant sa mise en œuvre. Cette vérification consiste à effectuer une passe au sonar latéral devant un objet convenablement choisi qui soit du même type que ceux recherchés lors du levé. Les deux voies du sonar, c.-à-d. les deux transducteurs latéraux et leurs gammes, doivent être testés pour déterminer la portée maximale de détection.

2.3.3.6 Position du poisson : Le remorquage du poisson offre plusieurs avantages tels qu'affranchir le senseur des mouvements de plateforme et le maintenir à une hauteur au-dessus du fond qui optimise l'ombre acoustique. Inversement, il a pour inconvénient d'introduire une incertitude sur la position du poisson. L'erreur qui en découle a trois composantes :

- une composante longitudinale, causée par l'incertitude sur la distance entre le poisson et l'arrière du bateau qui dépend de la longueur du câble, de sa flèche verticale et de la profondeur du poisson (les deux derniers variant aussi avec la vitesse du bateau) ;
- une composante transversale, due à la dérive du poisson sous l'effet du courant de marée ou des courants généraux et aux manœuvres du bateau ;
- une erreur de positionnement du bateau qui est répercutée sur le poisson.

2.3.3.7 La position du poisson remorqué peut être déterminée en utilisant un système de positionnement à ligne de base ultra-courte (USBL) qui nécessite l'installation de transducteurs/récepteurs sur le bateau et sur le poisson, et dont la précision se détériore rapidement avec la longueur du câble électro-porteur. Une méthode alternative, en cours de développement en Australie, utilise la direction et l'inclinaison de départ du câble

électro-porteur lesquelles, combinées avec un modèle de flexion, permettent de prédire correctement la position du poisson.

2.3.3.8 De plus, l'attitude du poisson remorqué peut varier longitudinalement et autour de son axe, et donc les directions des faisceaux du transducteur peuvent être modifiées. C'est particulièrement le cas si le cap ou la vitesse du bateau changent fréquemment, aussi convient-il d'insister sur la nécessité de prévoir un recouvrement généreux pendant l'exploration. Concrètement, le fait de planifier un levé en s'appuyant sur les limites théoriques de performance du sonar latéral conduit à des trous dans la couverture.

2.3.3.9 Installation sur la coque : le sonar latéral peut être fixé sur la coque du bateau. L'avantage est que sa position et son orientation sont connues et par conséquent le positionnement des hauts-fonds détectés est relativement facile. L'installation sur la coque rend aussi au bateau sa liberté de manœuvre puisqu'il ne remorque plus d'engin. Cependant, il y a plusieurs inconvénients, dont notamment l'effet des mouvements de plateforme sur l'insonification et les performances du sonar latéral, la possibilité d'interférences avec d'autres senseurs tels que le SMF, et la quasi-certitude que le sonar latéral ne sera pas à la hauteur optimum au-dessus du fond. Elle peut néanmoins s'avérer être la meilleure méthode par petits fonds ou dans des régions où la topographie rugueuse est potentiellement dangereuse pour les engins remorqués. Ces cas mis à part, les inconvénients de l'installation sur la coque l'emportent normalement sur les avantages.

2.3.4 Contraintes opérationnelles

2.3.4.1 Stabilité hydrodynamique du poisson remorqué : dans la plupart des conditions, le poisson est découplé des mouvements de plateforme grâce à la souplesse du câble de remorquage. On estime habituellement que le poisson est stable en roulis, tangage et lacets, même si quelques mouvements peuvent subsister dans ces plans. Il est probable que le roulis a un effet relativement négligeable sur l'image du sonar, puisqu'il est compensé par la largeur d'ouverture du faisceau dans le plan vertical. Une inclinaison permanente dans une direction causée par une déformation ou une torsion du câble peut cependant diminuer sensiblement les performances. Ceci doit être envisagé notamment quand la qualité des images des deux voies est différente.

2.3.4.2 Dans les cas extrêmes, on peut ne compter que sur la « bonne » voie dans la préparation des profils d'exploration. Du fait de la faible largeur du faisceau dans le plan horizontal, le tangage et les lacets sont plus significatifs et peuvent réduire la probabilité de détection des petits objets. Un objet qui recevrait au moins cinq impulsions avec un poisson stable pourrait n'en recevoir que trois ou quatre si le poisson oscille dans l'une ou l'autre de ces deux directions.

2.3.4.3 La stabilité du poisson remorqué est considérée comme moins importante que l'incertitude sur sa position. Par mauvais temps, les oscillations du poisson peuvent être clairement visibles sur les enregistrements et il faut, dans ces conditions, s'attendre à une diminution de la probabilité de détection des petits objets. Avec l'utilisation de plus en plus fréquente de compensateurs de pilonnement et de centrales d'attitude couplés aux sondeurs et l'importance accordée à la détection des petits échos, ce sont les conditions d'utilisation du sonar latéral plutôt que les performances des sondeurs qui limitent la qualité des levés.

2.3.4.4 Hauteur du poisson : pour la plupart des travaux, la hauteur optimale du poisson au-dessus du fond est égale à 10% de la portée utilisée, c.-à-d. que pour une portée de 150 m le poisson doit être remorqué à 15 m au-dessus du fond. Les transducteurs du sonar latéral étant légèrement inclinés vers le bas, la portée des signaux retour sera réduite si le poisson est trop près du fond. En revanche, s'il est trop haut, les ombres acoustiques portées par

les obstructions seront raccourcies ce qui les rendra plus difficiles à détecter. Ceci est particulièrement vrai en eaux profondes, quand il faut adopter un compromis entre la profondeur utile du poisson et le maintien d'une vitesse d'exploration raisonnable.

- 2.3.4.5 Dans les zones parsemées de hauts-fonds, il est prudent de remorquer le sonar latéral plus haut que d'habitude avec, comme inconvénient, la réduction de l'ombre acoustique des structures immergées. Cet effet est plus accentué près du poisson où la détection des petits objets est déjà difficile.
- 2.3.4.6 Dans les eaux peu profondes, il est difficile de remorquer le poisson à la hauteur optimale. Bien que l'enregistreur donne une trace sur la largeur entière du papier, le faisceau du sonar latéral peut ne pas insonifier toute la portée. Dans ces conditions, la seule solution est de réduire l'échelle des enregistrements et l'espacement des profils.
- 2.3.4.7 Il y a d'autres limitations dans les eaux peu profondes lorsque le poisson est proche de la surface et la longueur du câble électro-porteur réduite. Cette configuration peut introduire une dégradation des performances par bruits de surface (vagues et sillages de bateaux) et transmission au poisson des mouvements de plateforme. Normalement, les effets de couches et de thermocline sur le sonar latéral sont négligeables aux gammes de fréquences utilisées.
- 2.3.4.8 Durant l'exploration, le poisson doit toujours être maintenu suffisamment haut pour éviter de percuter un haut-fond éventuel. En cas de passage à la verticale d'un tel obstacle, sa cote peut être estimée initialement à partir de la remontée des deux traces centrales ou calculée d'après l'ombre portée sur les fauchées adjacentes.
- 2.3.4.9 Quand on se trouve dans l'obligation de remorquer le poisson à une hauteur plus haute que la valeur optimale, un contrôle de qualité doit être effectué afin de s'assurer que le système continue à satisfaire aux critères de détection. La hauteur du poisson au-dessus du fond peut facilement être ajustée au moyen de la longueur du câble électro-porteur et de la vitesse du bateau. Une réduction franche de la longueur du câble fera remonter rapidement le poisson vers le haut, le retour à la normale intervenant plus lentement par la suite. Cette technique peut être très utile pour franchir un obstacle imprévu. Elle est d'autant plus efficace que la longueur de câble filé est courte.
- 2.3.4.10 Dépresseurs : certains poissons sont équipés de dépresseurs qui permettent d'augmenter la profondeur de remorquage quelle que soit la longueur de câble filé ou la vitesse d'exploration. Cet accessoire présente cependant les inconvénients suivants :
- l'augmentation de la tension du câble nécessite un treuil plus puissant pour régler la longueur filée et peut rendre impossible les manœuvres manuelles en opérations;
 - le raccourcissement du câble se traduit par la transmission au poisson des mouvements de plateforme ;
 - le dépresseur atténue les effets de vitesse et de longueur filée et ne permet plus de recourir à la technique de franchissement des obstacles mentionnée au § précédent.
- 2.3.4.11 En opération près du fond, il est prudent de s'assurer que le poisson est équipé d'un système de largage qui lui permette d'être récupéré en cas de croche. Les ailerons peuvent être perdus dans cette éventualité, mais au moins le poisson est récupéré. Certains sonars latéraux modernes évitent cet inconvénient en fixant les ailerons sur la partie haute.
- 2.3.4.12 Direction de remorquage : en opérations normales le sonar latéral doit être remorqué dans le sens du courant de marée et/ou du courant prédominant afin de minimiser la dérive du poisson. Quand les effets de courant sont négligeables, le sonar latéral doit être remorqué

parallèlement aux isobathes afin, notamment, de minimiser les ajustements de longueur de câble en fonction des profondeurs rencontrées.

- 2.3.4.13 Il y a cependant des exceptions à ces règles. Dans les régions de dunes sous-marines, en particulier, il est nécessaire de remorquer le sonar latéral perpendiculairement à l'axe des dunes afin de s'assurer que le sonar latéral détecte bien les crêtes et les creux et évite de créer des zones d'ombre susceptibles de masquer les objets à détecter (voir figure 4.2).

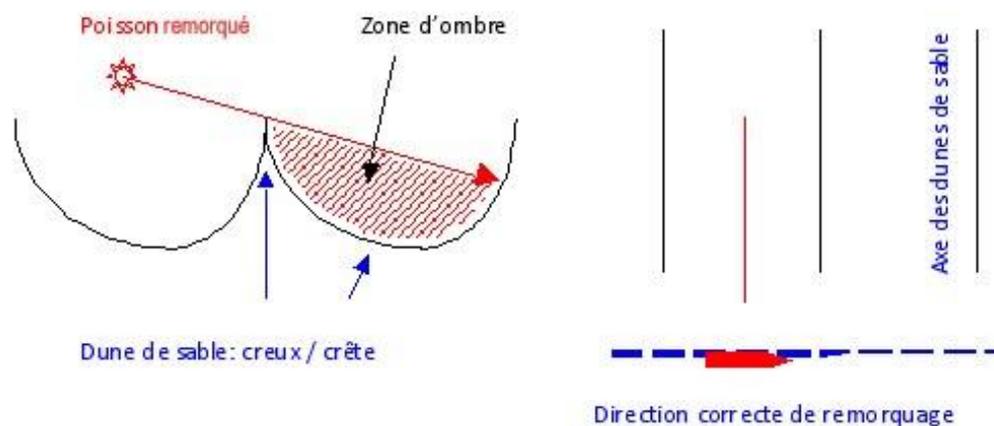


Fig. 4.2 « Sondeur latéral – zones d'ombre potentielles créées par les dunes de sables et direction correcte de remorquage »

- 2.3.4.14 Portée efficace du sonar latéral : les traces sur l'enregistrement n'indiquent pas nécessairement la présence d'échos. Les pertes de transmission, les interférences avec d'autres sources de bruit, les caractéristiques de la colonne d'eau et les limites de l'enregistreur réduisent la portée efficace du sonar latéral. Une portée maximale de 270 m sur les grandes épaves est à peu près tout ce qu'on peut espérer, les petits échos (1-2 m) étant difficiles à détecter au-delà de 120-150 m. La portée de détection varie selon les différents modèles de sonar latéral et les fréquences. Plus la fréquence sera élevée, plus réduite sera la portée de détection mais meilleure l'image résultante. Les meilleurs résultats seront obtenus avec une portée de 150 m permettant de profiter d'une fréquence de répétition élevée et d'une plus haute définition. Un test sur un écho calibré doit fournir normalement des informations sur les performances du sonar dans la zone à lever.

2.3.5 Distorsions des enregistrements du sondeur latéral

- 2.3.5.1 Les sonogrammes ne sont jamais des représentations isométriques du fond et on doit connaître leurs facteurs de déformation avant d'interpréter les mosaïques comme on le ferait de cartes, à moins d'avoir éliminé les distorsions par traitement numérique avant compilation. Les causes principales de distorsions sont :

- compression du sonogramme par suite d'une augmentation de la vitesse du bateau : la distorsion de l'enregistrement se produit dans la direction du profil, suite à un changement d'allure du bateau pour une vitesse de déroulement constante du papier ;
- variation de la hauteur du poisson au-dessus du fond, se traduisant par une distorsion latérale perpendiculaire au profil ;
- variation de la pente du fond, se traduisant par des distorsions perpendiculaires aux profils et différentes du côté montant et du côté descendant.

- 2.3.5.2 On peut calculer les distorsions d'après la vitesse du bateau, la portée, la vitesse de déroulement du papier et la hauteur du poisson. Pendant l'exploration, ces effets sont gardés en mémoire lors du plottage des contacts mais ils doivent être analysés en détail

pendant les recherches. Pour réduire les distorsions au maximum, la vitesse d'investigation sera alors ajustée aux environs de 3 nœuds.

- 2.3.5.3 Effet de miroir de Lloyd : pendant l'exploration au sonar latéral par conditions très calmes, une partie du faisceau peut être réfléchi par la surface (voir figure 4.3). Connue sous le nom d'effet de miroir de Lloyd, cette réflexion se traduit par l'apparition d'une série de maximums et de minimums sur l'image produite. Cet effet ne se produit généralement que quand le poisson est près de la surface ; il peut être minimisé en remorquant le poisson plus profondément.

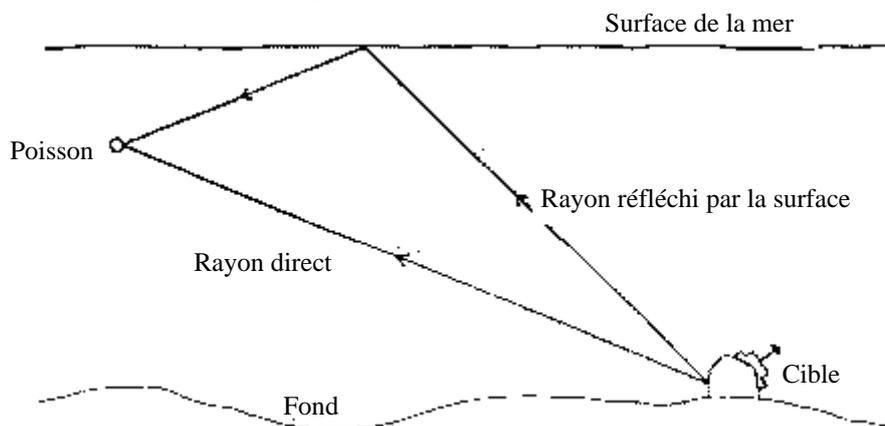


Fig. 4.3 «Effet de miroir de Lloyd »

- 2.3.5.4 Diaphonie : la diaphonie du sonar latéral se manifeste par l'apparition d'une image miroir d'une voie, généralement d'intensité plus faible, sur la voie opposée et qui peut masquer l'image réelle de la voie affectée. Ce phénomène peut empêcher la détection des objets ou conduire à une détection erronée de détails qui ne sont autres que des copies des objets réels de la voie opposée. La diaphonie peut être particulièrement gênante quand il y a de nombreux détails dont on ne saura vérifier s'ils sont réels ou non.
- 2.3.5.5 Effet d'inclinaison du poisson : si le poisson est incliné, la voie orientée vers le fond aura un signal de retour plus fort et par conséquent une image plus foncée que la voie orientée vers le haut. La classification du fond étant basée sur l'interprétation de l'ombre résultant de la puissance du signal réfléchi par les différents types de fonds, l'effet d'inclinaison entraînera par conséquent une interprétation difficile ou même erronée.
- 2.3.5.6 Contrôle automatique de gain (CAG) : le CAG a été introduit pour optimiser l'image des objets détectés. En d'autres termes, dans les zones à fort retour, telles que les fonds rocheux, le gain sera réduit automatiquement pour permettre une meilleure discrimination. Cependant, comme pour l'effet d'inclinaison, la modification du gain –et celle du contraste qui en résulte– rend aussi l'interprétation plus difficile voire impossible, aussi, le CAG devra-t-il être désactivé quand le sonogramme est utilisé pour la classification des fonds.
- 2.3.5.7 Remous et sillages : quand le sonar latéral est remorqué trop près de la surface, l'image peut être affectée par les remous et les sillages des autres bateaux ou du remorqueur lui-même lors d'une giration. De telles interférences peuvent influencer sérieusement la classification des fonds aussi est-il important de les signaler dans le cahier d'observations afin de faciliter l'exploitation ultérieure des sonogrammes.
- 2.3.5.8 Thermocline : comme pour les autres sonars, la propagation des signaux du sonar latéral est soumise aux changements de propriétés des eaux traversées qui peuvent entraîner des distorsions d'image. Il est possible d'utiliser un logiciel de redressement d'image, mais l'hydrographe doit avoir conscience du problème et prendre le cas échéant la décision

d'augmenter le degré d'insonification du fond. Par exemple, dans les régions très fréquentées, il conviendra de densifier l'insonification au moyen de profils intercalaires parcourus en sens inverse, voire de traversiers supplémentaires, et de travailler avec de plus courtes portées. Dans les zones moins sensibles où la distorsion n'est plus un problème, on pourra utiliser des portées plus grandes et limiter les recouvrements.

2.3.5.9 L'ouvrage intitulé « *Sound Underwater Images – A Guide to the Generation and Interpretation of Side Scan Sonar Data* » (Fish JP & Carr HA, 1990) est un document de référence à utiliser pour optimiser l'interprétation du sonar latéral.

2.3.6 Détection des hauts-fonds

2.3.6.1 Les hypothèses suivantes sont posées en préalable :

- la longueur de l'objet est définie comme étant sa dimension mesurée perpendiculairement à l'incidence du faisceau du sonar latéral ;
- le nombre minimal de signaux reçus pour former un écho visible est fixé à cinq ;
- la célérité du son est supposée être égale à 1 500 m/sec ;
- l'ouverture angulaire des faisceaux est de 1,5°.

2.3.6.2 Unités de mesures :

Intervalle de temps entre deux pings	t	secondes
Fréquence de répétition	F	impulsions par seconde
Vitesse-fond	V	mètres par seconde
Longueur de l'objet	L	mètres
Célérité dans l'eau de mer	C	mètres par seconde
Échelle d'enregistrement	Rm	mètres
Largeur du faisceau	Bw	mètres
Distance oblique de l'écho	Rs	mètres
Longueur de l'antenne	l	mètres
Distance parcourue entre deux pings	d	mètres

2.3.6.3 Équations fondamentales :

$$F = \frac{C}{2Rm} \text{ pings par seconde ; ou } t = \frac{1}{F} \text{ secondes}$$

Φ étant très petit, la largeur Bw de faisceau pour une distance Rs donnée est : $Bw = Rs \cdot \Phi$

2.3.6.4 On peut remarquer sur la Figure 4.4 que l'objet A est le plus grand objet qui NE PEUT PAS recevoir cinq pings (impulsions) ; il peut en recevoir un maximum de quatre (c.-à-d. les pings 2, 3 et 4 et le ping 1 ou 5). Cependant, théoriquement, une petite augmentation de la longueur de l'objet A signifierait qu'il a reçu cinq pings ; en général, pour N pings, sa longueur est donnée par :

$$L = V \cdot t \cdot (N - 1) - Bw \quad (4.1)$$

2.3.6.5 L'objet B est le plus petit objet qui DOIT théoriquement recevoir cinq pings; il est atteint par le premier et est manqué de justesse par le sixième. Sa longueur est donnée par :

$$L = V \cdot t \cdot N - Bw \quad (4.2)$$

Fondamentalement, c'est la même équation que celle qui est utilisée pour déterminer la vitesse d'exploration. Les deux formules présupposent que le faisceau est divergent.

2.3.6.6 En général, l'équation (4.1) est utilisée pour déterminer :

- soit la longueur minimum de l'objet qui doit recevoir au moins cinq impulsions pour une vitesse-fond donnée ;

- soit la vitesse-fond qui ne doit pas être dépassée si on veut qu'un objet de longueur donné reçoive cinq impulsions.

2.3.6.7 Dans certaines circonstances, l'hydrographe estimera plus prudent d'utiliser l'équation 4.2 qui donne une plus grande probabilité de détection.

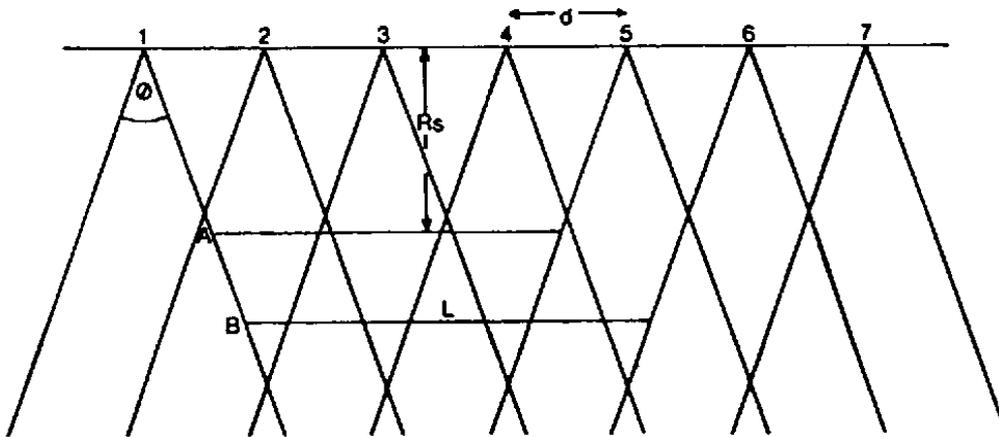


Fig. 4.4 « Diagramme montrant le nombre de pings reçus par un objet »

2.3.7 Calcul de la vitesse de progression

- 2.3.7.1 Pour une échelle de levé classique à 1 : 25 000, l'espacement des profils sera de 125 mètres et le sondeur latéral sera réglé sur la portée 0-150 m ; en général, le sondage régulier et l'exploration au sondeur latéral seront conduits simultanément. Avec cet espacement de 125 m, un recouvrement de 25 m de part et d'autre des profils adjacents sera assuré, bien que ce recouvrement puisse être réduit en fonction des aléas de tenue de profil.
- 2.3.7.2 Pour valider un écho sur l'enregistrement il est nécessaire de s'assurer qu'il a reçu cinq pings au moins et pour le classer comme détail intéressant, il faut le confirmer en le détectant sur un autre profil. Ceci ne veut pas dire que les échos qui n'ont pas été détectés sur deux profils adjacents sont des faux-échos mais montre qu'une petite épave située en bordure d'enregistrement peut facilement passer inaperçue.
- 2.3.7.3 Pendant l'exploration, il est nécessaire de calculer la vitesse-fond à ne pas dépasser afin de s'assurer qu'un objet d'un mètre de long reçoive cinq impulsions sur deux profils adjacents.

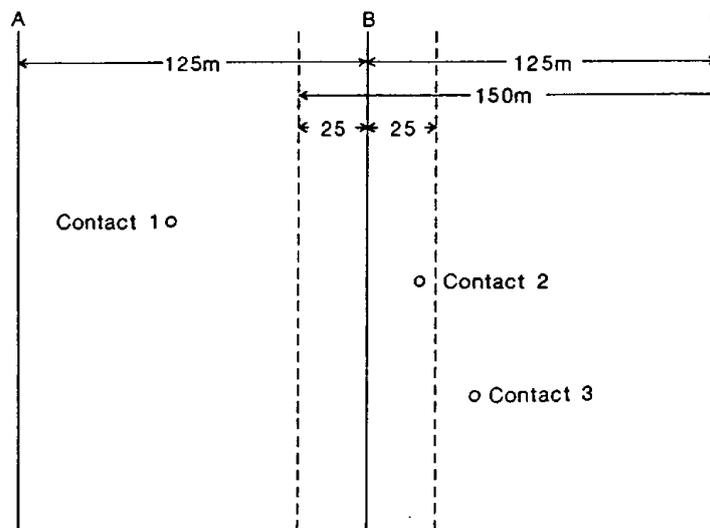


Fig. 4.5 « Calcul de la vitesse de progression »

2.3.7.4 Pour fixer les idées, on a représenté à la figure 4.5 trois profils A, B et C espacés de 125 m. Ces profils sont parcourus par un navire hydrographique qui met en œuvre son sonar latéral par fonds de 150 m. Quels sont les critères de vitesse à respecter?

2.3.7.5 Dans le champ proche : La dimension du champ proche est normalement inférieure à 20 m. Par conséquent, si les profils adjacents A et C permettent d'assurer un recouvrement de 25 m, un objet insuffisamment insonifié dans le champ proche du profil B le sera suffisamment par les profils A et C et la limitation de la vitesse de progression à 3,6 nœuds pour garantir une détection de 5 pings dans le champ proche n'aura plus de raison d'être.

2.3.7.6 Dans le champ lointain : Le contact 1 sera détecté sur les profils A et B, le contact 2 recevra cinq pings des profils A et C et le contact 3 cinq pings des profils B et C. Calculons la vitesse-fond à ne pas dépasser pour qu'un objet de longueur $L = 3,0$ m immergé à 25 m reçoive cinq pings.

Dans l'équation (4.1) la longueur maximale de l'objet qui ne pourra pas recevoir 5 pings sera :

$$L = V \cdot t \cdot (N - 1) - Bw$$

où $Bw = 25 \cdot \Phi$ (l'ouverture angulaire du faisceau étant de $1,5^\circ$ à exprimer en radian)

$N = 5$ (nombre de pings reçus)

$t = 0,2$ sec (intervalle entre deux pings)

$L = 2,999$ m (cette longueur a été choisie au-dessous du seuil théorique de 3 mètres au-delà duquel l'objet recevra 5 pings)

d'où il résulte que $V = \frac{L+Bw}{(N-1)t}$

$$= \frac{2,999 + 0,6545}{4 \cdot (0,2)}$$

$$= 4,57 \text{ m/sec ou } 8,9 \text{ nœuds}$$

2.3.7.7 Dans la pratique, le poisson ne doit pas être remorqué à des vitesses-fond supérieures à 8,0 nœuds sous peine de ne pas détecter les petits objets, ou 10 nœuds tout au plus car au-delà, le poisson fait des embardées. Noter aussi que pour garantir la condition des 5 pings, l'équation (4.2) doit être utilisée ce qui donne une vitesse de 3,65 m/sec ou 7,1 nœuds.

2.3.7.8 S'il est nécessaire de détecter des objets de 1,0 m de long sur deux profils, alors :

$$V = \frac{0,999 + 0,6545}{4 \cdot (0,2)}$$

$$= 2,067 \text{ m/sec ou } 4,0 \text{ nœuds}$$

2.3.7.9 Cependant si pour le même objet, les 5 pings ne sont requis que sur un seul profil, alors :

$$V = \frac{0,999 + (72,5 \cdot Bw)}{4 \cdot (0,2)}$$

$$= 3,623 \text{ m/sec ou } 7,0 \text{ nœuds}$$

2.3.7.10 Il est risqué d'utiliser la dernière des deux équations précitées car la probabilité de détection d'un petit objet dans une situation « à chance unique » est faible.

2.3.7.11 Sonars latéraux « rapides » : Avec les progrès technologiques, certains sonars latéraux ont la capacité d'opérer à des vitesses-fond plus rapides que précédemment. La série Klein

5000 est un exemple qui utilise un faisceau directionnel et des techniques de focalisation produisant simultanément plusieurs faisceaux adjacents et parallèles sur chaque voie. Ce concept « multifaisceaux » autorise des vitesses de remorquage rapides tout en fournissant des images de haute résolution. D'autres développements incluent l'utilisation de techniques d'interférométrie, de multi-pings et d'ouvertures synthétiques. Cependant, comme pour tous ces types de senseurs, il est essentiel de valider leurs performances sur des cibles connues, représentatives des objets à détecter. La validation doit être suivie par des contrôles de fiabilité initiale et des vérifications répétitives dans la zone du levé.

2.3.8 Erreurs de tenue de route

2.3.8.1 Une question qu'il faut se poser est celle de la distance qui peut être parcourue en dehors du profil avant qu'un trou n'apparaisse dans la couverture ? Considérant qu'il suffit d'une seule détection à cinq pings pour un objet de 1,0 m, prenons le cas d'un levé standard à 1: 25 000 avec espacement des profils de 125 m, portée de 0-150 m assurant un recouvrement de 25 m. Dans l'exemple suivant, la somme de toutes les erreurs est calculée comme suit :

Positionnement du poisson	e1	10 m
Navigation du bateau	e2	5 m
Effet de pente	e3	1 m
Variations de la célérité	e4	1,5 m
soit une emq de	$\sum e^2 =$	128,25 m
et un écart type de	E =	11,3 m

2.3.8.2 Dans le recouvrement de 25 m, 24 m seulement sont utilisables (après soustraction de la largeur de trace de l'écho). En définitive, l'écart admissible de tenue de route est égal à :

$$\sqrt{(24^2 - \Sigma e^2)} = 21 \text{ mètres}$$

2.3.8.3 Ceci suppose qu'un objet est détectable à 149 m où il apparaîtra comme un point noir de (0,8 x 0,8) mm avec une ombre de 1 mm (si cette dernière n'est pas masquée par la marque des 150 m). Une tolérance de tenue de route plus prudente serait de 15 m ; l'objet apparaîtrait alors comme un plot de 0,6 mm à l'échelle de 1 : 25 000.

2.3.9 Mise en œuvre du sondeur latéral

2.3.9.1 L'exploration, ou balayage, d'une zone est le nom donné à la méthode standard de recherche hydrographique par sonar latéral. Les catégories d'explorations nécessitées pour un levé donné sont spécifiées dans les IT. Quelques types de recherches par sonar latéral sont indiqués ci-dessous :

Les catégories A et B impliquent une recherche par sonar latéral dans une direction donnée où, dans la mesure du possible, les profils adjacents sont parcourus dans des sens opposés et toutes les épaves répertoriées sont investiguées. Des exemples d'espacement entre profils, de portées, de recouvrements et de vitesses-fond sont indiqués au tableau 4.4.

Les explorations de catégorie A sont standard pour les régions côtières qui ne font pas l'objet de levés de contrôle de routine. Elles prévoient une insonification théorique de 240%, correspondant à un pourcentage égal à 200 fois l'échelle efficace du sonar latéral divisée par l'espacement des profils.

Les balayages de catégorie B correspondent à une insonification théorique de 133%. Ils peuvent être utilisés pour des contrôles de routine par profondeurs supérieures à 100 m, là où la détection de toutes les anomalies bathymétriques est moins cruciale.

La catégorie C indique que seules les recherches d'épaves répertoriées seront effectuées.

La catégorie D correspond aux recherches spéciales, prescrites par instructions particulières détaillant les conditions de mise en œuvre du sonar latéral, des sonars de coque, etc.

Catégorie	Type de levé / échelle	Espacement des profils	Portée du sonar	Vitesse-fond max.	Recouvrement entre profils
A1	Spécial	125 m	150 m	6 nœuds	25 m
A2	Levés côtiers E > 1 : 25 000 par fonds < 15m	62,5 m	75 m	8 nœuds (voir Note 2)	12,5 m
	Levés côtiers E > 1 : 25 000 par fonds < 50m	125 m	150 m		25 m
	Levés du plateau continental par fonds > 50 m et/ou échelle < 1 : 25 000	250 m	300 m		50 m
B1	Contrôle de routine	250 m	150 m		50 m
B2	Levés du plateau continental par fonds > 100 m et échelle < 1 : 25 000	500 m	300 m		100 m

**Tableau 4.4 - Exemple de critères de recherches par sondeur latéral
- Catégories A et B -**

Notes :

1. Les recouvrements entre profils adjacents sont prévus pour compenser les erreurs de tenue de route et de positionnement. Si l'hydrographe considère que ces dernières excèdent les valeurs stipulées au tableau 4.4, il lui appartient d'ajuster l'espacement des profils ou la portée, et si nécessaire, de procéder ultérieurement à des ajustements de vitesse.
 2. Voir plus haut les commentaires relatifs à l'utilisation du sonar latéral « rapide » qui peut soutenir des vitesses plus élevées.
- 2.3.9.2 On considère que les critères ci-dessus correspondent à des normes minimales. Si on doute des performances du sonar latéral, on resserrera les profils ou bien on réduira la vitesse. Dans tous les cas, il est nécessaire de se référer à la publication S-44 de l'OHI ou aux normes des ZOC de la S-57 pour satisfaire aux exigences des recherches.
- 2.3.9.3 L'exécution de profils réguliers, rectilignes et parallèles, demeure la façon la plus efficace pour couvrir une zone de levé. La direction des profils sera proche de celle des courants de marée afin de minimiser les dérives du poisson. L'espacement entre profils sera déterminé par la portée choisie et le recouvrement prescrit. Il est recommandé d'adopter un recouvrement de 125% entre fauchées adjacentes.
- 2.3.9.4 Pour les levés d'hydrographie militaire sur le plateau continental par fonds de moins de 200 m, il est requis ordinairement de détecter tous les objets de plus d'un mètre. Ceci ne peut pas être accompli facilement avec les équipements existants et un compromis doit être fait entre l'exploration au sonar latéral et la bathymétrie. Ce compromis est réalisé pour les objets d'un mètre par fonds de 140 m ; à l'échelle normale de 1 : 25 000, il correspond à un espacement entre profils de 125 m, une portée de 150 m et une vitesse-fond inférieure à 7 nœuds. Les systèmes en service ne peuvent pas être déployés efficacement à des profondeurs de plus de 150 m et pour les fonds compris entre 150 et 200 m, la recherche sera limitée à l'investigation des grosses épaves et des obstructions.

- 2.3.9.5 Les UUV (*unmanned underwater vehicle*) : l'utilisation d'UUV équipés d'un sonar latéral et d'un SMF est de plus en plus courante. Ces plates-formes permettent aux senseurs d'être déployés à grande profondeur et à une hauteur appropriée au-dessus du fond. Il devient alors possible de détecter les petits objets à de plus grandes profondeurs qu'actuellement avec les senseurs de coque ou remorqués par un bâtiment de surface.
- 2.3.9.6 Les profils de sonar latéral doivent toujours être aussi parallèles que possible à la direction des courants de marée dans la région du levé. Les erreurs de positionnement du poisson sont en effet toujours plus grandes perpendiculairement au profil que dans l'axe et on doit s'efforcer de les minimiser. À 6 nœuds, pour 400 m de câble filés et un courant de marée de 2 nœuds, une différence de 10° entre le courant de marée et la direction du profil peut engendrer un écart de 17 m du poisson par rapport au profil.
- 2.3.9.7 Il est nécessaire d'effectuer un profil supplémentaire de chaque côté de la limite extérieure de la zone à lever afin d'en assurer une couverture complète et continue. De même, il faut s'assurer que le poisson a dépassé clairement l'extrémité du profil avant de le terminer.
- 2.3.9.8 Ne pas oublier que la vitesse et les probabilités de détection calculées ici sont théoriques et ne tiennent pas compte des conditions défavorables de mise en œuvre des équipements.
- 2.3.9.9 Repérage des contacts : la détection des obstacles immergés situés entre les profils du levé est le but principal du sonar latéral. L'utilisation finale de l'information ne doit jamais être perdue de vue quand on programme une recherche ; les sous-marins, par exemple, ne s'intéressent pas aux fonds rugueux et la guerre des mines les évitent habituellement. Par fonds lisses, le but doit toujours être de détecter chaque objet tandis que dans les zones plus accidentées, cette exigence est moindre. Tous les contacts doivent être plottés et affectés d'un indice qui sera inclus *in fine* dans le modèle de cartographie des fonds.
- 2.3.9.10 Les techniques développées pour caractériser les contacts des sonagrammes s'efforcent toutes de réduire les erreurs de positionnement et d'orientation du poisson. Les recherches spécifiques, investigations et analyses s'inspireront des recommandations ci-après :
- Les contacts sont positionnés généralement à partir de deux directions opposées à 180°. On utilisera la méthode standard dite du « *layback and offset* » qui consiste à prendre comme position la plus probable la moyenne des composantes longitudinales et transversales du vecteur navire/poisson.
 - Les investigations croisées permettent de disposer pour chaque contact de deux vecteurs perpendiculaires à partir desquels les contours de l'objet peuvent être appréciés.
 - L'investigation par passage au sondeur à la verticale de l'objet permettra d'en déterminer les meilleures cotes et positions qui seront toujours préférées à celles du sondeur latéral. Effectuer si possible une passe dans l'axe longitudinal du contact.
- 2.3.9.11 Cotations au sonar latéral : une bonne image d'épave ou d'obstruction doit permettre d'estimer sa hauteur au-dessus du fond en utilisant les propriétés de l'ombre acoustique. Bien que ce procédé ne soit pas suffisamment précis pour une exploitation cartographique, la cote ainsi calculée sera très utile pour la sécurité du bateau et du poisson et l'organisation des investigations. Les dimensions estimées d'une épave peuvent aussi être mesurées sur le sonogramme. On retiendra notamment les points suivants :
- Il ne faut pas perdre de vue lors de la cotation d'une ombre acoustique que certaines parties de l'épave, telles que les mâts, peuvent ne pas projeter d'ombre détectable ;
 - les cotes des ombres doivent être moyennées dans deux directions opposées afin de s'affranchir de l'erreur de pente. Noter aussi que les hauteurs mesurées dans les zones proches du nadir peuvent être erronées jusqu'à 20% ;

- les mesures de longueur et de largeur doivent toujours être effectuées perpendiculairement au profil et corrigées de l'inclinaison du faisceau.
- 2.3.9.12 Conduite des investigations : les investigations (ou recherches) sont exécutées pour améliorer la classification des contacts repérés au cours de l'exploration. La procédure suivante est recommandée :
- relocaliser le contact en effectuant un nouveau passage au sonar latéral à 50-100 m afin d'éliminer un faux-écho éventuel ;
 - vérifier et/ou améliorer la position du contact ;
 - procéder alors à l'investigation.
- 2.3.9.13 L'échelle 0-150 m est habituellement la meilleure (l'utilisation de l'échelle 0-75 m peut conduire à une situation où l'ombre des contacts est trop marquée et sort du sonogramme). La vitesse doit être fixée approximativement à 3 nœuds afin de réduire les distorsions du sonogramme et de maintenir le poisson approximativement à 15 m au-dessus du fond. Si la définition de l'image est bonne, quatre passes, dont deux effectuées perpendiculairement, doivent être suffisantes. Dans le cas d'une épave, effectuer deux passes dans son axe longitudinal et deux autres par son travers.
- 2.3.9.14 La procédure précitée donne habituellement des données suffisantes pour déterminer si une investigation au sondeur vertical est nécessaire ; elle permet aussi de mesurer la longueur, la largeur et la hauteur de l'objet. Le sonar latéral doit toujours être relevé avant l'investigation. Si plusieurs échos d'une même zone doivent être recherchés au sonar latéral, on gagnera du temps en procédant à l'exploration de l'ensemble avant de relever le sonar latéral et d'effectuer les cotations précises au moyen du sondeur vertical.
- 2.3.9.15 Confirmation de l'inexistence de hauts-fonds cartographiés : On doit s'assurer dans toute la mesure du possible, de l'existence ou de la non-existence des épaves, obstructions ou hauts-fonds cartographiés mais qui n'ont pas été localisés et examinés au cours d'un levé car ces objets ne peuvent pas être supprimés des cartes sans instruction claire et documentée du directeur technique*. La procédure de confirmation de non-existence est décrite ci-après :
- Les objets dont les positions avaient été signalées précédemment, mais qui n'ont pas été détectés pendant le levé, devront faire l'objet d'une recherche très détaillée avant d'être supprimés. Ce type de recherche doit inclure une exploration au sonar latéral dans deux directions perpendiculaires et une recherche au sondeur vertical dans un rayon de 0,5 à 2,5 milles de la position figurant sur la carte. On peut aussi envisager d'effectuer un dragage hydrographique.
 - Lors de la recherche d'un objet de position approximativement connue, tel qu'une épave en (PA), la recherche par sonar latéral doit être exécutée dans deux directions perpendiculaires et éventuellement étendue dans un rayon d'au moins 2,5 milles correspondant à une probabilité statistique de détection. Cependant, si le directeur technique juge que la recherche initiale dans une direction a été suffisante et que son sonar latéral fonctionne bien, il peut estimer que la recherche dans la direction perpendiculaire n'est pas nécessaire, eu égard aux informations dont il dispose quant à la dimension, l'historique et la position de l'épave en question. Si de plus, au cours de l'exploration initiale, il met en œuvre un magnétomètre et ne détecte aucune anomalie dans un rayon de 2,5 milles autour de la position de la carte, il peut apporter une preuve supplémentaire qu'aucune épave à contenu ferromagnétique n'existe dans la région.
 - Les recherches d'épaves situées en dehors d'une zone de levé régulier doivent être

* NdT : Cette terminologie en usage dans les missions hydrographiques françaises désigne l'hydrographe qui engage sa responsabilité dans l'exécution d'un levé. Elle correspond à l'expression *Charge Hydrographer*.

conduites dans un rayon de 2,5 miles au moins. S'il faut effectuer une deuxième exploration perpendiculairement à la première, on appliquera les critères ci-dessus.

2.3.9.16 Que les recherches relèvent du levé d'envergure ou de l'investigation isolée, le directeur technique devra établir un rapport particulier[▲] complet et documenté incluant ses recommandations quant aux actions cartographiques préconisées.

2.3.10 Erreurs de positionnement des contacts établis par sonar latéral

2.3.10.1 Au cours d'un levé normal, l'objectif fondamental de l'hydrographe est d'insonifier totalement les fonds afin de détecter tout détail significatif. Les caractéristiques des objets de grandes dimensions seront précisées par sondeur vertical.

2.3.10.2 Cependant, certains levés spéciaux requièrent de fournir les positions les plus précises possibles de chaque écho, en particulier des petits échos posés sur le fond. Celles-ci ne sont pas toujours déterminées au sondeur vertical aussi est-il nécessaire d'analyser toutes les erreurs de positionnement intervenant dans l'exploitation d'un sonagramme.

2.3.10.3 Pour un écart de $\pm 1 \sigma$, les incertitudes affectant le positionnement d'un écho proviennent :

de la position du navire	5,0 m
de la position du poisson (voir Note) -	10 m
des variations dues à la célérité (1500 m/sec) -	1,5 m
de la résolution de l'enregistrement (0,75% de la portée) -	0,75 m
de l'erreur de pente -	1,0 m

Elles se traduisent par une erreur totale de (\sqrt{emq} , soit 1σ) = 11,4 m

Note : Cette quantité inconnue dépend de l'utilisation ou non d'un système de positionnement du poisson, l'expérience montrant que celui-ci peut osciller de 20 m de part et d'autre du profil. L'erreur dépend aussi de la profondeur et de la longueur de câble filé. On l'estimera égale à ± 10 m.

2.3.10.4 Les valeurs mentionnées ci-dessus sont indicatives et la liste n'est pas exhaustive. L'hydrographe doit en tenir compte à chaque étape du levé et commenter le bilan d'erreurs dans son rapport particulier, comme il le fait pour les erreurs de sondeur.

2.3.10.5 L'incertitude sur la position du poisson est la plus grande source potentielle d'erreur. À moins d'utiliser un système de positionnement précis du poisson, les hydrographes doivent veiller à minimiser les erreurs en préparant des profils parallèles au courant de marée ou au courant dominant. Si ce n'est pas possible, on profitera de chaque occasion pour quantifier la dérive du poisson par rapport à la trajectoire en se repérant par rapport à des détails de position connue. S'il y a un risque que l'insonification ne soit pas complète, la solution la plus simple est de resserrer les profils au prix d'une réduction du rendement.

2.3.11 Mesures effectuées sur le sonogramme

2.3.11.1 Écart longitudinal ou *layback* : Le *layback* est la composante du vecteur antenne/poisson mesurée sur le profil (voir figure 4.6). Dans des conditions normales, il est égal à :

$$DT + \sqrt{[WO^2 - DS^2]}$$

[▲] NdT : Cette terminologie en usage dans les missions hydrographiques françaises correspond à l'expression *Evaluation report* de la publication S 32 de l'OHI – 5^{ème} édition – 1994 – Art. 1 718.

où DT est la distance séparant l'antenne du point d'amarrage de la remorque, WO la longueur de câble filée au-delà de ce point et DS l'immersion du poisson sous la surface.

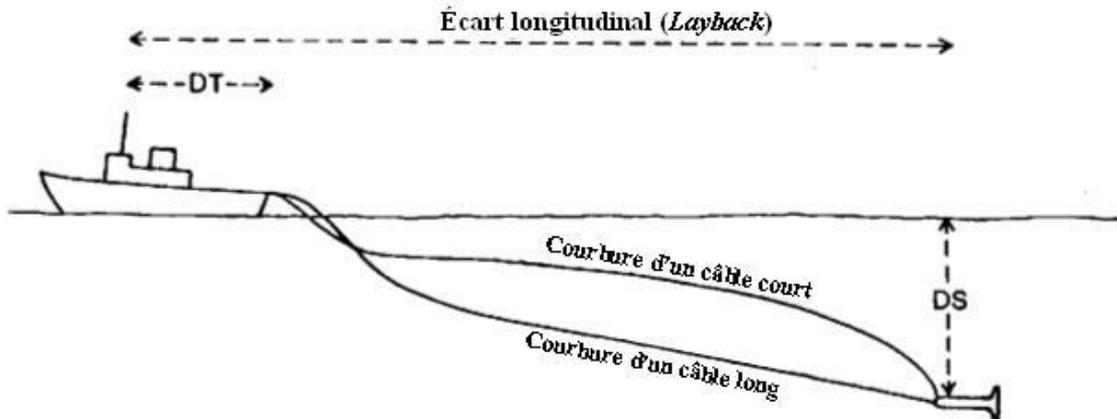


Fig. 4.6 « Écart longitudinal (*layback*) du sondeur latéral »

Remarque : Quand la longueur filée dépasse 100 m, les effets de la courbure du câble électro-porteur l'emportent sur les propriétés dynamiques du poisson.

- 2.3.11.2 Le calcul du *layback* repose sur l'hypothèse simplificatrice d'un câble rectiligne alors qu'il suit en réalité un parcours irrégulier dans les plans horizontaux et verticaux.
- 2.3.11.3 Correction de distance oblique : la distance oblique est rapportée à l'horizontale par application du théorème de Pythagore. Si le fond est en pente, une correction supplémentaire devra être appliquée.
- 2.3.11.4 Cotation des objets sur les sonogrammes : l'une des propriétés les plus utiles du sonar latéral est la possibilité de coter les hauteurs des objets à partir des ombres acoustiques portées sur les sonogrammes. Il faut pour cela que la hauteur du poisson au-dessus du fond et la portée soient optimisées (Fig. 4.7).

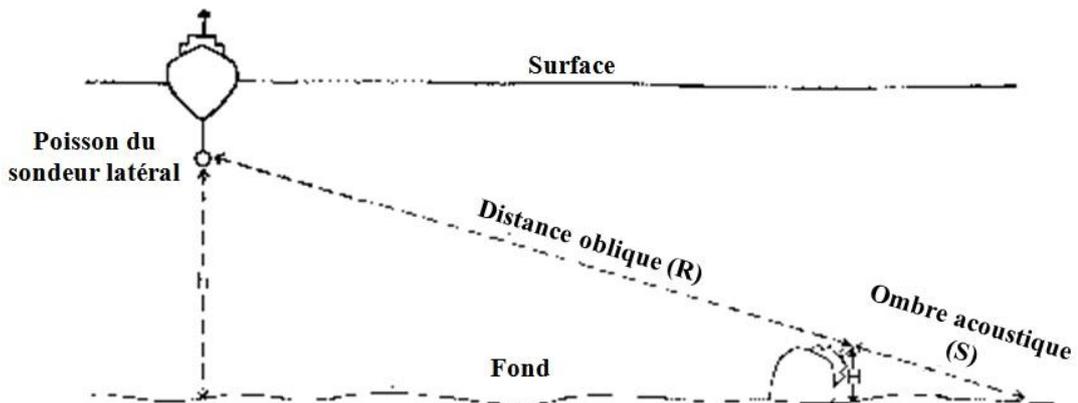


Fig. 4.7 « Cotation d'une hauteur à partir de l'ombre acoustique »

Les deux triangles semblables de la figure 4.7 permettent d'écrire :

$$H = \frac{S \times h}{R + S}$$

Où H est la hauteur de l'objet, S la longueur de l'ombre acoustique, R la distance oblique de l'épave et h la hauteur du poisson au-dessus du fond.

2.3.12 Sondeurs multifaisceaux (SMF)

- 2.3.12.1 Le SMF s'est rapidement imposé en bathymétrie par sa capacité théorique à assurer une insonification totale des fonds tout en satisfaisant aux spécifications de l'OHI.

Le fait que le transducteur du SMF soit fixé sur la coque du bâtiment hydrographique lui confère une précision de positionnement égale à celle du système utilisé par le porteur. Avec ses faisceaux discrets, le SMF devient l'outil de choix pour les levés bathymétriques.

- 2.3.12.2 Grâce à la précision de son positionnement, des passes SMF consécutives sur un même objet conduisent exactement à la même position géoréférencée. Cette propriété présente un grand avantage quand il faut retrouver un objet en vue de l'investiguer *in-situ* par ROV ou par plongeur. Malheureusement, le transducteur fixe produit des angles d'incidence qui ne sont pas favorables à la détection d'objets en temps réel utilisant le même principe que les ombres acoustiques du sonar latéral. La détection doit se focaliser sur la mesure des variations de bathymétrie causées par la présence d'un objet sur le fond.
- 2.3.12.3 Méthodes de levé : les spécifications d'un levé au SMF et au sonar latéral sont semblables à celles d'un levé au sondeur monofaisceau traditionnel, l'exécution d'une série régulière de profils parallèles demeurant la façon la plus efficace pour couvrir la zone. La direction des profils devra être optimisée pour le sonar latéral ; elle sera proche de celle des courants de marée. Et du fait que le SMF collecte une aussi grande densité de données dans l'axe des profils que perpendiculairement, il ne sera plus nécessaire de couper les isobathes à angle droit afin de mieux les déterminer comme pour les levés au sondeur monofaisceau.
- 2.3.12.4 L'espacement des profils sera déterminé comme d'habitude en fonction de l'échelle du levé et du recouvrement. La différence est qu'une couverture bathymétrique de 100% sera probablement spécifiée. Dans les eaux peu profondes, disons de 30 m, l'espacement entre profils pour obtenir une couverture SMF de 100% peut être inférieur à celui requis par le sonar latéral. Il revient à l'hydrographe de décider s'il est plus rentable d'effectuer une couverture au sonar latéral et de la compléter ensuite par des profils SMF intercalaires ou de procéder d'entrée à une couverture SMF complète.
- 2.3.12.5 La détermination de l'espacement des profils est fonction des profondeurs rencontrées dans la zone dont dépendront les largeurs des fauchées du SMF. Quand cette profondeur varie beaucoup, il est plus efficace de découper la zone et de sonder chaque subdivision homogène avec un espacement approprié. Il est recommandé d'assurer un recouvrement moyen de 25% entre fauchées adjacentes et de ne pas tomber en dessous de 10%.
- 2.3.12.6 Quand la direction des profils dépend du SMF uniquement et si la célérité est homogène dans la zone, la meilleure orientation des profils sera parallèle aux isobathes. Dans cette configuration, la largeur des fauchées et le recouvrement entre fauchées adjacentes seront plus réguliers et l'espacement entre profils pourra être augmenté.

2.3.13 Conditions d'utilisation des sondeurs multifaisceaux

- 2.3.13.1 En dépit des pronostics initiaux et des prétentions des fabricants, la détection par SMF d'objets petits et potentiellement dangereux ne peut pas être garantie. Par exemple, si un mât d'épave était détecté par un SMF, les algorithmes d'atténuation du bruit auraient toutes les chances de l'éliminer tandis qu'inversement, la suppression des filtres produirait tellement de bruits qu'elle rendrait les données inutilisables.
- 2.3.13.2 Un autre aspect fondamental du SMF est la géométrie de son faisceau. Les marques et modèles sont de conceptions différentes, lesquelles peuvent, parfois, laisser des vides

relativement grands entre les faisceaux insonifiés. Le SMF interférométrique, par exemple, peut avoir des difficultés à détecter les petits objets situés à l'aplomb par le simple fait de la physique de ce type de système.

- 2.3.13.3 Les hydrographes doivent vérifier les performances de leur SMF avant de l'utiliser pour la détection des hauts-fonds en incluant la détermination de l'ouverture du faisceau, la fréquence de répétition, la vitesse-fond, etc. De nombreux services hydrographiques privilégient encore le sonar latéral pour détecter les objets, combiné avec le SMF pour la bathymétrie et le contrôle.

La géométrie du faisceau et les potentialités de détection offertes par le SMF sont largement discutées dans le N° 83 du *Hydrographic Journal* de janvier 1997 « *How Effectively Have You Covered Your Bottom?* » - par Miller JE, Hughes Clarke JE, & Paterson J.

2.3.14 Magnétomètre

- 2.3.14.1 Cet instrument peut être très utile pour distinguer les épaves ferreuses des roches. Un bref survol de la théorie opératoire des magnétomètres peut être trouvé dans la publication de 1981 de la FIG/IHO intitulée : « *Report on the Detection of Depth Anomalies* ».

- 2.3.14.2 Dans toute la mesure du possible, un magnétomètre sera déployé pendant l'exploration au sonar latéral afin d'apporter des preuves supplémentaires de la présence de matières ferreuses sur, ou sous, le fond bien qu'il ne puisse pas les localiser précisément.

- 2.3.14.3 L'intensité du champ magnétique créé par un objet ferreux est inversement proportionnelle au cube de sa distance. L'anomalie mesurée par le magnétomètre est :

$$M = \frac{50,000 \times P}{D^3} \text{ (en nanoteslas ou nT)}$$

où M est l'anomalie d'intensité du champ magnétique exprimée en nT, P le poids du métal de l'objet en tonnes et D sa distance en mètres par rapport au magnétomètre.

- 2.3.14.4 En général, le plus petit changement raisonnablement détectable d'intensité du champ magnétique sera de 5 nT. Pour une telle valeur, l'équation ci-dessus devient :

$$D = \sqrt[3]{10\,000 \times P}$$

ou, pour une série d'objets :

Objets	Portée de détection
Ancre de 100 kg -	10 m
Mine de 1 tonne -	22 m
Canon de 2 tonnes -	27 m
Épave de 10 tonnes -	46 m
Épave de 100 tonnes -	100 m
Épave de 1 000 tonnes -	200 m

- 2.3.14.5 Prenant l'exemple d'une exploration selon des profils espacés de 125 m par fonds de 50 m et un magnétomètre remorqué à 3 m sous la surface, on remarquera d'après ce tableau :

- qu'une épave ferreuse de 100 tonnes sera probablement détectée sur un profil au moins et que toute épave de plus de 1000 tonnes sera détectée sur plusieurs profils ;
- qu'une épave ferreuse de 10 tonnes ne pourra être détectée que par passage à l'aplomb ;

- que tout objet ferreux de moins de 10 tonnes aura peu de chances d’être détecté ;
- qu’un navire hydrographique contenant approximativement 1000 tonnes de masse ferreuse devra remorquer le magnétomètre 200 m derrière lui faute de quoi les portées de détection indiquées dans le tableau seront sérieusement dégradées.

2.3.14.6 Certains magnétomètres sont conçus pour être remorqués près du fond, augmentant ainsi la probabilité de détection des petits objets ferreux. Il faut faire attention cependant à ne pas emmêler leur câble avec celui du sonar latéral ; cet inconvénient a moins de chances de se produire quand le magnétomètre est remorqué en surface.

2.3.15 Autres méthodes de détection des objets posés sur le fond

2.3.15.1 Les autres sondeurs qui ont la capacité de détecter des objets incluent :

Le sondeur monofaisceau : cet instrument n’est pas normalement utilisé pour détecter les objets par petits fonds en raison de l’ouverture relativement étroite de son faisceau qui rend impossible la couverture totale d’une zone. Le monofaisceau peut être utilisé pour contrôler le SMF dont les performances de détection à l’aplomb et dans les eaux très peu profondes sont médiocres. Dans tous les cas, l’utilisation du sonar latéral sera indispensable.

Le lidar : les sondeurs laser aéroportés type Hawkeye, LADS ou Shoals sont capables d’assurer une couverture surfacique totale et pour certains, de détecter dans les eaux claires des objets compatibles avec l’ordre 1 de la S-44. Les développements actuels (2010) privilégient la détection d’objets de plus en plus petits.

Le sondeur électromagnétique aéroporté (AEM) : originalement conçus pour les levés géophysiques, les sondeurs AEM permettent de détecter des objets mais ne satisfont pas aux normes de l’OHI.

Sonar à vision vers l’avant (FLS): le FLS est conçu essentiellement pour la navigation et l’anticollision. Ses développements récents offrent certaines capacités de détection d’objets, mais celles-ci ne sont pas compatibles avec les normes bathymétriques de l’OHI, aussi le FLS ne peut-il pas être considéré comme un senseur hydrographique.

2.3.16 Détermination du brassage d’un objet

2.3.16.1 L’hydrographe doit déterminer le brassage des épaves et des obstructions. Les conseils suivants peuvent aider à choisir la méthode d’investigation en vue d’obtenir la profondeur minimale. Quelle que soit la méthode utilisée, l’opinion de l’hydrographe sur la précision obtenue est essentielle et doit être consignée dans le rapport particulier. Même quand la profondeur minimale n’a pas été atteinte, il faut faire exprimer un avis sur la précision obtenue et orienter les actions cartographiques futures.

2.3.16.2 Les précisions horizontales et verticales des profondeurs minimales doivent être cohérentes avec les critères du levé ainsi qu’avec les standards de la S-44 et/ou de la S-57 de l’OHI.

2.3.17 Mesure du brassage par sondeur

2.3.17.1 Le brassage du haut-fond peut être obtenu par saturation des sondes du monofaisceau. L’espacement des profils sera calculé en fonction de l’ouverture du faisceau et des profondeurs moyennes dans la zone, avec un recouvrement de 25% au moins. Le calcul de la zone insonifiée par sondeur monofaisceau se trouve au chapitre 3, paragraphe 4.5.

2.3.17.2 Le SMF permet alternativement de mesurer le brassiage. Cependant, comme signalé précédemment, l'hydrographe devra être certain que ses capacités lui permettent de déterminer la profondeur minimale, en particulier s'il s'agit d'un mât ou d'un objet semblable. Il devra notamment tenir compte de la largeur et de l'espacement des faisceaux, de la vitesse-fond, de la section insonifiée (nadir, voies intérieures, mi-fauchée, etc.), du nombre et de la direction des passes. Il ressort que le SMF est bien adapté à la délimitation de l'objet qui pourra alors être investigué en une seule passe ou plus économiquement par le sondeur monofaisceau.

2.3.18 Utilisation des plongeurs

2.3.18.1 L'emploi de plongeurs est une alternative quand la visibilité, la force du courant et la profondeur de l'objet le permettent. Quand les plongeurs sont utilisés, il convient de prévoir une durée suffisante pour conduire les travaux avec précision et sans risques. Si des profondimètres sont utilisés, leur précision doit être évaluée. Une mesure de brassiage par plongeurs peut être réalisée en moins d'une heure, alors qu'un dragage hydrographique peut prendre quatre heures ou plus.

2.3.18.2 Dans certaines circonstances, notamment par fonds inférieurs à 30 m, l'emploi de plongeurs peut être indiqué. En revanche, si une épave a été draguée ou investiguée par plongeurs depuis moins de cinq ans, que sa position est restée inchangée et que le sondeur n'indique pas de modification significative, l'utilisation de plongeurs n'est pas nécessaire.

2.3.18.3 Lorsque les profondeurs moyennes autour de l'épave sont notablement différentes de celles de la carte où lorsqu'on sait qu'un travail de déblaiement a été entrepris depuis le dernier levé, l'utilisation de plongeurs peut être nécessaire.

2.3.18.4 Si les sonogrammes indiquent que le bateau repose sur le côté ou quille vers le haut et que des profondeurs cohérentes ont été obtenues au sondeur, il est inutile de poursuivre les investigations sauf s'il existe une possibilité que des structures protubérantes n'aient pas été détectées au sonar latéral ou au sondeur, auquel cas les plongeurs devront être utilisés.

2.3.18.5 Les fonds malsains* requièrent une attention particulière car leur évolution peut faire réapparaître des débris dangereux pour le mouillage qui n'avaient pas été considérés comme tels auparavant. Les rapports de plongeurs deviennent alors particulièrement utiles.

2.3.18.6 Dans les zones évolutives et soumises à de forts courants de marée, les épaves peuvent se déplacer et leur brassiage changer. De telles épaves doivent toujours rester suspectes et en cas de doute, des vérifications par plongeurs doivent être effectuées.

2.3.19 Autres méthodes de détection

D'autres méthodes de détermination des brassiages incluent le dragage hydrographique et les engins autonomes et télécommandés équipés de senseurs appropriés. Ces méthodes qui procèdent par passages successifs sont détaillées ci-après.

2.3.20 Dragages hydrographiques

Dans certains cas, le seul moyen efficace pour mesurer le brassiage d'une roche ou d'une épave est le dragage à fil♦ qui se décline selon plusieurs méthodes :

2.3.20.1 Dragage dérivant à un bateau seul

* NdT : S 32 - Art.1915

♦ NdT : S 32 - Art.6013

Cette méthode lente mais précise peut devenir impossible si le vent et la marée sont traversiers et difficile s'ils sont contraires à la progression du dragage. L'orientation de la drague doit être maintenue perpendiculaire à la progression et elle ne doit subir aucun à-coup en avant ou en arrière. Les hydrographes qui utilisent cette méthode doivent se méfier des trous dans la couverture, des écarts excessifs de l'angle de dragage (orientation de la drague perpendiculairement au profil) et des glissements imperceptibles sur les obstacles.

Les conditions à respecter pour un dragage dérivant à un bateau seul sont les suivantes :

- l'épave doit avoir été investiguée par sondeur au préalable ;
- une bouée de marquage doit être mouillée à une largeur de drague environ en amont du courant de marée ;
- l'angle de dragage ne doit pas s'écarter de plus de 20° de celui de la progression ;
- il faut laisser la drague dériver (utilisation minimale des moteurs) ;
- la tension de la drague doit être maintenue constante pendant l'opération.

2.3.20.2 Dragage dérivant à deux bateaux

La procédure est semblable à la précédente. Il faut prêter attention aux points suivants :

- fauchée plus large que pour un dragage à un bateau seul (maximum 100-120 m) ;
- la position des bateaux d'extrémité doit être connue ;
- une bonne compétence manœuvrière est requise ;
- au début du dragage, les bateaux doivent être stoppés-dérivants ;
- surveiller le fléchissement (tension faible) et le relèvement de la drague (tension forte) ;
- les bateaux auront tendance à rouler ;
- les bateaux doivent tirer lentement ensemble.

Les facteurs susceptibles d'influencer la précision de cette méthode incluent :

- l'angle de dragage qui est déterminé par la dérive de la drague et par sa tension ; cet angle doit s'écarter le moins possible de la perpendiculaire à la progression ;
- le fléchissement de la drague qui est affecté par son poids et par la largeur de la fauchée ;
- la tendance des bateaux à rouler qui se traduit par une précision moindre que pour le dragage dérivant à un bateau seul.

2.3.20.3 Dragage en route.

Les facteurs susceptibles d'influencer la précision de cette méthode incluent notamment :

- la tendance au relèvement de la drague, qui a tendance à remplacer le fléchissement ;
- les variations de tension et de vitesse qui se traduisent par un angle de dragage incertain.

2.3.20.4 Les dragages dérivants et en route sont détaillés dans la publication « *Admiralty Manual of Hydrographic Surveying* », Volume 2, UK Hydrographic Office, 1969.

2.4 Tenue des cahiers d'observations et constitution des divers dossiers

2.4.1 Explorations au sondeur latéral

2.4.1.1 Cette section a trait à la tenue des cahiers d'observations pour sonar latéral. L'hydrographe doit veiller scrupuleusement à la cohérence des enregistrements.

2.4.1.2 La tenue des cahiers d'observations varie d'un navire à l'autre en fonction des équipements d'enregistrement des données utilisés et des préférences de l'hydrographe de quart. Il est recommandé toutefois de noter les informations suivantes afin d'interpréter le sonar latéral:

- date et heure ;
- vitesse-fond ;
- route prévue et route suivie ;
- cap du navire ;
- longueur de câble filé ;
- remarques, y compris état de la mer.

2.4.1.3 Journal des contacts. C'est le registre principal pour tous les contacts obtenus par sonar latéral. Les informations suivantes doivent être notées pour chaque contact :

- référence du sonogramme et des enregistrements associés (ou leurs équivalents numériques) ;
- date et heure ;
- numéro du contact ;
- détails du positionnement ;
- côté de la détection (bâbord/tribord) ;
- pente du fond ;
- écart longitudinal (le *layback* du § 2.3.11.1) ;
- hauteur du poisson au-dessus du fond ;
- caractéristiques du contact (ombre, diaphonie, intensité, classification initiale) ;
- actions à prévoir (investigation, resserrement des profils, *quick look*, rien, etc.) ;
- actions réalisées (classification finale, référence aux enregistrements associés, etc.).

2.4.1.4 Tout évènement marqué par un top simultané sur le sonogramme et la bande de sonde doit recevoir un titre complet. Gardant à l'esprit que le sonogramme et le cahier d'observations sont archivés séparément, on notera suffisamment d'informations sur le cahier pour pouvoir l'utiliser seul lors de la phase d'analyse et de vérification.

2.4.2 Dossiers d'épaves

2.4.2.1 Le traitement précis des dossiers d'épaves est une tâche de longue haleine, mais l'établissement d'une procédure fiable au départ permet plus tard de faire l'économie de confusions et d'erreurs. La position et les détails des épaves individuelles peuvent apparaître sur plusieurs documents dont on doit s'assurer qu'ils sont cohérents et corrects.

2.4.2.2 L'hydrographe doit s'assurer que les actions suivantes ont bien été exécutées :

- enregistrement et archivage systématiquement de tous les registres ;
- investigation dans l'ordre de tous les échos ;
- complétage des dossiers d'épaves ;
- enregistrement de toutes les épaves sur les registres et sur les minutes ;
- contrôle de cohérence des positions et de tous les détails.

2.4.2.3 Les informations relatives aux épaves peuvent apparaître sur les documents suivants* :

- minutes B ou SMF (bathymétrie ou sondeur multifaisceaux) ou leurs équivalents numériques ;
- mosaïques sonar latéral (MOSA) ou leurs équivalents numériques ;
- minutes N (nature de fond) ;
- minutes R (recherche) ;
- sonogrammes et bandes de sonde annotées (ou leurs équivalents numériques) ;
- cartes renseignées ;
- rapports particuliers.

2.4.2.4 Positionnement précis des épaves : les positions des épaves dans tous les documents doivent être cohérentes ; à cette fin, la procédure suivante est recommandée :

- rechercher la position correspondant au meilleur passage à la verticale ou au graphique établi lors de l'investigation de l'épave ; la convertir en latitude et longitude ;
- porter cette position sur la minute de construction, sur la mosaïque du sonar latéral et sur les minutes N, R, B et/ou SMF ;
- noter cette position dans le rapport particulier.

2.4.2.5 Les minutes définitives doivent comporter à leurs positions les profondeurs moindres des épaves détectées. S'il n'a pas été possible d'investiguer complètement une épave, celle-ci sera entourée d'un cercle rouge accompagné de la légende « Ep (NFS) »[†]. Il est important de ne porter aucune profondeur dans ce cercle car elle pourrait être interprétée ultérieurement comme une profondeur moindre.

2.4.2.6 Les minutes doivent comporter la position de chaque épave en utilisant les symboles appropriés de la publication INT 1.

2.4.2.7 Chaque épave ou obstruction listée sera accompagnée d'enregistrements caractéristiques du sondeur et du sonar latéral illustrant l'objet (ou copies d'écran si ces instruments n'ont pas de sortie papier). Les tracés comporteront la date et l'heure, la route et la vitesse-fond du navire et, dans le cas du sonar latéral, la distance du poisson à la position observée. La profondeur moindre observée ou calculée sera également mentionnée.

2.4.2.8 Il convient de fournir le plus de détails possibles et notamment :

- la position où l'épave a été localisée et le système géodésique du levé ;

* NdT : Les lettres-repères utilisées sont celles en usage dans les missions hydrographiques françaises (cf Norme SHOM relative à la rédaction des minutes de levé – version V1.1 du 2009/03/09)

† NdT : NFS (*not fully searched*). Cette abréviation n'est pas dans l'ouvrage 1D-INT1, à jour de la modification 2010/10/21.

- le point retenu, en indiquant les corrections appliquées ;
- la profondeur moindre, la méthode d'observation, son caractère définitif ou non, la différence avec la carte et la raison de l'écart, dans le cas d'une hauteur calculée à partir d'une ombre acoustique, la moyenne obtenue sur deux directions opposées ;
- les dimensions et l'orientation approximatives, avec toute preuve (par exemple le rapport de plongée) relative à l'identité et à l'état de l'épave;
- les détails relatifs à la réduction de la marée ;
- les remarques générales : corrélation avec les épaves environnantes ou listées, présence éventuelle et taille des souilles, profondeurs moyennes et nature du fond.

2.4.3 Exploration au sonar de coque

2.4.3.1 Chaque fois qu'un sonar de coque est utilisé pendant un levé, il faut préparer un tracé à la même échelle que la minute bathymétrique pour y porter les données suivantes :

- la trajectoire du bateau pendant l'exploration ;
- les limites de la zone explorée ;
- les limites des zones ayant fait l'objet d'investigations approfondies (sans trajectoires) ;
- les positions et les numéros d'identification de toutes les épaves et obstructions localisées pendant le levé ;
- les positions et les numéros d'identification de toutes les épaves et relèvements de fonds listés dans le rapport particulier.

2.4.3.2 Quand un sonar de coque est utilisé conjointement avec le sonar latéral, le tracé doit également inclure :

- les zones comportant de nombreux échos ;
- tous les contacts nets et leurs azimuts/distances de détection (les contacts transitoires ne doivent pas être représentés) ;
- la qualité des contacts, leur classification et s'ils ont été investigués ou non.

2.4.3.3 Toutes les positions des contacts et des épaves doivent être soigneusement vérifiées sur tous les autres tracés, formes et rapports. Les symboles suivants seront utilisés* :

épave -	Wk
épave, non complètement recherchée -	Wk (NFS)
épave possible -	Wk (U) (voir note)
fond -	B
bon écho du fond -	g
assez bon écho du fond -	f
épave draguée -	Wk

Note : Lorsqu'il n'est pas possible de confirmer qu'un écho est une épave, bien qu'il s'agisse vraisemblablement d'une « épave possible », la qualification supplémentaire « (U) » (*unexamined* / non examiné) doit être utilisée pour indiquer que l'investigation n'a

* NdT : ces abréviations ne figurent généralement pas dans l'ouvrage 1D-INT1, à jour de la modification 2010/10/21.

pas été concluante. La classification « (U) » sera aussi utilisée quand un contact n'a pas été du tout examiné. Les échos classés « Wk (U) » doivent être listés avec les épaves.

- 2.4.3.4 Route du navire et points : lorsque les profils sonar diffèrent de ceux du levé régulier, on portera un nombre suffisant de points sous forme abrégée, sauf en fin de profils.
- 2.4.3.5 Limites de la zone explorée : contour vert pour le sonar latéral, contour rouge pour le sonar de coque et contour bleu pour les recherches (avec résultats écrits à la main ou référence à un autre dossier).
- 2.4.3.6 Épaves listées : les épaves non dangereuses et leur numéro de référence sont écrits en noir.
- 2.4.3.7 Épaves localisées : cercle noir de 5 mm de diamètre.
- 2.4.3.8 Quand un sonar de coque a été utilisé seul, le contour doit entourer toute la zone explorée (idéalement sur un calque superposable à une carte à grande échelle ou à une carte topographique couvrant la zone). Ce contour doit pouvoir être combiné suffisamment clairement aux autres sources d'information par le cartographe pour qualifier les données.
- 2.4.3.9 Les tracés du sonar doivent contenir une symbolique claire et complète. De plus, les mosaïques du sonar latéral doivent contenir un tableau des spécifications d'utilisation, comprenant l'échelle, le mode (exploration ou recherche), l'angle de dépression du faisceau et la hauteur moyenne du poisson.
- 2.4.3.10 Quelques-unes des données requises ci-dessus peuvent être combinées avec d'autres tracés dans la mesure où cela ne nuit pas à la clarté du tracé existant.

3. CLASSIFICATION DES FONDS

3.1 Historique

- 3.1.1 La classification des fonds vise à répondre aux triples demandes de la carte marine, des considérations économiques et environnementales et du besoin militaire.
 - 3.1.1.1 Carte marine : une méthode de classification relativement simple basée sur la nature des fonds est utilisée pour les cartes marines et pour les besoins de la navigation. Une liste de classifications est dans l'ouvrage INT 1. Le navigateur a besoin de cette information pour :
 - choisir un mouillage ;
 - déterminer la tenue du fond et la longueur de chaîne à utiliser ;
 - apprécier la sécurité du mouillage ;
 - disposer d'un moyen de contrôle supplémentaire de la navigation.
 - 3.1.1.2 Considérations économiques et environnementales : Une classification plus détaillée, habituellement obtenue en utilisant des logiciels sur étagère est utilisé par :
 - l'ingénierie *offshore*, par exemple pour la mise en place de plateformes pétrolières, de marques de balisage ou d'ouvrages de protection du littoral ;
 - la prospection minière ;
 - la pêche, etc.
 - 3.1.1.3 Besoin militaire. La classification combine quatre types de base de nature de fonds avec des données supplémentaires détaillées et spécifiques et des attributs. Les militaires ont besoin de cette information pour :

- les opérations amphibies ;
- les contre-mesures de guerre des mines, consistant à sélectionner les zones d'opération en évitant celles dont la topographie est défavorable ;
- les opérations sous-marines et anti-sous-marines, par ex. la sélection des zones sécurisées à l'intérieur desquelles les sous-marins peuvent se poser sur le fond ;
- apprécier les performances acoustiques des sonars.

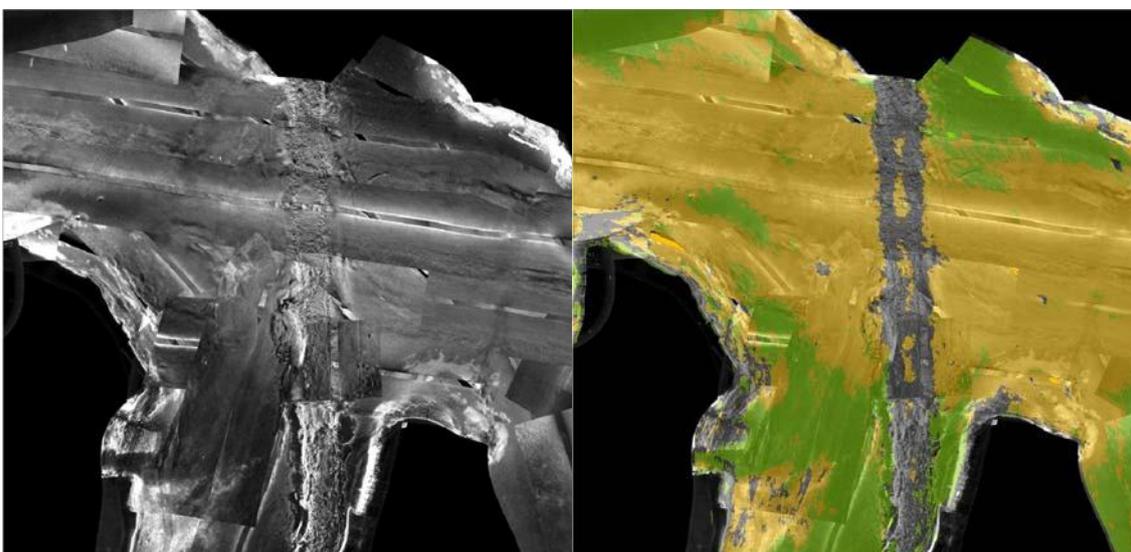
3.1.1.4 A l'avenir, les informations sur la classification militaire des fonds seront distribuées aux commandements et aux forces sous forme d'AML (*Additional Military Layers*, ou couches militaires additionnelles) utilisables par les SIG intégrés et les systèmes de combat.

3.1.2 Modèles de classification des fonds

3.1.2.1 L'information prend normalement la forme de modèles de classification tels que représentés à la figure 4.8. Associées à des symboles et à du texte, les données sont issues du sondeur vertical, du SMF, du sonar latéral et des prélèvements *in situ*. Les informations portées sur les minutes définitives doivent être claires et précises.

3.1.2.2 Les informations suivantes figureront dans les modèles de classification des fonds :

- nature du fond établie à partir des prélèvements ;
- texture du fond déduite à partir des sondeurs, du sonar latéral, etc. ;
- contacts et détails du fond (c.-à-d. épaves, dunes de sable, traces de chalutage...) ;
- isobathes.



**Fig. 4.8 « Exemple de mosaïque de sondeur latéral et de modèle de classification »
(établie à partir du logiciel *QinetiQ's Classphi™*)**

3.1.2.3 Exemples d'enregistrements de sonars de coque : les problèmes d'identification des épaves par les sonars de coque sont bien connus des hydrographes et n'auront pas besoin d'explications supplémentaires. Des exemples d'enregistrements utilisables en classification des fonds peuvent être trouvés dans l'atlas « *Sonographs of the sea floor* » de Belderson, Kenyon, Stride et Stubbs (Elsevier).

3.1.3 Prélèvements de fond

- 3.1.3.1 Par fonds de moins de 200 m, la nature du fond sera déterminée par prélèvements :
- pour aider à interpréter les enregistrements du sonar latéral ;
 - pour fournir une vérité-fond aux modèles de classification ;
 - dans toutes les zones de mouillages possibles ;
 - sur tous les bancs, hauts-fonds et monts sous-marins, en particulier s'ils sont instables, et dans les chenaux qui les séparent ;
 - au sommet et à la base des monts sous-marins, par fonds de plus de 200 m, si les profondeurs sont accessibles et que les moyens de prélèvements sont appropriés.
- 3.1.3.2 De plus, la nature du fond sera répartie à intervalles réguliers sur l'ensemble de la zone du levé. La fréquence d'échantillonnage variera selon la profondeur et l'étendue des plages de natures homogènes ; elle sera comprise entre 1,0 et 1,7 km par fonds de moins de 200 m.
- 3.1.3.3 La nature du fond obtenue par prélèvements sera incluse dans le modèle de classification. La corrélation entre les prélèvements et la texture dérivée des enregistrements du sonar est très importante; elle fournit la seule référence permettant de qualifier l'interprétation. Les échantillons de fond doivent satisfaire aux trois conditions suivantes :
- être complets - les échantillonneurs utilisés navire-en-route ont tendance à perdre une partie de leurs contenu lors de la récupération ;
 - provenir d'un lieu ponctuel - les échantillonneurs navire-en-route peuvent racler le fond sur plusieurs centaines de mètres et sont impropres à de tels prélèvements ;
 - être positionnés précisément - les positions doivent être aussi précises que pour les autres données du levé ; elles doivent être observées à l'instant du contact avec le fond.
- 3.1.3.4 Pour satisfaire aux conditions précitées, les échantillons sont prélevés à la benne ou au carottier, navire stoppé. La position est fournie par le moyen de localisation principal (ou par un moyen de précision comparable). Les prélèvements sont représentés sur le modèle de classification par un point entouré d'un cercle associé au symbole de nature du fond.

3.1.4 Nature du fond

- 3.1.4.1 Le fond est constitué de roches de différentes natures, généralement recouvertes de sédiments meubles provenant de deux sources principales :
- matières lessivées à partir de la côte ou issues de l'érosion du fond lui-même ;
 - sédiments d'origine biogénique, constitués d'animaux et de végétaux en décomposition dans les bassins océaniques.

3.1.5 Classification des échantillons

- 3.1.5.1 La classification décrit l'échantillon au moyen d'une double entrée :
- un adjectif qualificatif, tel que « grossier », « petit », etc.;
 - une description générale, telle que « roche », « vase », etc.
- 3.1.5.2 Échantillons composés : la plupart des sédiments naturels sont constitués de matériaux mélangés. Quand c'est le cas, la nature dominante est indiquée en premier, par exemple « *fSbkSh* » indiquera qu'il y a plus de sable dans l'échantillon que de coquille brisée.

3.1.5.3 Classement granulométrique : les fonds sont classés comme suit :

Description générale	Nom	Dimensions (mm)	Remarques	
Vase	<i>M</i>	Argile	<0,002	Une fois séchée sur la main, la vase ne s'enlève pas facilement
		Limon	0,002-0,063	Une fois séché sur la main, le limon s'enlève facilement
Sable	<i>fS</i>	Sable très fin	0,063-0,125	
		Sable fin	0,125-0,250	
	<i>mS</i>	Sable moyen	0,250-0,50	
	<i>cS</i>	Sable grossier	0,50-1,0	
		Sable très grossier	1,0-2,0	
Gravier	<i>smG</i>	Gravier	2,0-4,0	Taille comprise entre une mine de crayon et un petit pois très fin
	<i>P</i>	Galets, cailloux	4,0-64,0	Taille comprise entre un petit pois très fin et un poing fermé
	<i>IG</i>	Gros galets	64,0-256,0	Taille comprise entre un poing fermé et une tête d'homme
Roche	<i>R</i>	Bloc de pierre	>256,0	Plus grand qu'une tête d'homme
		Roche		

Tableau 4.5 « Classement granulométrique des fonds »

(d'après les instructions d'assurance qualité pour les levés hydrographiques du SH du RU)

3.1.5.4 La dimension du grain peut être déterminée visuellement ou par utilisation d'un calibre (*grain-size comparator disc*). Les sédiments les plus fins sont les plus difficiles à classer. Si la dimension ne peut pas être classée visuellement ou par calibrage, l'échantillon peut être placé entre les dents. S'il semble granuleux, c'est un limon; s'il est lisse et butyreux, c'est de l'argile. Il est extrêmement difficile d'estimer les pourcentages relatifs quand les échantillons contiennent du sable, du limon et de l'argile.

3.1.5.5 Roches : Un échantillon ne doit être classé comme « roche » que s'il y a une preuve à l'appui. Si l'information provient d'une éraflure, d'une échancrure ou d'une détérioration du carottier, se contenter de l'abréviation « *h* » (dur / *hard*).

3.1.5.6 Autres descriptions : lorsque d'autres caractéristiques peuvent être identifiées ou que le type de fond peut être caractérisé par un matériau distinct, les différentes références doivent être consultées pour aider à la classification.

3.1.6 Méthodes d'échantillonnage du fond

3.1.6.1 Les prélèvements sont réalisés par des moyens variés dont les plus connus sont :

- le plomb suiffé ;
- la benne preneuse ;
- la pelle ;
- le carottier ;
- la drague ;
- le plongeur ;
- le ROV ;
- le prélèvement occasionnel (par exemple en relevant l'ancre).

- 3.1.6.2 Le choix et l'utilisation de l'appareil de prélèvement dépendent de la nature de l'investigation, du caractère du fond, de la profondeur de l'eau et du treuil disponible à bord pour la descente et la récupération de l'instrument.
- 3.1.6.3 Plomb suiffé : le plomb de sonde est une méthode traditionnelle pour recueillir une information sur la nature du fond. Il ne peut donner aucune idée de l'épaisseur de la couche superficielle ni du substrat. La base du plomb est enduite de suif ou d'une substance collante telle que de la gelée de pétrole ou de la graisse à laquelle les particules de sédiment adhèrent. Quand le fond est couvert d'objets plus grands tels que des galets ou des roches, on peut avoir une idée de sa nature mais celle-ci n'est pas garantie.
- 3.1.6.4 Les avantages du plomb de sonde sont son faible coût et sa facilité de maniement ; ses inconvénients sont que :
- les gros objets ne peuvent pas être détectés (par exemple les galets) ;
 - seule la couche superficielle est prélevée ;
 - l'échantillonnage est d'autant moins fiable que la profondeur augmente ;
 - l'échantillon est contaminé par la substance adhésive ;
 - les matériaux sont remaniés lors du prélèvement.
- 3.1.6.5 Bennes, pelles et pinces : elles sont utilisées pour collecter des échantillons de moyenne dimension de la couche superficielle et de la couche située immédiatement en dessous. Elles sont constituées normalement d'une benne ou d'une écope actionnées au contact du fond. Certains dispositifs sont munis d'un ressort, d'autres se referment quand ils quittent le fond. Les bennes sont rarement adaptées aux échantillons de vase douce ou liquide car celle-ci ne supporte pas la remontée de l'échantillon vers la surface.
- 3.1.6.6 Benne Shipek : la benne Shipek consiste en deux demi-cylindres concentriques; le demi-cylindre intérieur, ou écope, est maintenu ouvert par un cliquet. En heurtant le fond, le cliquet libère la tension de deux puissants ressorts axiaux qui font pivoter l'écope de 180°, lui permettant de ramasser un échantillon qui reste enfermé dans le cylindre pendant la remontée. La benne Shipek est très efficace pour les sédiments meubles et non consolidés ; il lui arrive de rebondir sur un fond compact, auquel cas, lors de la fermeture de l'écope, celle-ci ne prélève qu'un échantillon superficiel ou rien du tout. Les meilleurs résultats sont alors obtenus en réduisant la vitesse d'impact de la benne sur le fond.
- 3.1.6.7 Carottiers : ils sont utilisés pour prélever une section verticale non remaniée du fond. Ils pénètrent souvent à des distances importantes sous le fond. Les carottiers sont constitués habituellement d'un tube ou d'un étui à bord tranchant ressemblant à un vide-pomme ou à un ustensile de découpage de pâtisserie. Ils pénètrent dans le fond et quand ils sont remontés, ils contiennent une carotte non remaniée des strates du sédiment.
- 3.1.6.8 Les mécanismes de retenue de la carotte peuvent prendre la forme d'un vide à l'arrière de l'échantillon ou de clapets et de vannes, ou d'une combinaison de ces diverses méthodes. Les carottiers peuvent être enfoncés dans le fond sous l'effet de leur propre poids, d'explosifs, de systèmes pneumatiques ou par vibrations mécaniques.
- 3.1.6.9 Dragues : les dragues sont conçues pour être tractées sur le fond afin de collecter les matériaux et sédiments meubles et sont souvent munies d'un filtre qui ne laisse passer que les sédiments fins. Les échantillons sont toujours remaniés mais reflètent la composition superficielle du fond sur une assez grande étendue. Les dragues peuvent être déployées à n'importe quelle profondeur.
- 3.1.6.10 Autres méthodes de prélèvements
- Plongeurs : une exploration par plongeurs apporte une excellente description du fond. Les grands objets aussi bien que les petits peuvent être identifiés. Les plongeurs sont limités par

la profondeur à laquelle ils peuvent plonger mais, dans les eaux peu profondes et si le temps l'autorise, c'est une bonne méthode pour obtenir des échantillons.

Véhicules sous-marins inhabités (UUV) : Les UUV peuvent aider à la classification du fond en recueillant des échantillons (habituellement avec une écope ou une benne) ou en obtenant des images vidéo pour une visite ultérieure. Les UUV sont équipés de plus en plus souvent de sondeur monofaisceau, de SMF et de sonar latéral et peuvent acquérir les mêmes données que les navires de surface.

Échantillonnages occasionnels : des échantillons utiles peuvent être également recueillis sur les câbles, ancres et mouillages de bouées. Ces échantillons doivent être utilisés avec circonspection car seuls les matériaux adhésifs résistent à la remontée en surface.

3.1.7 Cahiers d'enregistrement des natures de fond

3.1.7.1 Enregistrement des échantillons : les données doivent être formatées en vue de faciliter leur archivage et de les rendre accessibles aux autorités intéressées. Le rapport particulier doit contenir tous les détails sur les méthodes de prélèvements utilisées pendant le levé et sur les problèmes rencontrés.

3.1.7.2 La position et la classification des prélèvements doivent être représentées sur une minute N (nature de fond) ou dans un équivalent numérique associé aux données bathymétriques.

3.2 Classification des senseurs

3.2.1 Cette section décrit les différents senseurs utilisés pour la classification des fonds.

3.2.1.1 Sondeur latéral : outre la localisation des épaves et des obstructions entre profils du levé, le sonar latéral fournit aussi un bon nombre d'informations sur le fond. Combinées avec les prélèvements de fond et les isobathes, ces données sont de grande valeur pour l'établissement d'un modèle de classification des fonds. Ces informations ont pris une telle importance au fil des années que dans de nombreux levés, le sondeur latéral plutôt que la bathymétrie décide de la direction et de l'espacement des profils, aussi convient-il de préparer et de vérifier les tracés avec soin si on veut en réaliser tout le potentiel.

3.2.1.2 Sondeur multifaisceaux : le SMF est utilisé en hydrographie non pas seulement pour ses capacités de couverture bathymétrique plus grandes que par le passé, mais aussi pour ses performances en matière d'identification rapide et efficace des types de fonds et de sédiments. L'hydrographe est désormais capable d'interpréter les signaux rétrodiffusés des systèmes à balayage parallèlement aux images du sondeur latéral. L'exploitation des rétrodiffusions du SMF, en complément au recueil des données bathymétriques, permet de conduire les levés plus efficacement en termes de coûts et de durée.

3.2.1.3 Sondeur monofaisceau : des logiciels commerciaux de classification des fonds adaptés aux sondeurs monofaisceaux sont disponibles depuis quelques années. Un de ces systèmes, le RoxAnn, utilisé notamment par les pêcheurs professionnels, est décrit plus loin au § 3.3.6.

3.2.1.4 Autres senseurs offrant un potentiel de classification des fonds :

- Sondeurs lasers aéroportés (lidar). Des recherches se poursuivent pour extraire du signal laser réfléchi des informations autres que la bathymétrie, telles que la turbidité et la classification du fond.
- Bathymétrie électromagnétique aéroportée. Les systèmes AEMB offrent un tel potentiel, mais celui-ci n'a pas encore été exploité.
- Télédétection. Des informations sur la classification des fonds dans les eaux peu profondes peuvent être obtenues à partir de l'imagerie satellitale* et des photographies

* NdT : cf. spatiocartes marines développées par le SHOM et largement utilisée dans le Pacifique sud.

aériennes, mais elles nécessitent de disposer d'une vérité-terrain.

- Sonars à vision vers l'avant (FLS). Conçus purement pour la navigation et la prévention des abordages en mer, les FLS ont connu des développements récents offrant une capacité bathymétrique et de classification des fonds. Par exemple, le sonar « Pétrel » de Thalès adapte l'énergie du signal acoustique de retour au niveau de bruit ambiant et à l'angle d'incidence du faisceau pour fournir une interprétation qualitative de la réverbération sensible aux variations de densité, de composition des sols et de porosité du fond. En comparant cette interprétation qualitative à la vérité-terrain, on dispose parallèlement à la bathymétrie d'une capacité de classification des fonds en temps réel.

3.3 Aspects théoriques de la classification au moyen des différents senseurs

3.3.1 Introduction au recueil et à l'interprétation des informations de rétrodiffusion

Cette section compare les avantages et les inconvénients du SMF et du sonar latéral. Elle évoque aussi les méthodes utilisées par le SMF pour supprimer les distorsions causées par l'angle d'incidence des faisceaux et par les autres causes.

3.3.1.1 Le sonar latéral et la plupart des SMF affichent une représentation du fond basé sur le principe de l'imagerie acoustique. La plupart des images du sonar latéral sont des représentations relativement peu évoluées des pings dans la mesure où l'image n'est corrigée que d'un nombre limité de paramètres mesurables. Par exemple, les récepteurs des sonars latéraux modernes ne disposent généralement que de la capacité à compenser la vitesse du navire afin d'ajuster l'axe longitudinal des enregistrements pour obtenir une même échelle dans toutes les directions. Ils peuvent aussi mesurer la hauteur du poisson au-dessus du fond et supprimer la partie correspondante de l'image afin que celle-ci ne commence qu'à l'aplomb du poisson et couvre toute la fauchée. Ils peuvent enfin corriger l'image de telle sorte que la distance mesurée sur l'enregistrement soit proportionnelle à la distance sur le fond, mais ceci n'est réalisé qu'en supposant que le fond est plat. Comme ce n'est généralement pas le cas, il en résulte des distorsions de l'image.

3.3.1.2 D'autre part, les informations relatives à la rétrodiffusion ne sont qu'un sous-produit de l'acquisition des données bathymétriques par le SMF. Celles-ci sont de même nature que les sorties du sonar latéral et offrent une représentation du fond qui est fonction de l'intensité de l'écho. La différence entre les deux est que le SMF mesure simultanément la profondeur et la rétrodiffusion ce qui permet un niveau de traitement plus sophistiqué. Les données de profondeur combinées aux angles d'incidence du faisceau fournissent la position exacte du fond à laquelle les informations contenues dans la rétrodiffusion sont reliées et par conséquent, une correction géométrique vraie de l'image du signal de retour.

3.3.2 Traitement du signal de retour (rétrodiffusion)

3.3.2.1 Le traitement de la rétrodiffusion du SMF est une mosaïque qui couvre le fond et affiche l'intensité du signal de retour en regard de la profondeur et de la position en chaque point. Un suivi correct des profils garantit une couverture bathymétrique de 100% mais la couverture de la rétrodiffusion peut être plus étendue encore si les faisceaux externes ont été invalidés du fait de leur imprécision. L'information correspondante n'est pas utilisée car elle ne peut pas être associée à des sondes, mais elle reste quand même disponible.

3.3.2.2 Un certain post-traitement aura permis de corriger l'image de la rétrodiffusion des effets de distorsion du signal original. Les corrections dépendent de la portée (corrections d'atténuation et de dispersion du faisceau), de la puissance de la source (laquelle est enregistrée avec l'information sur l'écho) et de la directivité du faisceau – transmis et reçu – quand elle varie avec le temps. De plus, il y aura des corrections à appliquer qui dépendent du trajet du signal et de la région insonifiée, à savoir les corrections d'incidence, de trajet du faisceau et de pente du fond qui peuvent être regroupées avec l'angle rasant sous lequel le signal touche le fond. La figure 4.9 représente des exemples de puissances rétrodiffusées pour différents types de fonds et angles rasants.

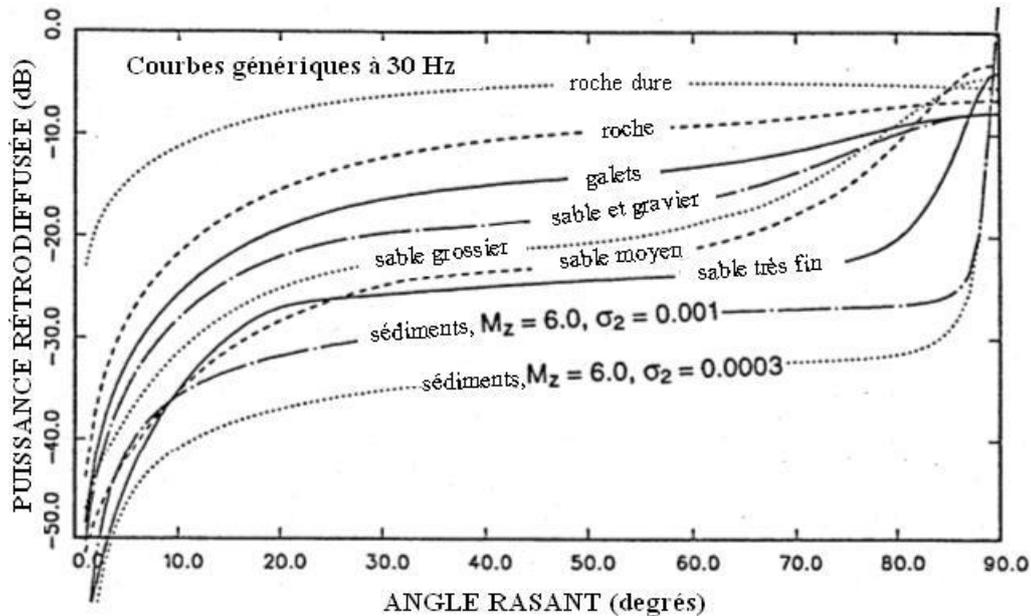


Fig. 4.9 « Puissance rétrodiffusée en fonction de la nature du fond et des angles rasants »
 (source : « *High Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook* » - octobre 1994)

3.3.3 Référencement de la fonction imagerie du SMF

- 3.3.3.1 La correction de positionnement du signal de retour est appelée référencement de la fonction imagerie du SMF*. Elle est calculée à partir des temps de parcours obliques et des positions vraies sur le fond et permet d'accéder à la distance vraie séparant le point situé à l'aplomb du transducteur jusqu'à l'empreinte sur le fond.
- 3.3.3.2 Comme mentionné auparavant, les méthodes utilisées pour le traitement des images du sonar latéral sont assez rustiques, mais en leur ajoutant les informations issues du SMF, du célérimètre et de la centrale d'attitude du navire, on aboutit à des corrections plus précises. Une grande partie du calcul a déjà été effectuée pour corriger les sondes du SMF et l'information correspondante peut parfois être appliquée aux images du sondeur latéral.

3.3.4 Mosaïquage

- 3.3.4.1 La transformation de la fonction imagerie du SMF en image raster (matricielle) s'appelle mosaïquage. La position de l'image est corrigée des mouvements du navire, mais le mosaïquage peut présenter ses propres problèmes. Avec certains SMF, le faible angle solide des faisceaux centraux peut en effet générer des trous de couverture entre chaque empreinte or, le but de l'imagerie est de produire une image raster régulière qui permette de comparer les empreintes entre elles et les trous de couverture peuvent rendre cette tâche difficile. Il convient alors de boucher ces trous par interpolation.
- 3.3.4.2 Si la couverture dépasse 100% et qu'il y a recouvrement, il est possible de recueillir de mêmes données sous différents angles d'insonification. Plutôt que d'essayer de les combiner, on ne gardera que les données du meilleur faisceau et on supprimera les autres. Il y aura inévitablement des discontinuités en bordure de fauchées mais la méthode précitée les minimise. Il existe plusieurs méthodes de sélection automatique, consistant par exemple à choisir les faisceaux moyens plutôt que les faisceaux centraux et extrêmes.
- 3.3.4.3 L'interprétation de l'image du signal de retour dépend par conséquent de la connaissance des données traitées par le SMF et de sa façon de les représenter. Certains systèmes ont la

* NdT : Le terme anglais applicable à l'image rétrodiffusée du SMF est *Side Scan Registration*. Il n'a pas d'équivalent en français, sans doute pour éviter la confusion avec le sondeur latéral.

capacité de retenir des informations sur la distribution de données au sein d'un faisceau et donc, des détails plus petits que l'empreinte elle-même. D'autres systèmes utilisent un ensemble de données réduit et ne retiennent, par exemple, que la moyenne ou l'intensité maximum de chaque faisceau, ce qui fournit moins de détails. La figure 4.10 montre que la bathymétrie seule ne fournit pas les mêmes informations sur le changement de type de fond que la mosaïque établie à partir du traitement du signal rétrodiffusé.

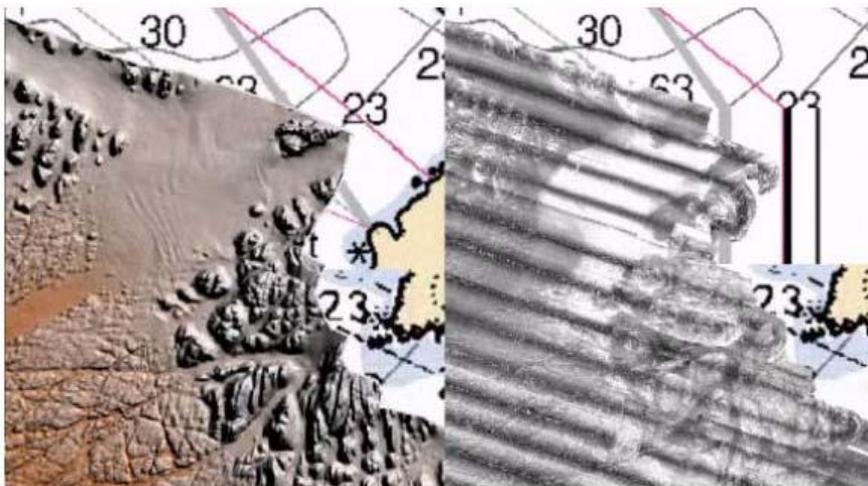


Fig. 4.10 « Images bathymétrique du fond (à gauche) et mosaïque (à droite) »

3.3.5 Remarques sur la classification

- 3.3.5.1 La forme et les caractéristiques des signaux de retour ne sont pas seulement déterminées par l'impédance acoustique. La classification des fonds peut aussi être influencée par la rugosité, notamment quand les détails du fond sont plus petits que l'empreinte du faisceau.
- 3.3.5.2 La seule façon de tenir vraiment compte des différents effets est d'avoir une connaissance *a priori* du fond et ceci n'est possible que si celui-ci a été échantillonné au préalable. Les types de fond ont des caractéristiques différentes, aussi la rétrodiffusion sera-t-elle utilisée pour contribuer à la classification générale. Si les différents signaux retour sont référencés convenablement par rapport aux données du fond, alors une « bibliothèque » de signaux pourra être élaborée en vue d'une classification automatique. Cette bibliothèque pourra être complexe et comprendre autant de zones que nécessaire, caractérisées chacune par un couple rugosité/dureté donné. Il existe différents logiciels répondant à ce besoin, et qui utilisent vraisemblablement chacun leur propre méthode.
- 3.3.5.3 La classification des fonds à l'aide des images acoustiques est un domaine qui évolue très rapidement. Les développements initiaux furent réalisés avec les sondeurs verticaux où les indications sur le type du fond étaient fournies par analyse du signal retour, de sa variation d'intensité dans le temps et de la répartition graphique des fréquences.
- 3.3.5.4 Les besoins de classification des fonds dépendent de l'utilisation finale de l'information et réciproquement, les paramètres utilisés pour décrire les fonds dépendent de la classification requise. Ces paramètres empruntent à l'hydrographie classique sa terminologie et les fonds sont classés, tantôt en fonction de leur granularité, de leur texture et de leur type, tantôt en fonction de leurs propriétés physiques ou acoustiques significatives au regard d'une utilisation envisagée telle que la pose de pipelines, la guerre des mines, la lutte anti-sous-marine ou l'océanographie. Les classifications des fonds englobent :
- les types de sédiment qui les composent caractérisés par :
 - leurs constituants minéraux, ex : cendre, argile, silicates, carbonates;
 - leur granularité et leur texture, ex : sable, limon, argile, gravier ;

- leur origine, ex : biogénique, terrigène ;
- leurs propriétés acoustiques, ex : vitesse du son, atténuation ;
- leurs propriétés physiques, ex : granularité, densité, et porosité ;
- leurs propriétés géotechniques, ex : force de cisaillement, élasticité ;
- leur morphologie, c.-à-d. leur texture et leur rugosité.

3.3.5.5 Plusieurs approches méthodologiques ont été développées pour classer les fonds à partir des propriétés du signal de retour. Pour la classification à distance, on s'intéresse aux modèles d'interaction du son avec le fond et aux effets de cette interaction sur la forme du signal. Un système de classification utilisant le sondeur vertical est le RoxAnn, développé par Marine Microsystems Ltd.

3.3.6 Le système RoxAnn

3.3.6.1 RoxAnn est un système commercial qui caractérise les fonds grâce au traitement du signal d'un sondeur vertical par une tête d'ampli comparant l'impédance du système à celle du sondeur. Le concept est basé sur l'observation des trajets multiples dans des régions de fond connus, mais différents. La classification des sédiments est réalisée par analyse des deux paramètres suivants (voir figure 4.11) :

- E 1 : énergie du premier retour, caractéristique de l'index de rugosité;
- E 2 : énergie du second retour, caractéristique de l'index de dureté.

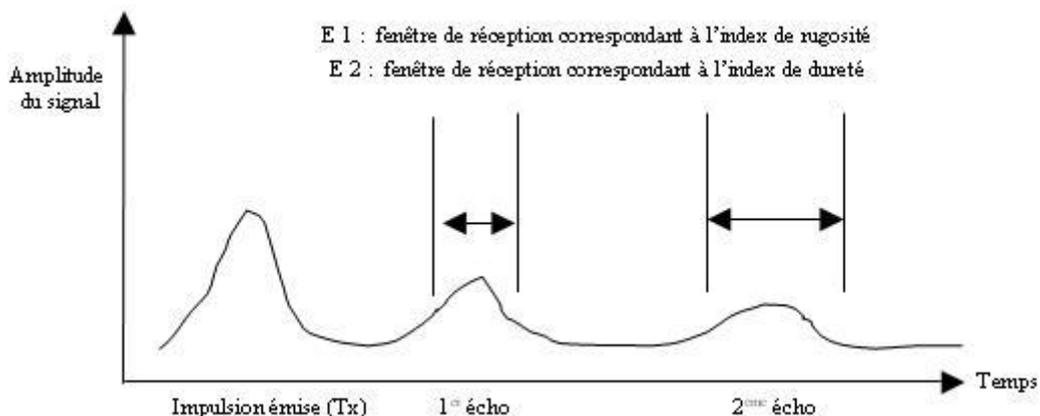


Fig. 4.11 « RoxAnn : quantification des index de rugosité (E 1) et de dureté (E 2) »

3.3.6.2 Il en ressort que, par utilisation d'un graphique représentant la rugosité en fonction de la dureté, on peut entrer dans le système une valeur vérifiée *in situ* afin de le caler en vue d'une classification automatique de la zone. Le système a besoin d'être calibré périodiquement quand on change de zone. La figure 4.12 montre la distribution de quelques types connus de fond en fonction de E 1 et E 2.

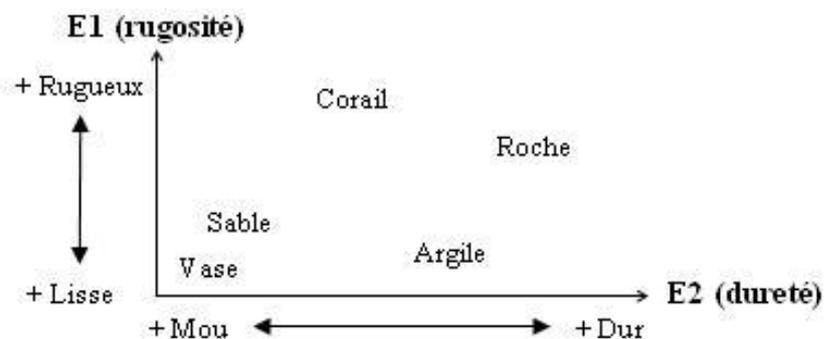


Fig. 4.12 « RoxAnn : exemples de classifications en fonction de E1 et E2 »

3.3.6.3 L'avantage du système est qu'il est relativement simple et peu coûteux. Ses inconvénients sont qu'il n'est pas quantitatif, qu'il doit être calibré et qu'il repose sur des trajets multiples, lesquels, par suite des réflexions en surface, sont dépendants de l'état de la mer.

3.3.7 Classification utilisant le sondeur multifaisceaux

3.3.7.1 Le SMF fournit les mesures géoréférencées instantanées de l'intensité du signal retour et des points du fond (sondes). Les deux sont utilisés, ensemble ou séparément, pour la classification du fond, habituellement sous forme de progiciels commerciaux conçus dans ce but. Pour les systèmes étalonnés ou pour lesquels un étalonnage relatif peut être réalisé, les mesures d'intensité de rétrodiffusion peuvent être réduites selon :

- la distance à l'objet (atténuation et dispersion sphérique);
- la puissance de la source et la directivité du faisceau (transmis et reçu);
- la zone insonifiée (angle du faisceau, trajet du rayon sonore réfléchi, pente du fond).

3.3.7.2 Il existe trois méthodes principales de classification des fonds par SMF, basées sur l'analyse de la variabilité de la forme de l'écho, à savoir :

- par modélisation texturale et analyse des spectres ;
- par la fonction de densité de probabilité maximale de l'amplitude de l'écho ;
- par les fonctions de dépendance angulaire du signal rétrodiffusé.

3.3.8 Modélisation texturale

3.3.8.1 Dans cette méthode, on considère la variation de l'intensité du signal rétrodiffusé comme étant une fonction dans l'espace à deux dimensions représentant les changements significatifs des caractéristiques des échos pour un et pour plusieurs pings consécutifs. Pour faire simple, c'est une image statistique 2D de l'amplitude de la rétrodiffusion par le fond.

3.3.8.2 Même sans calibration, il est facile de constater que les caractéristiques texturales des images d'un sonar latéral contiennent de l'information sur le fond. La plupart des premiers sonars latéraux furent développés pour la détection d'objets ; le but était d'utiliser toute la dynamique de représentation, généralement par enregistreur à papier humide ou console graphique, pour maximiser le contraste de l'écho. Pour cette raison, des contrôles automatiques de gain furent développés avec pour conséquence négative, la perte d'une partie des informations contenues dans le signal rétrodiffusé. Néanmoins, cette technique de traitement du signal était idéale pour faire ressortir les informations texturales dans l'imagerie. Ceci devint possible par l'introduction :

- des spectres de puissance ;
- des matrices de cooccurrence des niveaux de gris.

3.3.9 Spectres de puissance

3.3.9.1 La rétrodiffusion varie approximativement avec le \cos^2 de l'angle d'incidence (loi de Lambert) et ce, jusqu'aux rasances faibles. On peut supposer par conséquent que les variations d'amplitude des échos provenant de ce secteur angulaire sont des expressions de la rugosité inhérente de la surface réfléchissante. Ceci implique la possibilité de classer les retours et donc, de déduire le type du fond en se basant sur l'analyse de leur spectre.

3.3.9.2 Quand elle est appliquée au SMF, cette méthode doit être limitée au segment externe de la fauchée où la dépendance angulaire du signal de retour acoustique du fond se stabilise et

où la longueur de la région instantanément insonifiée est relativement constante transversalement. Dans la région des incidences proches de la verticale, la combinaison des rapports élevés de signal sur bruit, des changements rapides de dimensions des spots insonifiés et de la dépendance angulaire des signaux rétrodiffusés imposent des restrictions sévères à la supposition que la forme spectrale est représentative du type de fond.

- 3.3.9.3 De plus, parce que les séries successives des puissances rétrodiffusés obtenues pour une configuration du SMF sont en réalité des compositions de plusieurs faisceaux, il y a la possibilité d'introduire de l'énergie dans le spectre de puissance à des longueurs d'onde équivalentes à l'espacement des faisceaux.
- 3.3.9.4 La longueur d'impulsion de nombreux SMF pour petits fonds varie au fur et à mesure qu'on se déplace vers les eaux profondes. Ceci change la taille des zones insonifiées par un même ping et les échelles des spectres de puissance.

3.3.10 Matrices de cooccurrence des niveaux de gris (GLCM)

- 3.3.10.1 Pour identifier les limites des plages de même texture du sondeur latéral, on utilise la technique classique en traitement d'image des matrices de cooccurrence des niveaux de gris (*Grey Level Co-occurrence Matrix - GLCM*). Cette technique repose sur la corrélation des niveaux de gris dans l'espace 2D qui sont fonction de l'intensité du signal rétrodiffusé. La dynamique de l'image se situe entre les textures fines, caractérisées par des changements fréquents de niveaux de gris sur des distances courtes, et les textures grossières caractérisées par des changements peu fréquents sur des distances longues. Les matrices de cooccurrence sont calculées pour un ensemble de distances et d'angles dans l'espace 2D. Chaque GLCM correspond à une texture différente qui peut alors être interprétée comme un type de fond.

L'inconvénient de la méthode des GLCM est qu'elle doit être implantée sur une mosaïque qui est une image raster. Comme pour le sondeur latéral, les mosaïques des SMF sont des compromis entre la conservation de la résolution transversale de la rétrodiffusion et sa résolution longitudinale. Ce sont des versions moyennées (ou filtrées selon une valeur moyenne) des données brutes de l'intensité du signal. Elles ne peuvent pas avoir les mêmes caractéristiques statistiques que les données originales et par conséquent, les critères de classification ne sont applicables qu'aux données qui ont subi exactement la même transformation permettant de passer d'une série de données du sondeur latéral à un produit raster. De plus, il faut utiliser une vérité-terrain pour identifier le type du fond car il n'existe pas de modèle reliant les GLCM à des fonds de caractéristiques données et différentes lithologies (nature des couches) peuvent présenter les mêmes caractéristiques texturales.

3.3.11 Fonction de densité de probabilité maximale d'amplitude du signal rétrodiffusé

- 3.3.11.1 La fonction de densité de probabilité maximale (*Probability Density Function - FDP*) d'amplitude du signal rétrodiffusé est un processus de réverbération dont le comportement stochastique (statistique) est caractérisé par :
- une distribution gaussienne des échantillons en quadrature instantanée ;
 - une enveloppe (amplitude de l'écho) distribuée selon une fonction de densité de probabilité de Rice ;
 - et une phase régulièrement distribuée.

En se rappelant que les membres extrêmes d'une FDP de Rice ont une distribution gaussienne quand le signal de retour est globalement cohérent et une distribution de Rayleigh quand il est globalement dispersé, il est possible de déduire une mesure de la cohérence du signal à partir des statistiques de l'enveloppe. La figure 4.13 compare les

distributions de Rayleigh et de Gauss des probabilités d'amplitude d'un signal rétrodiffusé.

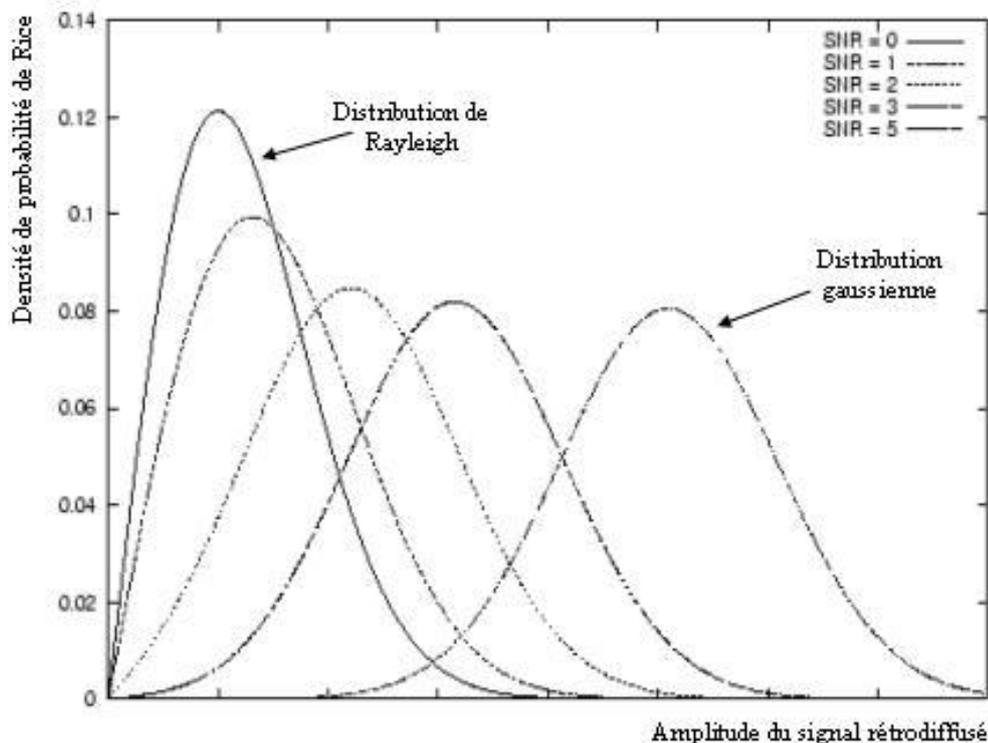


Fig. 4.13 « Distribution des probabilités d'amplitude d'un signal rétrodiffusé »

3.3.11.2 La moyenne et la variance des valeurs instantanées de l'amplitude sont des quantités dimensionnelles ce qui implique que le sonar retienne au moins les changements relatifs d'amplitudes du signal rétrodiffusé. Tout changement de configuration de la source et/ou du gain du récepteur peut être pris en compte (compensation pour le contrôle automatique de gain). Les données d'amplitude du ping rétrodiffusé présentées comme une valeur moyenne sont faciles à comprendre comme outil de classification. Une amplitude moyenne approximativement constante dans une zone donnée suggère une plage homogène tandis que de fortes variations sont des signes de changements de la nature du fond. Cependant, les représentations des changements localisés d'amplitude du signal rétrodiffusé ignorent généralement, ou essaient de normaliser empiriquement, les changements de la géométrie d'insonification (angles rasants) à travers la fauchée.

3.3.11.3 Cette adaptation de la FDP observée à des modèles standard est réalisée sur des FDP d'échos normalisés, ce qui a pour effet d'ignorer dans le processus l'amplitude moyenne absolue du signal rétrodiffusé. La méthode vise à grouper séparément les blocs de données cohérentes et incohérentes. Avec un sonar étalonné, l'étape normalisée peut être sautée et on peut utiliser directement les amplitudes absolues.

3.3.12 Expression de la force d'un signal rétrodiffusé en fonction de l'angle de rasance

3.3.12.1 Il existe plusieurs modèles de prédiction du signal rétrodiffusé en fonction de l'angle de rasance. Ceux-ci sont basés sur différents facteurs (paramètres générateurs) incluant le contraste d'impédance à l'interface sédiment / eau, les statistiques de rugosité de cette interface et les contributions possibles des inhomogénéités des couches du sédiment. La variable intéressante, dans cette méthode, est la force du signal rétrodiffusé par unité d'angle solide (3D). Elle est obtenue à partir des mesures et comparée aux modèles de

prédictions afin de parvenir à une estimation des paramètres générateurs.

- 3.3.12.2 Les systèmes à haute résolution tels que le SMF fournissent des mesures d'amplitude de la rétrodiffusion à des incidences variant de 90° (verticale) à moins de 15°. Ces valeurs contrastent avec la distribution des angles rasants des sondeurs latéraux de moindre résolution, qui sont remarqués près du fond et tendent à être biaisés aux faibles incidences.
- 3.3.12.3 Concurremment à cette méthode se trouve le besoin de connaître le trajet de l'onde sonore et la pente en 3D du fond qui l'a réfléchi. Ceci revient à attribuer à l'angle d'incidence une valeur instantanée d'amplitude du signal rétrodiffusé. Pour parvenir à une bonne évaluation de cette valeur, on procède à un grand nombre (>10) de mesures instantanées, en supposant évidemment que le fond examiné est constant le long de la fauchée du SMF (c.-à-d. que le type de fond est le même du nadir à l'extrémité de la portée).

3.3.13 Interprétation acoustique du signal rétrodiffusé

- 3.3.13.1 Tout d'abord, l'interprétation d'une image numérique de sondeur latéral est souvent difficile. À la limite de résolution, on retrouve l'échantillon instantané d'intensité du signal rétrodiffusé qui résulte d'une sommation complexe de toutes les réflexions individuelles de la région insonifiée incluant les réflexions de volume sur les sédiments sous-jacents. Malgré la solution dérivée, trois effets principaux restent perceptibles dans les mosaïques :
- la variation de puissance du signal rétrodiffusé due à un changement de texture de fond ;
 - la variation de puissance du signal rétrodiffusé due à un changement de pente du fond ;
 - les ombres acoustiques vraies.
- 3.3.13.2 Avec un sonar latéral conventionnel, les deux premiers effets sont ambigus car il est impossible de savoir si les variations sont dues à la pente ou à la texture. Dans la réalité il est rare d'observer un changement de pente significatif sans changement de texture. Contrairement aux sonars latéraux conventionnels, les SMF peuvent résoudre l'ambiguïté dans les cas où la longueur d'onde topographique est supérieure à l'espacement des faisceaux, mais la rugosité aux longueurs d'ondes plus courtes ne peut pas être résolue.
- 3.3.13.3 Les ombres portées sont reconnues par les deux systèmes pourvu que le rapport signal sur bruit soit suffisamment élevé ; elles se traduisent par une baisse de la force du signal plus grande que pour n'importe quel type de sédiment. Il est intéressant de noter que les SMF ne peuvent pas détecter d'ombres à partir de la seule information topographique, car une ombre est interprétée comme une pente plus forte que l'angle du faisceau et le SMF ne peut rien « voir » ; il est important de le savoir quand on exploite les faisceaux latéraux. Pour la même raison, une pente inclinée dans la direction opposée au SMF ne pourra pas être décrite facilement et le modèle de terrain sera déformé. Même avec les sonars à balayage, il n'est pas toujours évident de savoir si une variation à courte longueur d'onde du signal rétrodiffusé est le résultat de l'un ou l'autre des effets précités. La seule façon de lever l'ambiguïté est de croiser les profils dans des directions perpendiculaires.
- 3.3.13.4 L'hydrographe doit vérifier en priorité les dangers potentiels. Toute confirmation ou invalidation d'une anomalie bathymétrique constitue une aide à l'interprétation des données et accroît la confiance dans la qualité des sondages qui figureront sur les cartes marines. Comme on l'a vu, les images SMF ultrarapides ont une limite de résolution qui fait qu'il n'est pas toujours possible de résoudre ponctuellement les anomalies bathymétriques intéressantes. Cette considération conduit à la mise en oeuvre simultanée d'un sonar latéral remorqué et d'un sondeur à balayage.
- 3.3.13.5 Quand l'impulsion atteint le fond, une partie du signal est réfléchi sous forme d'un écho et le reste de l'énergie est dispersé dans toutes les directions ou même absorbé par le fond.

Les incidences verticales sont concernées principalement par les propriétés réfléchissantes du fond, et ici encore, les caractéristiques du faisceau du sondeur influent sur la quantité de signal réfléchi ; à cet égard, la fréquence du signal est l'un des facteurs les plus importants. Le cas du SMF est plus complexe et les propriétés de dispersion du fond sont prépondérantes.

- 3.3.13.6 Rétrodiffusion par un fond dur et lisse : pendant son trajet, l'onde sonore progresse en déplaçant des particules d'eau qui entrent en vibration. L'eau possède une faible impédance acoustique, c.à.d une faible résistance à la progression de l'onde sonore. Quand celle-ci atteint le fond qui a, lui, une impédance élevée, elle ne peut pas pénétrer. Les particules sont compressées et ne peuvent pas se déplacer facilement, mais comme l'énergie totale doit être conservée et qu'elle doit bien aller quelque part, l'onde sonore est réfléchie et un faible pourcentage de son énergie parvient au transducteur sous la forme d'un écho.
- 3.3.13.7 Influence des différents types de fond et angles d'incidences : les différents types de fond sont caractérisés par différents niveaux d'impédance acoustique. Si le niveau est bas, une partie de l'énergie sera absorbée et l'écho sera plus faible ; inversement, si le niveau est haut, la plus grande partie de l'énergie sera réfléchie. De même, l'intensité du signal réfléchi dépend de l'angle d'incidence. Si cet angle est voisin de 90°, une grande partie de l'onde sonore sera réfléchie vers le sonar. Inversement, si l'angle est petit, la majeure partie de l'énergie sera dispersée dans des directions éloignées du transducteur, quoi qu'une fraction d'onde sonore sera quand même réfléchie et perçue comme un écho faible.
- 3.3.13.8 Le type de fond aura aussi un effet sur le signal de retour, mais le rapport entre l'angle d'incidence, le type de fond et le niveau du signal de retour est complexe. Pour un faisceau à faible incidence, si le fond est rugueux, il y aura davantage d'éléments de surfaces réfléchissantes perpendiculaires à l'onde sonore et qui, par conséquent, donneront une réflexion plus forte, tandis que pour les fonds lisses, le signal sera généralement diffusé dans d'autres directions plutôt que d'être renvoyées vers le récepteur. Aux fortes incidences, en revanche, un fond lisse produira vraisemblablement un meilleur retour. Mais tout cela dépend aussi d'autres facteurs tels que la dimension des particules et la composition du sol.

3.3.14 Modèles de classification militaire

- 3.3.14.1 Dans la préparation d'un modèle de classification militaire (ou modèle de texture) à partir des enregistrements du sonar latéral, la première tâche de l'hydrographe sera de décider si la texture du fond est de la vase, du sable, du gravier ou de la roche. Il est admis que le fond est constitué de toutes les combinaisons possibles de ces quatre catégories de base, mais une analyse plus détaillée devra être réalisée au moyen de descriptions écrites. Quand les limites séparant les différents types de fond sont nettes, elles doivent être représentées par des lignes continues tandis que si elles sont imprécises, elles doivent être en pointillés. La figure 4.14 ci-après est un exemple de modèle de classification militaire.
- 3.3.14.2 La représentation graphique de la texture du fond doit être enrichie de descriptions écrites. Des exemples de termes à utiliser avec leurs définitions sont indiqués plus loin. Il convient de souligner que ceux-ci ne sont pas exhaustifs; d'autres termes peuvent être utilisés pourvu que la signification soit claire et précise pour tous ceux qui utiliseront l'information. Les descriptions « négatives » des fonds (par exemple « sable plat sans détails marqués ») sont aussi utiles que celles contenant des caractéristiques importantes. Les commentaires écrits doivent être brefs.
- 3.3.14.3 Les structures telles que les épaves, les dunes de sable, les traces de chalutage et les conduites sous-marines constituent aussi une partie importante de la description du fond. Ces détails sont toujours plus importants que les descriptions écrites et doivent recevoir la priorité dans les zones complexes.

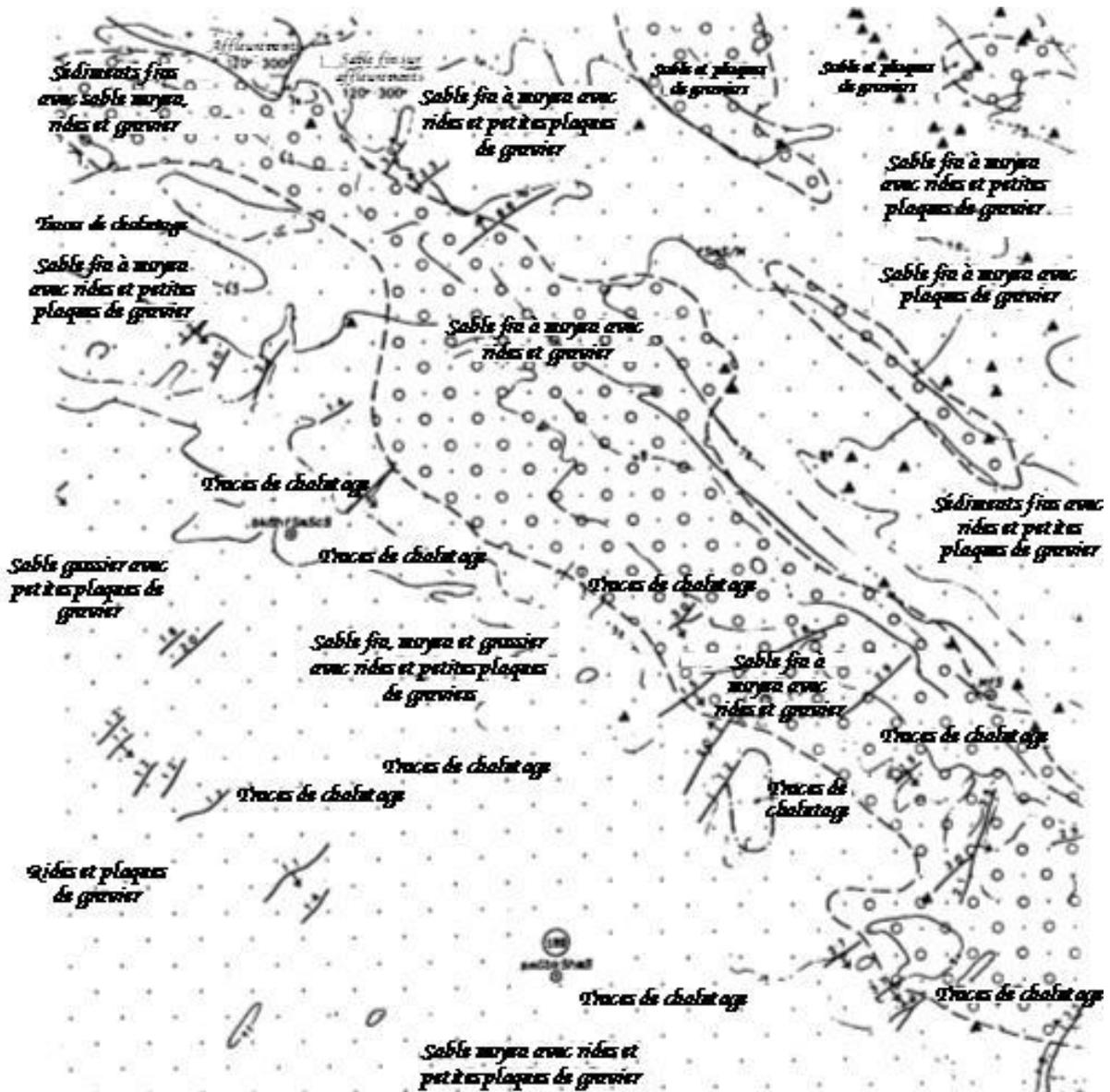


Fig. 4.14 « Exemple de modèle de classification militaire »

3.3.14.4 Les dunes de sable ou ridens sont des structures courantes en topographie sous-marine. Elles peuvent être isolées ou groupées. Différents symboles sont utilisés pour chaque type :

- Dunes de sable sous-marines isolées : pour plus de précision, la position de la crête de la dune sera déterminée au moyen du sondeur et non à partir de l'enregistrement du sonar latéral. Le symbole de dune isolée sera alors placé le long de la ligne de crête. Si la dune est asymétrique, une petite flèche orientée vers le bas du côté le plus escarpé de l'objet sera insérée ; cette flèche sera omise si la dune est symétrique. La hauteur de crête à creux sera précisée.
- Bancs de dunes sous-marines : la plupart des dunes de sable sous-marines sont regroupées en bancs de hauteurs et d'orientations semblables. Il n'est pas nécessaire dans ce cas de tracer les dunes individuellement mais seulement de délimiter le contour du banc en se basant, ici encore, sur le sondeur pour plus de précision et en insérant le symbole de banc de dunes. On doit indiquer l'orientation des crêtes, la longueur d'onde des dunes, leur hauteur, leur symétrie, leur espacement et le côté le plus escarpé.

- 3.3.14.5 Pour les besoins cartographiques, une dune sous-marine sera définie comme une structure de plus d'un mètre. Les structures plus petites seront classées comme rides. La longueur d'onde du banc de dunes est définie comme étant la distance entre deux crêtes consécutives; la hauteur d'une dune est la différence entre la crête et le creux adjacent. En règle générale, quand les crêtes sont espacées de moins d'un centimètre sur la carte et que les dunes ont des orientations, des hauteurs et des longueurs voisines, elles seront traitées comme un banc. Les rides sont souvent superposées aux dunes et peuvent avoir une orientation différente. Une brève description telle que « rides 120/300 » doit être insérée à côté du symbole de dunes sous-marines.
- 3.3.14.6 Petits objets situés sur le fond : toutes les structures pérennes de plus d'un mètre doivent être positionnées et représentées. Lorsque il y a plus de cinq contacts par centimètre carré, la zone doit être délimitée et annotée, et si possible, le nombre de contacts mentionné. Des descriptions écrites peuvent être ajoutées autant que de besoin.
- 3.3.14.7 Épaves et obstructions : toutes les épaves et obstructions détectées pendant le levé doivent être incluses dans le modèle de classification. Les épaves seront présentées par le symbole d'épave « non dangereuse », orienté dans la même direction que l'épave. L'étendue et la direction de la souille seront notées, par exemple « souille 155/50m ». Les autres obstructions seront présentées par le symbole « obstruction », avec si possible une description écrite, par exemple : « tête de puits ».
- 3.3.14.8 Petites dépressions : certains fonds peuvent contenir de petites dépressions, reconnaissables au sonar latéral par la présence d'une ombre acoustique devant le contact. Certaines d'entre elles peuvent avoir des bords prononcés et contenir de petits cratères (*pockmarks*). À moins que leur origine ne soit connue (par exemple si une plate-forme pétrolière a été déplacée pendant le levé), on ne cherchera pas à les classer.
- 3.3.14.9 Traces de chalutage : dans de nombreuses régions, les sillons de chaluts sont fréquents et caractéristiques des fonds. Leur visibilité est accrue par le fait qu'on les rencontre généralement par fonds plats. Les traces de chalutage isolées seront représentées individuellement ; leurs concentrations seront délimitées et accompagnées de la mention « nombreuses traces de chalutage ».
- 3.3.14.10 Conduites sous-marines : tous les conduits sous-marins détectés pendant le levé doivent être représentés. Les tracés des conduits enfouis ne doivent pas figurer à moins qu'ils ne soient visibles au sonar latéral, auquel cas le terme « enfoui » sera précisé. La hauteur en mètres des pipelines qui se tiennent au-dessus du fond sera indiquée à intervalles réguliers.
- 3.3.14.11 Isobathes : les isobathes seront tracées normalement tous les cinq mètres. Dans les régions où les profondeurs varient beaucoup, ce principe sera adapté par l'hydrographe qui doit veiller à la bonne présentation du modèle de texture. Le but recherché par le tracé des isobathes est d'aider l'hydrographe à interpréter les sonogrammes.
- 3.3.14.12 Descriptions utilisées dans les modèles militaires de classification du fond :
- Dunes sous-marines (*Sandwaves*) : rides de sable rectilignes ou sinusoidales généralement alignées dans le sens du courant de marée ou du courant dominant. Hauteur minimale : un mètre. La distance entre crêtes (longueur d'onde) peut atteindre jusqu'à 1000 m et les hauteurs jusqu'à 20 m. Les dunes peuvent être symétriques ou non et comporter des ondulations.
- Rides (*Ripples*): petites structures de sable, de forme semblable à une dune sous-marine mais de hauteur inférieure à un mètre. Souvent orientées transversalement au courant de marée ou au courant dominant, elles ont une longueur d'onde inférieure à 15 m et peuvent ne pas être détectées au sondeur.

Sillons et crêtes (*Furrows & Ridges*) : structures longitudinales en forme de lits de gravier, de sable ou de vase pouvant atteindre 9 km de longueur et 14 m de largeur. Ces structures peuvent être isolées, mais se présentent habituellement plutôt en groupe ; elles sont généralement parallèles aux courants dominants.

Rubans de sable (*Sand Ribbons*) : ces rubans apparaissent normalement au-dessus des couches de matériaux plus grossiers qu'ils recouvrent. La plupart des rubans de sable sont droits et parallèles aux courants. Ils peuvent mesurer jusqu'à 15 km de longueur, 200 m de largeur et ne dépassent généralement pas quelques cm d'épaisseur. Ils peuvent avoir une apparence d'« échelle » dont les barreaux seraient les rides.

Nappes de Gravier / Sable / Vase (*Gravel/Sand/Mud Patches*) : couches minces et étalées de gravier, de sable ou de vase de moins de 100 m de largeur et de 2 m d'épaisseur. Ces couches peuvent résulter de dépôts et être mobiles. Leur forme est déterminée par le relief sous-jacent.

Affleurements rocheux (*Rock Outcrop*) : affleurements couvrant une petite zone et appartenant à un ensemble cohésif, et non à une collection de galets.

Aiguille rocheuse (*Pinnacle*) : rocher de largeur étroite mais de hauteur beaucoup plus élevée que les roches environnantes.

Corniche (*Ledge*) : affleurement rocheux long de plus de 300 m et relativement étroit. Se trouve souvent en groupes de directions et d'étendues similaires.

Banc (*Bank*) : constitués habituellement de sable ou de gravier, mais également de roches, les bancs sont des hauts-fonds d'étendue relativement limitée, mais importants par rapport aux fonds environnants. Quand ils sont formés de sédiments, ils sont souvent orientés dans le sens du courant de marée.

Grand / Petit (*Large / Small*) : qualificatifs préférés à gros, large, haut, court, menu, etc.

Large / Étroit (*Broad / Narrow*) : adjectifs utilisés pour qualifier les structures allongées telles que les rubans de sable. Large doit être utilisé pour les rubans de plus de 150 m de larges et étroit pour ceux qui font moins de 10 m.

Lisse (*Smooth*) : adjectif préféré à plat pour qualifier un fond plan, horizontal ou incliné. S'applique principalement à la vase.

Plat (*Flat*) : terme utilisé exclusivement pour décrire des surfaces horizontales (c.-à-d. sans gradient significatif).

Incliné (*Sloping*) : qualifie une région caractérisée par un fond en pente générale. Un fond incliné peut être lisse mais ne peut pas être plat.

Doux (*Gentle*) : graduel, changeant lentement.

Régulier (*Regular*) : qualifie une série d'objets d'amplitudes et de longueurs d'ondes uniformes, par exemple bancs de dunes hydrauliques, crêtes parallèles, etc.

Irrégulier (*Irregular*) : qualifie des objets semblables mais non uniformes, par ex. certaines dunes sous-marines. Peut aussi être utilisé pour décrire une région de roches ne présentant pas de structure identifiable.

Singulier (*Prominent*) : qualifie un objet ou une série d'objets qui se distingue de son environnement.

Sans relief (*Featureless*) : ce terme s'applique normalement aux fonds plats ou lisses, caractérisés par une absence de détail et une étendue remarquables en soi.

Les symboles utilisés pour les modèles militaires de classification du fond sont représentés à la figure 4.15 :

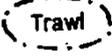
	Roche affleurant
	Gravier
	Sable
	Vase
	Bordure d'une zone où la texture du fond est nettement définie
	Bordure d'une zone où la texture du fond est mal différenciée
	Crête de dune associée à une hauteur de crête à creux en mètres. La flèche indique la pente la plus abrupte
 1m 50°-230° 90m A SE	Régions de dunes de sable (avec hauteur, orientation, longueur d'onde et symétrie ; A = Asymétrique; S = Symétrique)
	Trace de chalutage très marquée
	Zones de concentration de traces de chalutage
	Contact sonar significatif
	Fonds de grande réflectivité sans hauts-fonds significatifs
	Petit cratère (<i>Pockmark</i>)
	Position d'un prélèvement avec description et numéro d'identification
	Épave orientée, avec sa direction et sa longueur
	Obstruction (avec classification si applicable)
	Puits émergé
	Conduite sous-marine
	Isobathes tous les 5 m.

Fig. 4.15 « Symboles utilisés pour les modèles de classification militaire des fonds »

RÉFÉRENCES

- | | | |
|------|--|--|
| 1987 | <i>“The Use of Side Scan Sonar for Hydrographic Surveying and the Gathering of Bottom Texture Information”</i> | Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
Communication professionnelle No. 24 |
| 1990 | <i>“Sound Underwater Images” – A Guide to the Generation and Interpretation of Side Scan Sonar Data.</i> | Fish JP & Carr HA |
| 1994 | <i>“High Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook”</i> | Université de Washington à Seattle
Applied Physics Lab |
| 1997 | <i>“Admiralty Manual of Hydrographic Surveying”</i> | Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO) |
| 1998 | <i>“Side Scan Versus MBES Object Detection - A Comparative Analysis”</i> | Brissette MB & Hughes Clarke JE |
| 2001 | <i>“LEEWIN Class Operating System”</i> | Service hydrographique australien (AHO) |
| 2004 | <i>“Hydrographic Quality Assurance Instructions for Admiralty Surveys”</i> | Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO) |
-