

CHAPITRE 3 DETERMINATION DE LA PROFONDEUR

1. INTRODUCTION

La détermination de la profondeur est une tâche importante pour l'hydrographe, qui nécessite des connaissances spécifiques du milieu, de l'acoustique sous-marine, de l'ensemble des éléments disponibles pour la mesure du fond, des capteurs supplémentaires pour l'attitude et le pilonnement et des procédures propres pour appliquer les normes internationales recommandées pour la précision et la couverture des fonds telles qu'édictées dans la 5^{ème} édition de la publication S-44 de l'OHI.

Le plomb de sonde et la perche étaient les premières méthodes utilisées pour la mesure directe de la profondeur de l'eau. Leur principe de fonctionnement très simple fut mis en œuvre pendant plusieurs centaines d'années.

Le sondeur acoustique à faisceau vertical unique, dérivé des sonars militaires, est un développement majeur qui fut utilisé pour les levés hydrographiques à partir des années 1950.

A partir des années 1980, les levés hydrographiques connurent un changement conceptuel dans la méthodologie et la technologie de la mesure du fond. Les sondeurs multifaisceaux (SMF en français, ou MBES en anglais) et les systèmes de levé laser aéroporté (lidar) offrent aujourd'hui une couverture surfacique presque totale des fonds marins. L'augmentation drastique de la densité de données et des taux d'acquisition conduisit corrélativement à une augmentation explosive des fichiers de données bathymétriques et des données complémentaires.

Les équipements situés à la pointe de la technologie ont été évalués par le groupe de travail sur la S-44 préparant la 4^e édition de 1998, comme suit :

Les sondeurs acoustiques monofaisceaux ont atteint une précision meilleure que le décimètre dans les eaux peu profondes. Le marché offre une grande variété d'équipements, de fréquences, taux d'impulsion, etc. et permet de satisfaire la plupart des besoins des utilisateurs, et en particulier des hydrographes.

La technologie du sondeur multifaisceaux se développe rapidement et offre un grand potentiel pour une couverture précise et totale des fonds marins si elle est utilisée avec les procédures appropriées et à condition que la résolution du système soit adéquate pour une détection acceptable des dangers à la navigation.

Le sondage par laser aéroporté est une nouvelle technologie qui offre des gains de productivité substantiels pour les levés dans les eaux claires et peu profondes. Les systèmes lidar sont capables de mesurer des profondeurs jusqu'à 50 mètres ou plus.

Malgré ces nouvelles technologies, le sondeur acoustique vertical reste encore un équipement couramment utilisé pour les levés hydrographiques dans le monde entier. Ces sondeurs sont aussi passés de l'enregistrement analogique au numérique, avec des précisions et une exactitude plus grandes et des caractéristiques spécifiques permettant de répondre à des besoins plus variés. L'utilisation de sondeurs numériques couplés à des centrales d'attitude, à des systèmes de positionnement satellital comme le GPS et à des logiciels d'acquisition de données ont permis d'optimiser la productivité et de réduire le personnel nécessaire à l'exécution des levés.

Le sondeur multifaisceaux (SMF) est devenu un outil précieux pour la détermination des profondeurs sur la totalité des fonds marins et un nombre croissant de services hydrographiques nationaux privilégie le SMF pour collecter des données bathymétriques utilisées dans la production de nouvelles cartes. L'acceptation des données SMF pour les cartes marines est un signe de confiance croissante dans les capacités impressionnantes de cette technologie. Pour cette raison, il est essentiel que les planificateurs et opérateurs chargés de l'acquisition des données et du contrôle de qualité aient une connaissance approfondie du fonctionnement des SMF et une bonne expérience dans l'interprétation et la validation des données.

Les systèmes de sondage par lasers aéroportés sont utilisés par quelques services hydrographiques. Ces systèmes ont des taux d'acquisition de données très élevés et sont particulièrement adaptés aux levés côtiers et dans les eaux peu profondes. Cependant, le coût élevé des équipements utilisés dans la collecte des données et les opérations ne permettent pas encore une utilisation plus systématique.

La section 2 de ce chapitre est relative aux connaissances nécessaires à la compréhension de la propagation des ondes sonores dans l'eau ainsi qu'à leurs caractéristiques physiques et leurs paramètres. La section 3 présente les centrales d'attitude. La section 4 couvre les caractéristiques des transducteurs, leurs classifications selon la forme des faisceaux, leurs principes opératoires et leur installation. La section 5 décrit les sondeurs verticaux et les systèmes surfaciques, tels que les sondeurs multifaisceaux et interférométriques, leurs caractéristiques, leurs principes opératoires, leur installation et leur mise en œuvre. Pour terminer, la section 6 décrit les systèmes non acoustiques tels que le lidar, les systèmes de détection à induction électromagnétique et les instruments mécaniques historiques tels que la drague hydrographique.

La terminologie utilisée dans ce chapitre suit, autant que possible, celle du dictionnaire hydrographique [OHI S-32 5^{ème} EDITION, 1994].

2. LES CAPTEURS ACOUSTIQUES

La mer est le milieu dans lequel se déroulent les travaux hydrographiques ; c'est pour cela que la connaissance des propriétés physiques de l'eau de mer et de la propagation des ondes sonores est importante pour la compréhension du contenu et de l'objectif de ce chapitre.

2.1 Ondes sonores et caractéristiques physiques de l'eau de mer

En dépit de leur excellente propagation dans le vide et dans l'air, les ondes électromagnétiques se propagent difficilement dans les liquides, tandis que les ondes sonores, audibles ou ultrasoniques, pénètrent et se propagent facilement dans tous les milieux élastiques qui se mettent à vibrer sous l'effet des variations de pressions. La majorité des capteurs utilisés pour la détermination de la profondeur utilisent les ondes sonores.

2.1.1 Champs sonores

Les ondes sonores sont produites par de faibles variations du champ de pression dans l'eau. Les particules d'eau de mer entrant en vibration se déplacent d'avant en arrière dans la direction de la propagation, produisant des zones alternées de compression et d'expansion similaires à celles produites par une corde vibrante.

L'intensité de l'onde acoustique **I** est la quantité d'énergie traversant une unité de surface par seconde ; elle est définie par le rapport :

$$I = \frac{p_e^2}{\rho c} \quad (3.1)$$

où **p** est la densité de l'eau, **c** la célérité du son dans l'eau et **p_e** la pression acoustique efficace³⁰ obtenue à partir de la moyenne quadratique de l'amplitude maximale de la pression **P** pendant un temps de mesure donné, c'est-à-dire :

$$p_e = \frac{P}{\sqrt{2}}$$

³⁰ Pascal (Pa) est l'unité de pression dans le système international SI.

L'intensité des ondes sonores est calculée en utilisant la pression acoustique moyenne au lieu des valeurs instantanées de pression. La pression et l'intensité des ondes acoustiques, par suite de leur grande variation, sont toujours exprimées sur des échelles logarithmiques, l'échelle des décibels étant l'échelle logarithmique la plus courante.

Le niveau d'intensité acoustique **IL** est défini comme étant égal à :

$$IL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{Ref}} \quad (3.2)$$

où **I_{Ref}** est l'intensité de référence.

ou alternativement par la formule :

$$IL = 20 \log_{10} \frac{p_e}{p_{Ref}} \quad (3.3)$$

où **p_{Ref}** est la pression de référence³¹.

2.1.2 Équation du sonar

L'équation du sonar³² est utilisée pour étudier et définir la capacité de détection et les performances des sondeurs à ultrasons en fonction des conditions entourant leur mise en œuvre [Urlick, 1975].

L'équation du sonar pour les sondeurs à ultrasons définit le signal ou la détection de l'écho comme étant « l'excès de signal » (**SE**) par rapport au seuil de détection, soit :

$$SE = SL - 2 TL - (NL-DI) + TS - DT \quad (3.4)$$

où :

SL (*source level*) est le niveau de la source, **TL** (*transmission loss*) la perte de propagation, **NL** (*noise level*) le niveau de bruit ambiant, **DI** (*directivity index*) l'index de directivité de l'antenne de réception, **TS** (*target strength*) l'index de réflexion par la cible et **DT** (*detection threshold*) le seuil de détection.

Dans cette section, chaque terme de l'équation du sonar est étudié pour aider à mieux comprendre les principes de propagation du signal acoustique et de détection de l'écho.

L'intensité **I_r**, ou puissance par unité de surface d'une onde sonore à une distance **r** de la source est :

$$I_r = \frac{p_r^2}{\rho c} \quad W/m^2 \quad (3.5)$$

où **p_r** est la pression efficace à la distance **r** de l'émetteur et **pc** l'impédance³³ acoustique, (soit, pour une vitesse du son de 1500 m/s et une densité de l'eau de 1026 kg/m³, une impédance acoustique $pc = 1,539 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$).

Le niveau de la source (**SL**) mesure l'intensité du signal acoustique perçue par le récepteur. Il a pour référence l'intensité d'une onde plane³⁴ caractérisée par une pression de moyenne quadratique 1μPa reçue en un point situé à un mètre du centre de la source émettrice, c'est à dire :

³¹ Dans l'eau, la pression acoustique de référence adoptée est égale à 1μPa

³² Sonar = *SQund NAvigation and Ranging*

³³ L'impédance acoustique correspond à la résistance du milieu à la propagation du signal qui le traverse. Il est égal au produit de la masse volumique **p** du matériau par la célérité **c** du son.

³⁴ Les ondes planes sont caractéristiques d'une petite région éloignée de la source où le front d'onde (points dont les vibrations sont en phase) est approximativement plan et où le changement d'amplitude d'un point à l'autre est négligeable. NdT : la source étant située en un point x d'un trièdre orthonormé, l'onde est plane quand la pression est constante quels que soient y et z d'un plan perpendiculaire à {Ox}.

$$SL = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_1}{I_{\text{Ref}}} \quad (3.6)$$

La perte de transmission (TL) correspond à la perte d'intensité acoustique résultant de la géométrie du champ sonore, c.-à-d. aux pertes par divergence proportionnelles à r^2 et aux pertes liées à l'absorption, elles-mêmes proportionnelles au coefficient d'absorption qui dépend des propriétés physiques et chimiques de l'eau de mer et de la fréquence acoustique (voir 2.3.1).

Les pertes par divergence, ou pertes géométriques, sont dues à l'épanouissement du faisceau conique (fig. 3.1). L'augmentation de la surface résulte en une diminution de la puissance par unité de surface.

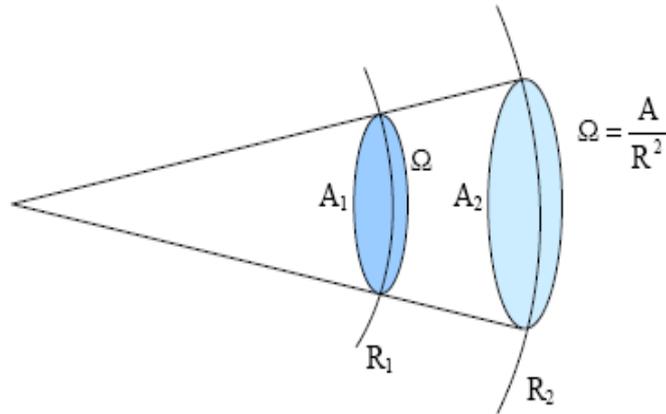


Fig. 3.1 « Perte par divergence ou perte géométrique »

La puissance Π de l'impulsion acoustique est égale au produit de l'intensité I par la surface « A » :

$$\Pi = I_1 \cdot A_1 = I_2 \cdot A_2$$

où $A_1 = \Omega R_1^2$ et $A_2 = \Omega R_2^2$, Ω étant l'angle solide conique³⁵.

Donc, la relation des intensités est donnée par l'égalité :

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \quad (3.7)$$

Si on considère l'intensité de référence I_{Ref} à la distance $R_1 = 1$ m, à laquelle le niveau de la source (SL) est mesuré, le logarithme du rapport des intensités lié à la perte géométrique est égal à :

$$10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_{\text{Ref}}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{R_2^2} = -20 \cdot \log_{10} R_2 \quad (3.8)$$

En définitive, la perte de transmission est égale à :

$$TL = 20 \log_{10} r + ar \quad (3.9)$$

où r est la distance au transducteur et a le coefficient d'absorption.

Le niveau de bruit (NL) dépend du spectre de bruit local (N_0) et de la largeur de bande du transducteur durant la réception (w) :

³⁵ L'angle solide conique Ω est l'espace angulaire inclus dans un cône. La valeur, exprimée en stéradians (sr) est obtenue par $\Omega = S/R^2$ où S est la surface de la sphère de rayon R centrée au sommet du cône.

$$NL = N_0 + 10 \log_{10} w \quad (3.10)$$

Le bruit ambiant de l'océan est généré par des sources diverses (Urlick, 1975) telles que les vagues, la pluie, l'activité sismique, le bruit thermique, les organismes vivants et les activités humaines.

En plus du bruit, il est important de prendre en compte l'énergie du signal réverbéré (*backscattering*) par les irrégularités du milieu, incluant les vagues, les bulles d'air, la vie marine, les matières en suspension, etc. Cette contribution est connue sous le nom de niveau réverbéré (RL).

Les transducteurs ont normalement la capacité de concentrer l'énergie dans un lobe conique (fig. 3.2). Dans l'équation du sonar, cette propriété peut être définie comme le rapport de l'intensité d'un faisceau à celle d'une source ponctuelle omnidirectionnelle émettant avec la même puissance.

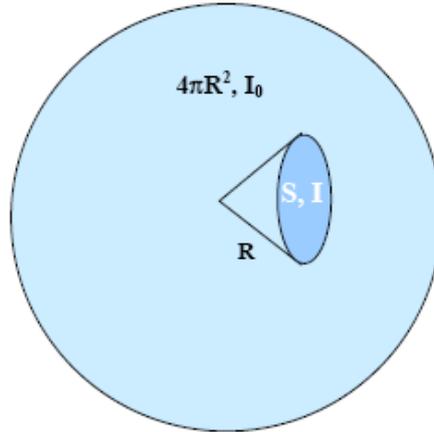


Fig. 3.2 « Surfaces insonifiées par deux sources omnidirectionnelle et directionnelle »

La puissance Π d'une impulsion acoustique étant égale au produit de l'intensité par la surface, en même puissance, selon qu'elle sera émise en omnidirectionnel ou en directionnel, prendra les formes :

$$\Pi = I_0 \cdot 4\pi R^2 = I \cdot S \quad (3.11)$$

Le rapport des intensités qui en résulte devient :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{4\pi R^2}{S} \quad (3.12)$$

tandis que l'index de directivité (DI) est défini par la formule :

$$DI = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{Ref}} = 10 \log_{10} \frac{4\pi R^2}{S} \quad (3.13)$$

Pour une antenne de longueur L , et de longueur d'onde λ (avec $L \gg \lambda$), il vient :

$$DI = 10 \log_{10} (2L/\lambda) \quad (3.14)$$

L'énergie acoustique réfléchiée par la surface du fond est celle qui est utilisée par le sondeur et par les systèmes capables de déduire à distance certaines propriétés des fonds marins. La connaissance de l'angle d'ouverture du faisceau et du profil de célérité dans la colonne d'eau permet d'accéder à la puissance du signal réfléchi corrigé de l'absorption et de la perte par divergence sphérique.

Chaque particule de la surface sous-marine peut être comparée à un réflecteur, et la réflexion sur le fond à la somme de l'énergie réfléchiée par l'interface fond/eau et de la réverbération en volume des sédiments, par suite de la pénétration d'une partie du signal. Cependant, la réverbération en volume est moins significative aux hautes fréquences.

L'énergie du signal rétrodiffusé (**BS**) est normalement définie comme étant la somme logarithmique de l'intensité de réflexion intrinsèque par unité de surface, ou indice de rétrodiffusion (**SB**), dépendant des propriétés réfléchissantes du fond marin, et de la dispersion instantanée par la surface **A** du fond qui contribue à la réverbération du signal :

$$BS = SB + 10 \log_{10} A \text{ dB} \quad (3.15)$$

Les limites de la surface réfléchissante sont définies par la géométrie du faisceau, particulièrement par la largeur du faisceau d'émission normalement orienté en direction du nadir ϕ_T et par l'ouverture de l'antenne de réception mesurée perpendiculairement au nadir ϕ_R .

Pour les incidences obliques, la surface réfléchissante est limitée par la largeur du faisceau ϕ_T et par la longueur τ d'impulsion du signal émis (Figure 3.3). L'intensité du signal réfléchi par le fond est alors :

$$BS = \begin{cases} SB + 10 \cdot \log_{10} (\phi_T \phi_R R^2) & \text{Rétrodiffusion au voisinage de la verticale} \\ SB + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{c\tau}{2\sin\beta} \phi_T R \right) & \text{Rétrodiffusion en incidence oblique} \end{cases} \quad (3.16)$$

où **R** est la distance oblique du transducteur à un point situé le fond, **c** la célérité et β l'angle du faisceau par rapport à la verticale.

L'indice de rétrodiffusion, **SB**, est partiellement dépendant de l'angle d'incidence et varie d'autant plus que celui-ci est proche du nadir. Pour les incidences plus grandes, sa dépendance suit normalement une loi de Lambert [Urick 1975 et Moustier (de), 1993]. Il est courant d'écrire :

$$SB = BS_N, \text{ pour une incidence normale } (\beta = 0^\circ)$$

$$SB = BS_0 \cos^2 \beta, \text{ pour une incidence oblique } (\beta > 10\text{-}25^\circ)$$

Des valeurs caractéristiques de l'intensité du signal seront de environ -15dB pour BS_N et -30 dB pour BS_0 . Ces valeurs peuvent changer de ± 10 dB ou plus, selon la rugosité et la nature du fond.

En observant les empreintes du faisceau (surface insonifiée) de la fig. 3.3, la surface **A** instantanément insonifiée est fonction de la largeur ϕ_T du faisceau transmis. Le nombre d'échantillons par faisceau dépend de l'intervalle (τ_s) d'échantillonnage.

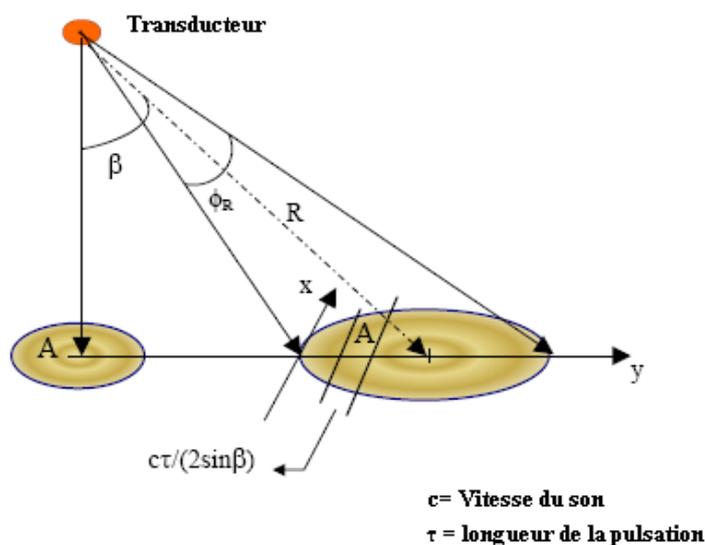


Fig. 3.3 « Rétrodiffusion en incidence oblique »

Le seuil de détection (DT) est un paramètre dépendant du système qui fixe le niveau le plus bas au-dessus duquel le sondeur peut détecter le signal réfléchi.

2.1.3 Température de l'eau

La température de surface varie en fonction de la position géographique, des saisons et de l'heure de la journée [Pickard et Emery, 1990]. Quant à la distribution du champ de température, elle est complexe et ne peut être prédite avec une précision suffisante pour les levés hydrographiques. Les variations de température au sein de la colonne d'eau sont également très complexes. Cette imprévisibilité nécessite une répartition réfléchie des observations de célérité, dans le temps et dans l'espace, afin d'avoir une connaissance représentative des profils de célérité du son dans la zone du levé.

La mesure des profondeurs est très sensible aux variations de célérité. Une variation de température d'un degré Celsius se traduit approximativement par une variation de 4,5 m/s de la célérité.

La variation de température est le facteur dominant pour la variation de célérité dans la couche de mélange ; au-dessous de la thermocline³⁶, c'est la pression qui exerce l'influence principale.

2.1.4 Salinité

La salinité est la mesure de la quantité de sel et autres minéraux dissoute dans l'eau de mer. Elle est normalement exprimée en parties pour mille (‰).

Dans la pratique, la salinité n'est pas déterminée directement mais elle est calculée à partir de la chlorinité, de la conductivité, de l'index de réfraction ou de toute autre propriété dont la relation à la salinité est bien établie. Les proportions des constituants de l'eau de mer étant relativement constantes (loi de Dittmar), le niveau de chlorinité est utilisé pour établir la salinité d'un échantillon.³⁷

La salinité moyenne de l'eau de mer se situe aux environs de 35‰ et une variation de 1‰ se traduit par une variation approximative de la célérité de 1,3 m/s. La salinité est généralement observée à l'aide d'une sonde CTD permettant de mesurer la conductivité, la température et la profondeur à partir de la conductivité électrique, voir 2.2.1.2.

2.1.5 Pression

La pression exerce aussi une influence significative sur la célérité. Elle est fonction de la profondeur et le taux de variation de la célérité est d'environ 1,6 m/s pour 10 atmosphères, soit approximativement 100 mètres d'eau³⁸.

La pression est le facteur principal de la célérité dans les grandes profondeurs.

2.1.6 Densité

La densité de l'eau de mer dépend des paramètres précédemment cités, à savoir la température, la salinité et la pression.

50% des océans ont une densité comprise entre 1 027,7 et 1 027,9 kg/m³. Le facteur le plus influent sur la densité est la compressibilité qui est fonction de la profondeur. La densité de l'eau qui est de 1 028 kg/m³ en surface atteint 1 051 kg/m³ à une profondeur de 5 000 mètres.

³⁶ La thermocline correspond à une variation forte et généralement négative du gradient de température dans la colonne d'eau. Ce gradient est nettement plus marqué que ceux qui le précèdent ou qui le suivent. Les thermoclines peuvent être saisonnières quand elles résultent du réchauffement de la surface de l'eau en été, ou permanentes.

³⁷ Un comité mixte (IAPO, UNESCO/COI, ICES/CIEM et SCOR) a proposé l'adoption universelle de la relation suivante entre salinité et chlorinité : $S = 1,80655 Cl$.

³⁸ Formule de la pression hydrostatique : $p(z) = p_0 + pgz$.

2.2 Salinité, température et mesure de la célérité

Les paragraphes qui suivent décrivent les instruments utilisés pour l'observation de la salinité, de la température et de la célérité, ainsi que leurs modes opératoires et les calculs de célérité moyenne.

2.2.1 Instrumentation

2.2.1.1 Le profileur de célérité est l'instrument le plus communément utilisé pour mesurer le profil de vitesse du son dans la colonne d'eau. L'instrument est muni d'un capteur de pression pour mesurer la profondeur ainsi que d'un transducteur et d'une antenne situés à la distance d l'un de l'autre. La célérité c est calculée par la formule $c = 2d/\Delta t$, où Δt est le temps d'aller-retour du signal acoustique entre le transducteur et le réflecteur (même principe que pour une mesure de profondeur par un sondeur).

2.2.1.2 La sonde CTD est un instrument électronique muni de capteurs pour la conductivité, la température et la profondeur. Cet instrument enregistre la salinité par mesure directe de la conductivité électrique de l'eau de mer.

La vitesse du son dans l'eau varie avec l'élasticité et la densité du milieu qui dépendent de la salinité, de la température et de la pression. A partir des données de la CTD (salinité, température et pression) il est possible de calculer la célérité de manière empirique. Une équation simple a été proposée avec une précision adéquate par Coppens [Kinsler & al., 1982] :

$$C(Z, T, S) = 1449,05 + T [4,57 - T (0,0521 - 0,00023 \cdot T)] + \quad (3. 17) \\ [1,333 - T (0,0126 - 0,00009 \cdot T)](S - 35) + \Delta(Z)$$

où T est la température en °C, S la salinité en parties pour mille (‰) et Z la profondeur en kilomètres avec $\Delta(Z) \approx 16,3 Z + 0,18 Z^2$.

Cette équation est valide pour une latitude de 45°. Pour les autres latitudes, Z doit être remplacé par $Z [1 - 0,0026 \cdot \cos(2\phi)]$, ϕ étant la latitude.

2.2.1.3 Les thermistances sont des senseurs dont la résistance électrique dépend de la température, laquelle dépend de la quantité de chaleur rayonnée³⁹ par la mer. Les chaînes de thermistances sont utilisées pour mesurer la température d'eau à diverses profondeurs de la colonne d'eau. Ces chaînes sont normalement mouillées sur zone et consistent en plusieurs thermistances espacées régulièrement le long d'un câble. Un enregistreur acquiert séquentiellement les données des divers éléments et relève les températures en fonction du temps.

2.2.2 Méthode opératoire

Pour obtenir de bons enregistrements, il est nécessaire, avant de déployer un profileur de célérité, de l'initialiser correctement (paramètres, gammes de mesures, etc.) et d'entrer dans la calibration la correction de pression atmosphérique afin de ne pas fausser les mesures de profondeurs.

Il convient de noter que lors du réglage d'*offset* de la pression atmosphérique, le profileur ne doit pas se trouver dans un local pressurisé faute de quoi l'étalonnage sera biaisé et les profondeurs erronées.

Avant d'être descendu, le profileur doit être maintenu en surface pendant 15 minutes environ afin d'obtenir une bonne stabilisation thermique. Par ailleurs, il est recommandé pendant les mesures de dérouler le treuil à vitesse constante.

³⁹ L'énergie rayonnée par un objet est donnée par la loi de Stefan qui écrit qu'elle est proportionnelle au degré quatre de sa température absolue (loi en T^4).

2.2.3 Enregistrement et traitement des données

Les profils doivent être édités et vérifiés minutieusement afin d'éliminer les observations aberrantes.

En général, la profondeur et la célérité sont enregistrées pendant la descente et la remontée. Les deux profils doivent être similaires et la moyenne des deux est souvent retenue comme profil définitif bien que ce ne soit pas une obligation. Dans tous les cas, les lectures doivent être comparées et les informations complémentaires supprimées afin de permettre de classer les données par ordre croissant ou décroissant.

2.2.4 Calcul de la célérité

Après validation, le profil de célérité est intégré aux données du levé afin de corriger les sondages.

Pour les sondeurs verticaux monofaisceaux, on considère qu'il est suffisant d'utiliser une célérité moyenne dans la colonne d'eau tandis que pour les faisceaux obliques, il est nécessaire de tracer les rayons sonores afin de corriger les faisceaux des effets de la réfraction, selon une procédure analogue à celle décrite au § 5.2.1.8.1 pour les SMF.

Pour un signal transmis verticalement (c.à.d. $\theta_0 = 0^\circ$), la célérité d'un son harmonique moyen, c_h , pour une profondeur z_n est donnée par :

$$c_h(z_n) = \frac{z_n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \right)} \quad (3.18)$$

où g_i est le gradient moyen de célérité de la couche i donné par la formule : $g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}$

2.3 Propagation du son dans l'eau de mer

Les paragraphes qui suivent traitent de la propagation du son et plus particulièrement de l'atténuation, de la réflexion et de la réfraction.

2.3.1 Atténuation

L'atténuation est la perte d'énergie de l'onde pendant sa propagation, due à l'absorption, à la divergence sphérique et à la réverbération par les particules dans la colonne d'eau.

L'absorption est le résultat de la dissociation et de l'association de certaines molécules dans la colonne d'eau. Le sulfate de magnésium ($MgSO_4$) est une source majeure d'absorption dans l'eau salée. Le taux d'absorption dépend des propriétés chimiques et physiques de l'eau de mer et de la fréquence émise. Dans la Figure 3.4 on peut voir que le coefficient d'absorption d'une fréquence supérieure à 100 kHz augmente avec l'augmentation de la température; on peut donc s'attendre à ce que la portée du son varie avec la température de l'eau.

La perte par divergence sphérique dépend de la géométrie. Pour un angle solide donné, l'énergie acoustique traverse des sections de plus en plus larges au fur et à mesure que la distance de la source augmente.

L'absorption et la divergence sphérique sont prises en considération dans l'équation du sonar (voir 2.1.2) tandis que les pertes dues à la réverbération sont dues surtout aux particules et autres obstacles présents dans la colonne d'eau. La réverbération est causée principalement par les organismes marins

et a pour source principale la DSL (*Deep Scattering Layer*), ou couche profonde de dispersion qui est une couche de plancton dont la profondeur varie selon un rythme nyctéméral.

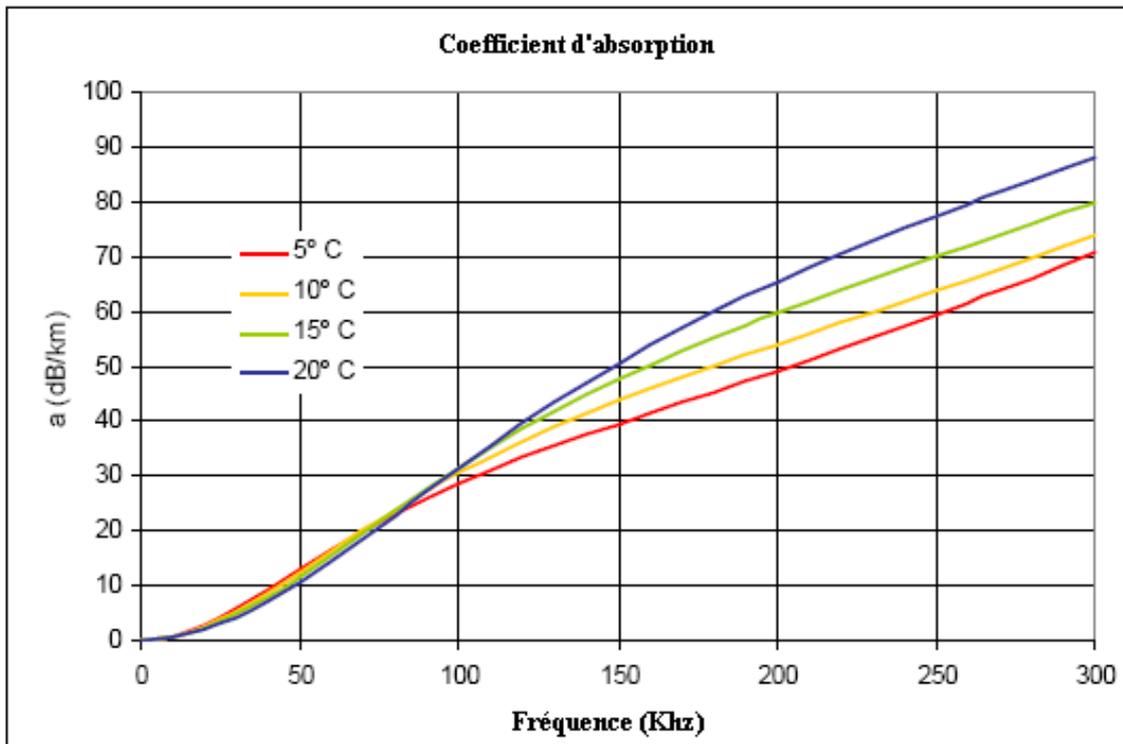


Fig. 3.4 «Coefficient d'absorption »

2.3.2 Réfraction et réflexion

La réfraction est la déviation d'une onde lorsque la célérité change dans le milieu de propagation ou quand l'énergie acoustique traverse un dioptre présentant une discontinuité de célérité.

Appliquons la loi de Descartes/Snellius à deux milieux (fig. 3.5) dans lesquels les vitesses du son c_1 et c_2 sont différentes ; si c_1 est plus grand que c_2 , la direction de propagation de l'onde acoustique sera modifiée de telle sorte que l'angle de réfraction soit plus petit que l'angle d'incidence. Si au contraire, c_1 est plus petit que c_2 , l'angle de réfraction sera plus grand que l'angle d'incidence. Les rayons perpendiculaires au dioptre ne sont pas déviés.

Pour une incidence normale et un fond marin lisse, le coefficient de réflexion⁴⁰ en amplitude de pression, \mathfrak{R} , est obtenu par le rapport des amplitudes de pression des ondes réfléchi et incidente [Kinsler & al. 1982]

$$\mathfrak{R} = \frac{P_R}{P_I} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (3.19)$$

⁴⁰ Il est également possible de définir des coefficients de réflexion en puissance acoustique et en intensité sonore. Pour une incidence normale, le coefficient de réflexion en puissance et en intensité est égal au carré du coefficient de réflexion en pression.

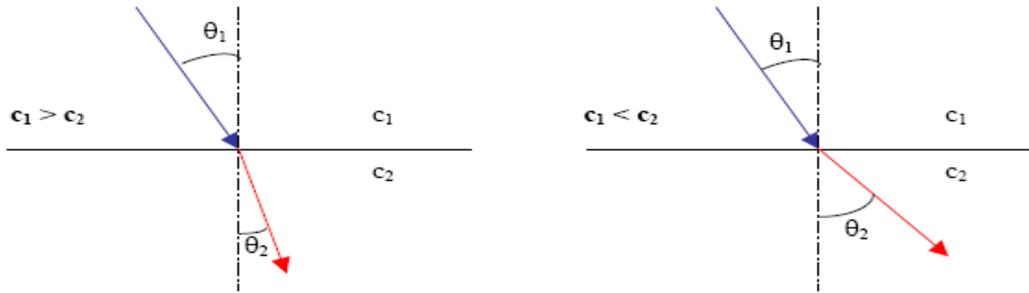


Fig. 3.5 « Principe de la réfraction »

En règle générale, le rapport des intensités acoustiques émise et réfléchi dépend principalement :

- des différences d'impédances acoustiques des milieux;
- de la rugosité du fond ;
- de la fréquence acoustique.

2.4 Paramètres acoustiques

Les caractéristiques d'un sondeur sont déterminées par les transducteurs, spécifiquement la directivité, la largeur et la déflexion du faisceau ainsi que le niveau des lobes secondaires. Dans les paragraphes qui suivent, chacun de ces paramètres est analysé.

2.4.1 Fréquence

La fréquence acoustique du sondeur est le paramètre qui détermine la portée et la pénétration du son dans les sédiments, l'atténuation du signal acoustique dans l'eau étant proportionnelle à la fréquence. Plus haute est la fréquence, plus haute sera l'atténuation et par conséquent plus réduite sera la portée et la pénétration dans les sédiments.

La largeur du faisceau dépend de la longueur d'onde acoustique et de la taille du transducteur. Pour une même longueur d'onde, une basse fréquence nécessitera un plus grand transducteur.

Les fréquences caractéristiques d'un sondeur sont :

- pour les profondeurs de moins de 100 mètres : fréquences supérieures à 200 kHz;
- pour les profondeurs de moins de 1 500 mètres : fréquences comprises entre 50 et 200 kHz;
- pour les profondeurs de plus de 1 500 mètres : fréquences comprises entre 12 et 50 kHz.

Les fréquences des sondeurs de sédiments sont inférieures à 8 kHz.

2.4.2 Largeur de bande

Soit f_0 la fréquence de puissance maximum d'émission (fréquence de résonance) et f_1 et f_2 les fréquences correspondant à la demi-puissance, la largeur de bande est l'intervalle entre ces fréquences (Figure 3.6), c.-à-d. $W = f_2 - f_1$

Le facteur de qualité du transducteur Q est donné par l'expression :

$$Q = \frac{f_0}{W} \quad (3. 20)$$

Il ressort de cette définition que Q et W varient en sens inverse, aussi, pour optimiser la puissance de

transmission, le transducteur devra-t-il transmettre à une fréquence proche de celle de la résonance et avoir une faible largeur de bande, c.-à-d. une haute valeur du facteur de qualité.

Durant la réception il est nécessaire d'avoir une bonne discrimination de l'écho par rapport aux autres signaux. En plus d'être bien définie dans la gamme de fréquence, la largeur de bande du transducteur doit satisfaire à la condition $W \geq 1/\tau$, où τ est la durée d'impulsion.

La solution optimale est d'avoir un émetteur au Q élevé et un récepteur opérant dans la même fréquence de résonance mais avec un Q faible.

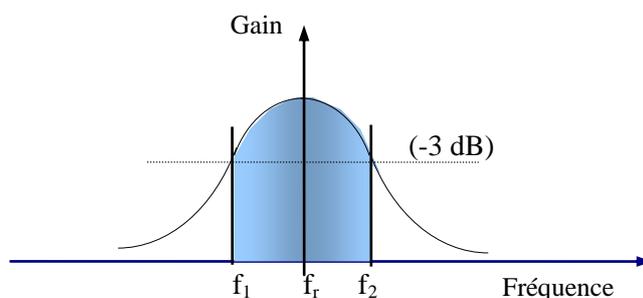


Fig. 3.6 « Largeur de bande des transducteurs »

2.4.3 Durée d'impulsion

La durée d'impulsion détermine l'énergie transmise dans l'eau. Pour une même puissance, plus la durée d'impulsion est longue, plus haute sera l'énergie diffusée dans l'eau et par conséquent plus grande sera la portée du sondeur.

Pour profiter de la fréquence de résonance du transducteur, la durée d'impulsion devrait être au moins égale à la moitié de sa période naturelle. L'inconvénient des impulsions longues est de réduire la résolution verticale entre deux objets voisins (fig. 3.7).

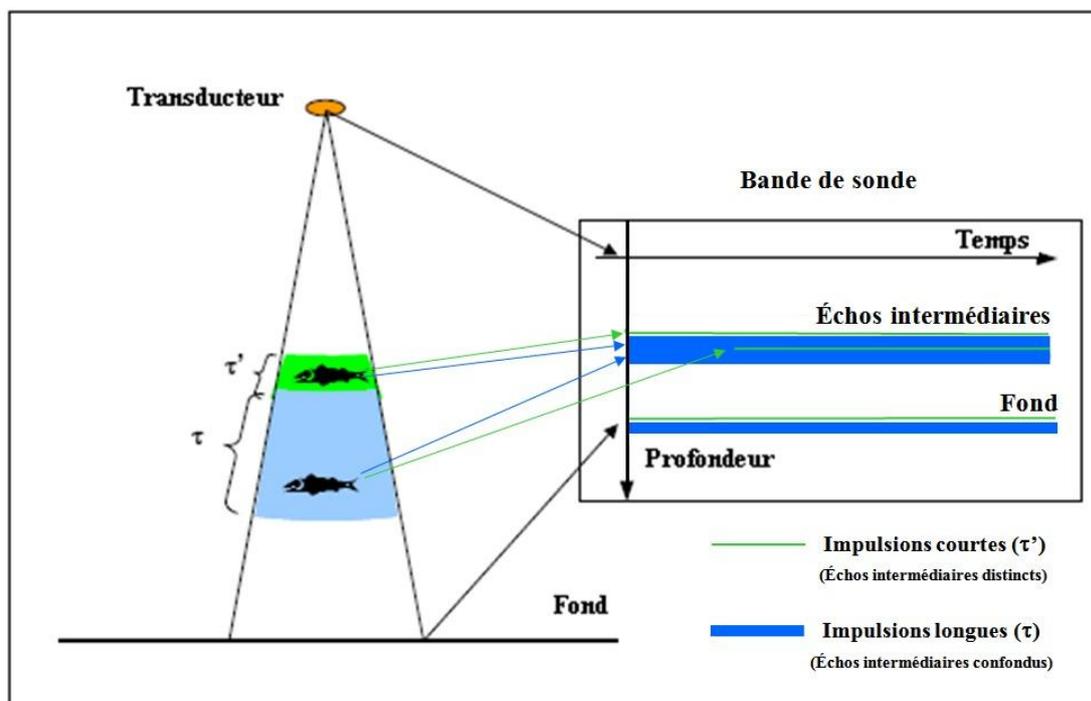


Fig. 3.7 « Résolution en fonction de la durée d'impulsion »

3. LES CENTRALES D'ATTITUDE

La capacité de corriger les mesures et le positionnement des sondes des mouvements du navire, c.-à-d. de son attitude (roulis, tangage et cap) et de son pilonnement, a été un succès remarquable et un progrès dans la qualité et la précision des levés hydrographiques. Pour ce faire, des capteurs inertiels couplés à des capteurs de cap (gyro ou compas *fluxgate*), ou des capteurs inertiels couplés au GPS, sont utilisés pour mesurer l'attitude et le pilonnement du porte-sondeur.

L'attitude du navire consiste en trois rotations autour des trois axes orthogonaux conventionnels définis pour le navire. Les coordonnées du navire sont rapportées à un trièdre orthogonal direct dont l'axe des x est orienté vers la proue, l'axe des y vers tribord et l'axe des z vers le bas. Dans un tel système, le roulis correspond à des rotations autour de l'axe des x (positives quand le navire gîte vers tribord), le tangage correspond à des rotations autour de l'axe des y (positives quand la proue pointe vers le haut) et les lacets correspondent à des rotations autour de l'axe des z (positives dans le sens des aiguilles d'une montre).

Pour transformer les données du levé recueillies dans le système de référence du navire à un système de coordonnées locales, il est nécessaire de les corriger des rotations correspondant à l'attitude mesurée. Le système de coordonnées local est défini dans un trièdre orthogonal indirect dont l'axe des x est orienté vers l'est, l'axe des y vers le nord et l'axe des z vers le bas.

Les paragraphes qui suivent couvrent les principes de base de la détection des mouvements de la plateforme et de la précision des mesures.

3.1 Principes opératoires

3.1.1 Les senseurs inertiels

Les senseurs inertiels, ou unités de mesure inertielle (IMU), sont les capteurs les plus utilisés en hydrographie pour mesurer le roulis, le tangage et le pilonnement. Ces capteurs appliquent les lois de Newton pour les mouvements et consistent en trois accéléromètres configurés selon des axes trirectangulaires associés à trois capteurs de vitesse angulaire montés sur un même cadre, et qui subissent les mêmes mouvements angulaires que le navire (système *strap-down*). Les sorties de ces trois accéléromètres offrent une bonne estimation de la direction du vecteur de gravité, à partir de laquelle les petits déplacements angulaires sont mesurés. Ce triplet de capteurs de vitesse angulaire mesure le roulis, le tangage et les lacets.

Le pilonnement est déterminé par une double intégration de l'accélération linéaire mesurée par un accéléromètre vertical.

Les données des accéléromètres sont traitées par un filtre passe-bas afin de supprimer les variations à haute fréquence mesurées sur la verticale apparente et causées par la houle, les girations ou les variations soudaines de vitesse. De même, les données des capteurs de vitesse angulaire sont traitées par un filtre passe-haut afin de supprimer les mouvements à basse fréquence. En final, les données de sortie des filtres correspondent à l'attitude du bâtiment pour les fréquences voisines du seuil de coupure choisi (des fréquences de coupure de 5 à 20 secondes sont considérées comme normales).

Quand le bâtiment subit des accélérations dont la durée excède la constante de temps du filtre passe-bas des accéléromètres, telles que des girations prolongées ou des variations de vitesse, les accélérations tangentielle ou centrifuge sont perçues comme une accélération horizontale dont la durée ne peut pas être filtrée par le filtre passe-bas. Il en résulte une déviation apparente de la verticale et des erreurs sur les mesures angulaires de roulis, de tangage et de lacets.

La combinaison des deux filtres passe-bas et passe-haut et la relation entre les deux bandes passantes constituent les caractéristiques des capteurs.

Ces capteurs inertiels, en particulier celui du pilonnement, sont très sensibles à la durée du temps d'intégration. Le seuil de coupure correspondant devra être fixé à une valeur qui permette de détecter les ondes les plus longues sans rejeter ou atténuer les plus courtes.

3.1.2 Centrales inertielles avec GPS intégré

L'intégration du GPS permet de déterminer le cap à partir d'une ligne de base constituée par deux antennes GPS orientées selon l'axe longitudinal du navire.

Les informations sur la vitesse et le taux de giration fournies par le récepteur GPS et par les capteurs de vitesse angulaire peuvent être utilisées pour calculer l'accélération centrifuge dont la prise en considération permet de corriger les mesures de roulis et de tangage de la déviation de la verticale apparente. Ces capteurs fournissent en sortie un roulis et un tangage de haute précision, filtrés des effets des accélérations horizontales.

3.2 Mesures de roulis, de tangage et de pilonnement

Depuis la mi-1990, des centrales d'attitude précises et d'un prix abordable sont utilisées durant les levés hydrographiques. Elles sont devenues indispensables, non seulement pour les levés SMF, mais aussi pour les levés aux sondeurs monofaisceaux associés à des systèmes d'acquisition de données, et permettent de compenser les mouvements du bâtiment en roulis, tangage et pilonnement.

Les profondeurs calculées doivent prendre en compte les données des centrales d'attitude, c.-à-d. les mouvements du bâtiment hydrographique autour de ses axes longitudinal (roulis – θ_R) et transversal (tangage – θ_P), de son cap α , ainsi que selon la verticale (pilonnement). Voir fig. 3.8 et Annexe A.

3.3 Cap suivi

L'enregistrement et la prise en compte du cap suivi par le porte-sondeur sont essentiels pour les systèmes à balayage. Cependant, pour les levés au sondeur monofaisceau, l'effet d'une variation de cap (lacet) n'est pas significatif si l'antenne de positionnement et le transducteur sont situés sur le même axe vertical. Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire de tenir compte du cap du navire et du vecteur séparant le transducteur de l'antenne GPS.

Pour les mesures du cap en temps réel, plusieurs méthodes et équipements sont disponibles tels que le compas gyroscopique, le compas *fluxgate* (à vanne de flux) et le GPS différentiel à porteur de phase.

Les mesures de cap sur la porteuse de phase sont faites par des capteurs inertiels intégrant les informations du CDGPS. Cette solution donne de hautes précisions.

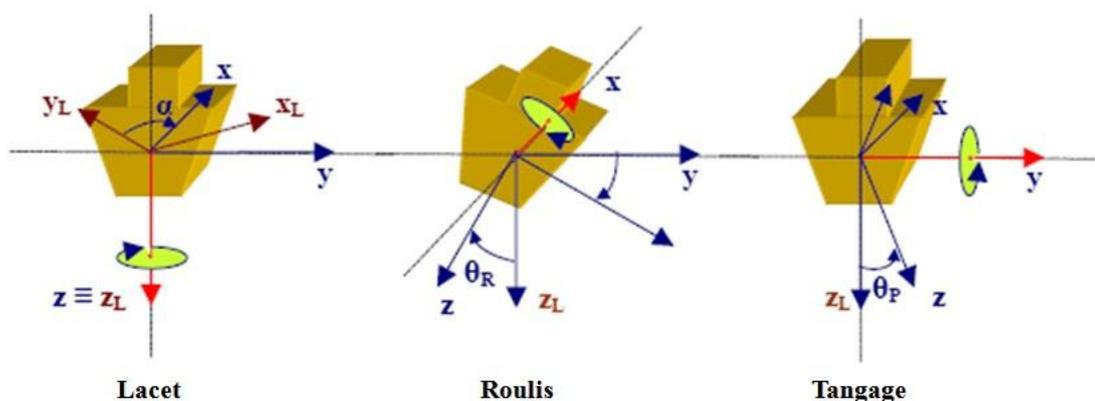


Fig. 3.8 « Attitude du porte-sondeur »

3.4 Précision des mesures

La précision du roulis, du tangage, du pilonnement et du cap doit être la plus haute possible. Aujourd'hui, les centrales d'attitude sont suffisamment précises pour être utilisées pour la plupart des ordres de levés, cependant les accélérations horizontales du porte-sondeur, qu'elles soient centrifuges ou tangentielles, affectent les capteurs inertiels utilisés seuls et se traduisissent par des erreurs de mesures dues à la déviation de la verticale apparente.

Dans le cas du SMF, il est recommandé de combiner les capteurs inertiels avec le DGPS afin de minimiser les effets des accélérations horizontales. Les précisions habituelles des systèmes pour un niveau de confiance à 95% sont de $0,05^\circ$ en roulis et tangage, $0,2^\circ$ en cap et 10 cm ou 10% de l'amplitude du pilonnement, en prenant la plus grande de ces deux valeurs.

Au cours d'un changement de cap, la mesure du pilonnement est dégradée à cause de l'accélération centrifuge. Il convient de laisser s'écouler un intervalle de temps après la giration égal à dix fois la durée du *cut-off* afin de permettre la stabilisation et la reprise des mesures précises.

4. LES TRANSDUCTEURS

Les transducteurs⁴¹ sont les composants du sondeur qui conditionnent en partie les capacités opérationnelles de cet instrument. Pour cette raison, il est particulièrement important d'étudier leurs principes de mise en œuvre, leurs paramètres caractéristiques tels que la largeur et l'orientation de leur faisceau, leur directivité, leur implantation et leur fauchée.

Les transducteurs sont des appareils utilisés pour la transmission et la réception de l'impulsion acoustique. Ils fonctionnent en convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique c.-à-d. que les transducteurs convertissent les impulsions électriques d'un générateur de signal en vibrations longitudinales qui se propagent dans la colonne d'eau en tant qu'onde de pression [Seippel, 1983]. Inversement, durant la réception, les ondes de pression sont converties en signaux électriques.

Les paragraphes qui suivent décrivent les classifications des transducteurs selon leurs modes de fonctionnement, la forme et la directivité de leur faisceau ainsi que leur installation à bord ; ils sont conclus par une évaluation des surfaces qu'ils permettent d'insonifier.

4.1 Classification des transducteurs selon leurs modes de fonctionnement

Les transducteurs sont classés en fonction des modes de fonctionnement sur lesquels ils sont basés, à savoir les effets magnétostrictifs, piézoélectriques et électrostrictifs.

4.1.1 Transducteurs magnétostrictifs

Ces transducteurs sont constitués d'un barreau en fer entouré d'un solénoïde en nickel. L'envoi d'un courant continu ou d'une impulsion électrique dans le barreau génère un champ magnétique dans le solénoïde qui se contracte et subit par conséquent une réduction de son diamètre. Quand le courant électrique cesse, le solénoïde retourne à sa dimension originale.

Un courant alternatif génère des contractions et des extensions en fonction du signal appliqué. L'amplitude de la vibration induite va être maximale si la fréquence est égale ou harmoniquement liée à la fréquence naturelle de résonance du matériau utilisé dans le transducteur⁴².

⁴¹ Le transducteur est l'antenne sous-marine utilisée pour émettre et recevoir des impulsions acoustiques. Un transducteur utilisé exclusivement en mode passif prend le nom d'hydrophone.

⁴² Ce phénomène correspond à une amplification ou une prolongation de tout phénomène ondulatoire tel que l'acoustique. La fréquence de résonance est la fréquence à laquelle un transducteur est susceptible de vibrer.

Ces types d'appareils sont cependant moins efficaces que les transducteurs piézoélectriques.

4.1.2 Transducteurs piézoélectriques

Ces transducteurs sont constitués de deux plaques séparées par une couche de cristaux de quartz. L'application d'une différence de potentiel électrique à travers les plaques produit une variation d'épaisseur de la couche de quartz [effet piézoélectrique]. Un courant alternatif provoquera la vibration du quartz et par conséquent la vibration de l'unité entière ; réciproquement, la compression mécanique du cristal produira une différence de potentiel entre les faces opposées du cristal. L'amplitude de la vibration sera maximale si la fréquence du courant électrique est égale à la fréquence naturelle de résonance du quartz.

4.1.3 Transducteurs électrostrictifs

Ces transducteurs sont basés sur le même principe que les transducteurs piézoélectriques. Cependant les matériaux utilisés (habituellement une céramique polycristalline ou certains polymères) n'ont pas de caractéristiques piézoélectriques et doivent par conséquent être polarisés lors de leur fabrication.

Les transducteurs électrostrictifs sont utilisés exclusivement aujourd'hui, car ils sont plus légers, réversibles et peuvent être répartis dans une flûte. Lorsqu'ils sont configurés correctement, ces dispositifs composés de petits éléments, présentent les mêmes caractéristiques qu'un transducteur fabriqué d'un seul bloc, en application du principe de superposition (voir 4.2, équation 3.26).

4.2 Largeur du faisceau (lobes)

En coordonnées polaires, l'amplitude de la pression acoustique générée par un transducteur est :

$$P(r, \theta) = P_{ax}(r) \cdot h(\theta) \quad (3. 21)$$

Où θ est l'angle mesuré à partir de l'axe du faisceau, qui correspond aux amplitudes maximales de la pression et de l'intensité acoustiques, r la distance au transducteur, $P_{ax}(r)$ l'amplitude de la pression acoustique à la distance r dans l'axe du faisceau et $h(\theta)$ le gain directionnel qui caractérise une puissance relative du signal. Le gain directionnel de référence correspond à $\theta = 0$, c'est-à-dire que pour $\theta = 0$, $h(0) = 1$ et donc $P(r,0) = P_{ax}(r)$

La directivité du transducteur est normalement représentée sous la forme d'un faisceau $B[\theta] = h^2(\theta)$ ou par son expression en échelle logarithmique : $b(\theta) = 10 \cdot \log_{10} [B(\theta)] = 20 \cdot \log_{10} [h(\theta)]$.

Le transducteur est caractérisé par la largeur de son lobe principal b_w qui est communément définie pour un niveau de -3 dB, c'est-à-dire par l'angle d'ouverture du cône correspondant à la demi puissance rapportée à l'axe du faisceau $b_w = 2 \theta_{-3dB}$ (voir figure 3.9).

La profondeur est mesurée dans n'importe quelle direction à l'intérieur de ce cône.

La largeur du lobe est liée aux dimensions physiques du transducteur et à la fréquence des impulsions acoustiques. Par exemple, la largeur du lobe à $-3dB$ d'un transducteur assimilé à un piston circulaire de diamètre D , peut être exprimée par l'approximation :

$$b_w = 60 \lambda / D \text{ (en degrés)} \quad (3. 22)$$

et pour un transducteur à face rectangulaire de longueur L et de largeur W , les largeurs du lobe à $-3db$ dans les deux dimensions peuvent être respectivement exprimées par :

$$b_L = 50 \lambda / L \quad \text{et} \quad b_W = 50 \lambda / W \text{ (en degrés)} \quad (3. 23)$$

Pour une antenne linéaire (flûte ou *array*) à N transducteurs omnidirectionnels situés à la distance d les uns des autres, la somme des signaux individuels génère un faisceau directionnel représenté sur les figures 3.10 et 3.11.

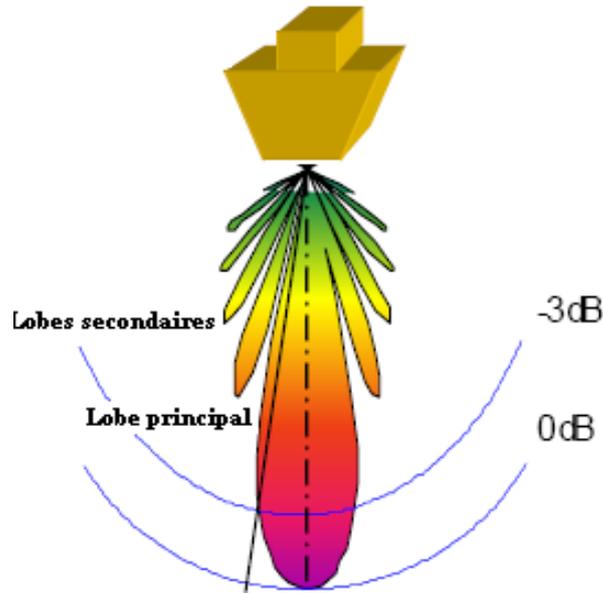


Fig. 3.9 « Largeur d'un faisceau à -3dB »

La direction de l'axe acoustique est perpendiculaire à celui de l'antenne linéaire et la largeur W du faisceau à -3dB est donnée approximativement par :

$$B_w = 50 \lambda / [(N-1)d] \text{ (en degrés)} \quad (3.24)$$

où λ est la longueur d'onde acoustique.

Le vecteur directionnel de l'antenne (*array*) est donné par [Kinsler et al, 1982] :

$$h_{\text{array}}(\theta) = \left| \frac{\sin\left(N\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta\right)}{N \cdot \sin\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta\right)} \right| \quad (3.25)$$

Principe de superposition : c'est la loi acoustique qui définit le gain directionnel $h(\theta)$ d'une antenne linéaire composée de N transducteurs comme étant le produit du gain directionnel h_e de chaque élément par le gain directionnel h_{array} de l'ensemble :

$$h(\theta) = h_e(\theta) \cdot h_{\text{array}}(\theta) \quad (3.26)$$

et l'amplitude de la pression est donnée par :

$$P(r, \theta, \phi) = P_{\text{ax}}(r) \cdot h_e(\theta, \phi) \cdot h_{\text{array}}(\theta, \phi) \quad (3.27)$$

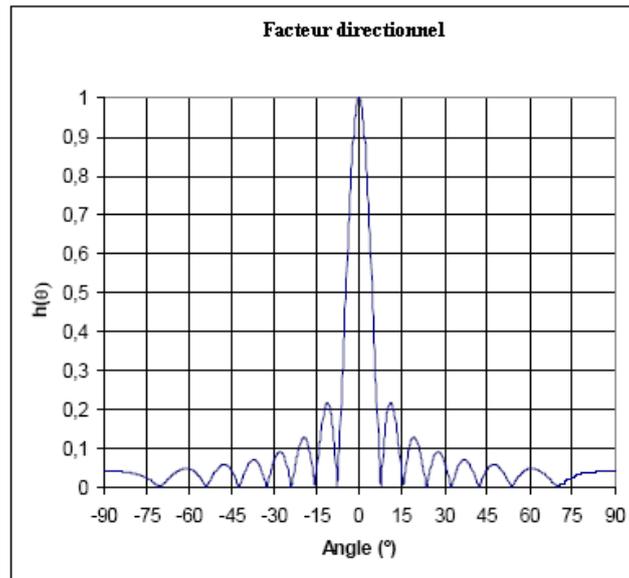


Fig. 3.10 « Gain directionnel »

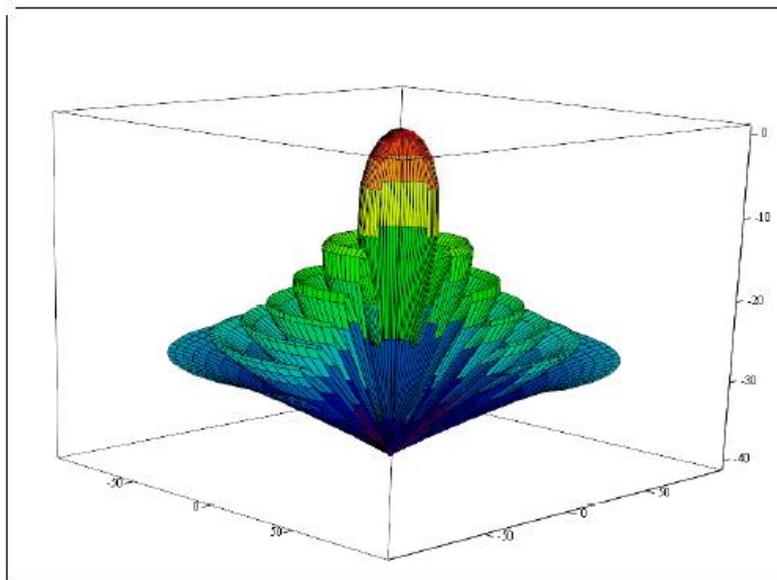


Fig. 3.11 « Lobes d'un faisceau perpendiculaire à la base d'un transducteur »

Pour un élément de l'antenne le gain directionnel est :

$$h_{\text{linear}}(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta\right)}{\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta} \right| \quad (3.28)$$

Le gain directionnel d'une antenne linéaire n'est valide que pour le champ lointain, situé à une distance telle que les deux ondes générées par l'élément central et un élément périphérique aient une différence de phase inférieure à 180°, soit :

$$k \sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - kR \leq \pi \quad (3.29)$$

où k est le numéro d'onde, c'est à dire $k = 2\pi/\lambda$.

Par exemple, pour une fréquence de 100 kHz et une antenne linéaire de transducteurs équidistants de $L = 0,5$ m, le champ lointain correspond à des distances supérieures à 4,0 mètres. Cette distance correspond aussi à la profondeur minimum mesurable.

Dans le champ rapproché, les interférences se traduisent par une représentation plus complexe de la pression acoustique.

L'axe du transducteur ou de l'antenne linéaire est normal à la face émettrice. Pour former des faisceaux qui ne soient pas normaux à la face émettrice, il est nécessaire d'orienter le faisceau au moyen de techniques d'orientation.

Le faisceau d'une antenne linéaire constituée de N éléments omnidirectionnels peut être orienté en introduisant une phase ou un retard de temps dans chaque élément. Le gain directionnel de chaque élément devient alors (Figure 3.12) :

$$h_{\text{array}}(\theta) = \frac{\left| \sin \left[N\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{\text{ax}}) \right] \right|}{\left| N \cdot \sin \left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{\text{ax}}) \right] \right|} \quad (3.30)$$

Cette formule correspond à une orientation de l'axe du faisceau dans la direction θ_{ax} (figure 3.13).

La formation du faisceau peut également être réalisée en introduisant un retard de temps ou une différence de phase à l'ensemble de l'antenne (équation 3.31).

Cette orientation répond au double objectif de stabiliser le faisceau et de former les voies lors de la phase de réception.

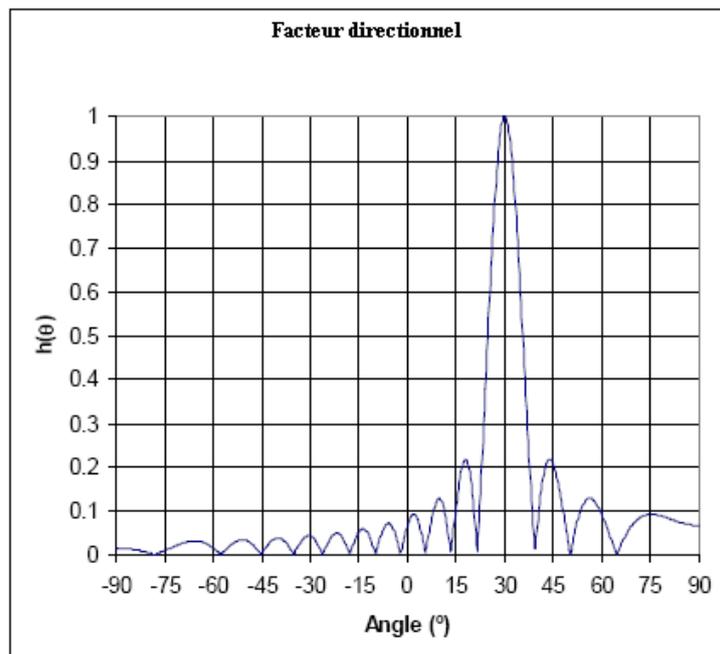


Fig. 3.12 « Gain directionnel d'un faisceau orienté à 30 degrés »

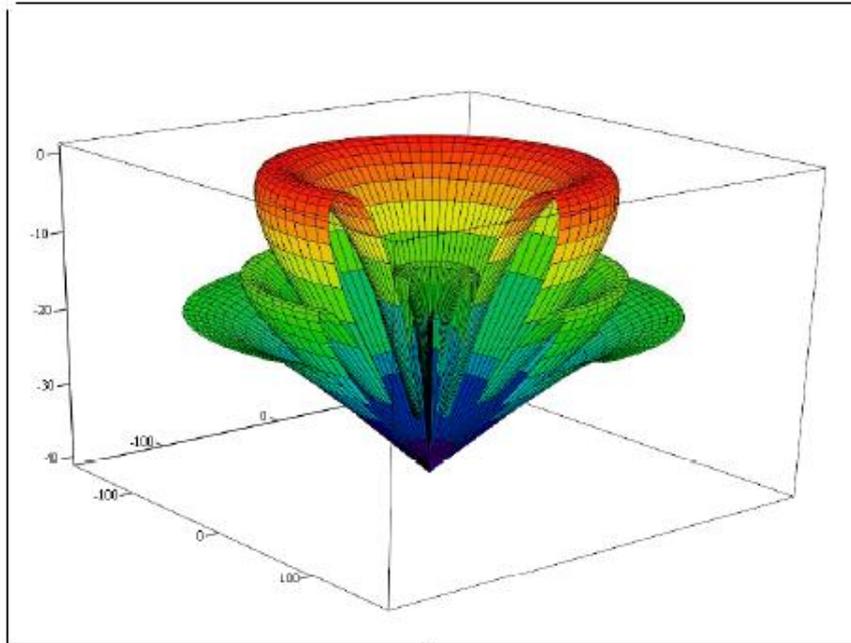


Fig. 3.13 « Lobes d'un faisceau orienté à 30 degrés »

Pour stabiliser le faisceau, il est nécessaire de mesurer l'angle qu'il forme avec la direction normale de l'antenne et de lui appliquer un retard de temps de :

$$\Delta t_n = \frac{nd}{c} \sin(\theta_{ax}) \quad (3.31)$$

Lors de la formation du faisceau, les signaux de chaque élément de l'antenne sont émis sur le même modèle mais avec un retard de temps différent qui permet d'obtenir à la réception un signal synchronisé. Le retard de temps à appliquer à un élément pour un canal ou un faisceau particulier est :

$$\Delta t_{n,i} = \frac{nd}{c} \sin(\theta_{ax_i}) \quad (3.32)$$

où **i** est l'ordre du faisceau et **n** le rang du transducteur dans l'antenne linéaire.

Considérons en effet deux transducteurs ponctuels qui émettent une impulsion à la même fréquence mais avec un retard de temps ; l'axe acoustique sera orienté dans la direction où le front d'onde provenant des deux sources arrive en même temps (Figure 3.14).

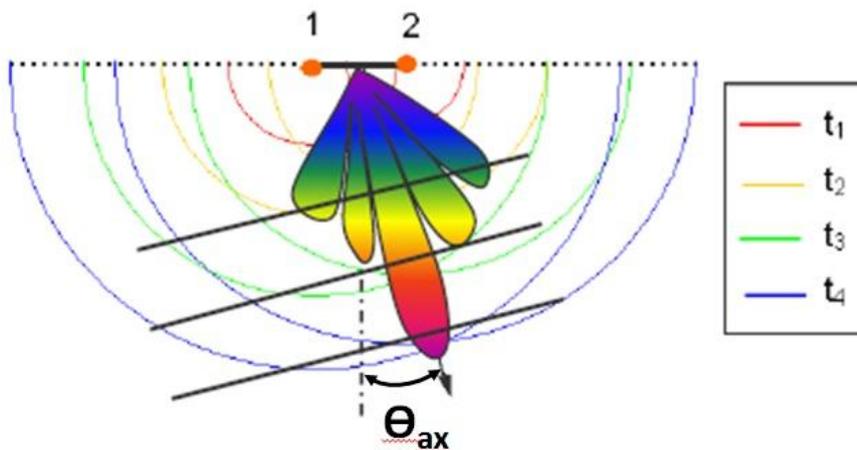


Fig. 3.14 « Faisceau formé par deux transducteurs émettant en temps décalé »

La largeur du lobe, normalement définie à -3dB, augmente avec l'angle d'orientation :

$$b_{w_i} = 50 \frac{\lambda}{(N-1)d \cdot \cos(\theta_{ax_i})} \quad (\text{en degrés}) \quad (3.33)$$

L'intersection d'un faisceau conique orienté avec le fond marin assimilé à un plan est une empreinte hyperbolique (Figure 3.15).

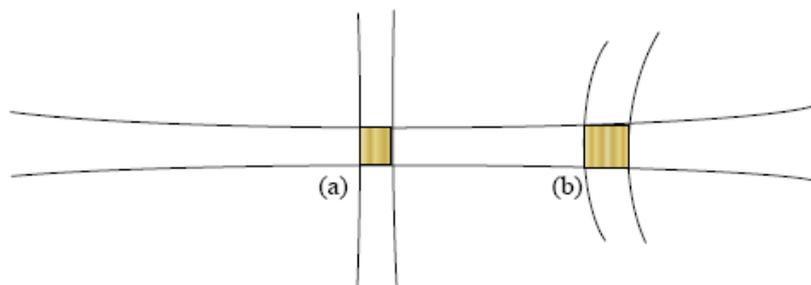


Fig. 3.15 « Empreinte linéaire (a) et hyperbolique (b) »

Les lobes secondaires ont des effets indésirables tels que la détection d'échos parasites. C'est le cas notamment des SMF qui utilisent des faisceaux à large ouverture où des sondes erronées peuvent être captées par des lobes secondaires orientés en direction du nadir ou d'une roche (Figure 3.16). Cet effet donne des contours bathymétriques onduleux qui ressemblent souvent à des formes en "oméga". La suppression de ces échos parasites est vitale pour un traitement réussi du SMF; elle est réalisée par application de gains sélectifs (*shading*) aux différents éléments du transducteur durant la réception des échos.

Considérant tous les éléments du transducteur dotés d'une même amplitude, les lobes secondaires présenteront une atténuation approximative de -13dB. La technique utilisée pour réduire les lobes secondaires est de leur superposer une fenêtre qui amplifie les signaux des différents éléments avec des gains différents. Ces fenêtres sont toujours symétriques par rapport au centre de l'antenne.

La fenêtre de Dolph-Chebyshev est la plus utilisée. Cette fenêtre a l'avantage d'optimiser le niveau des lobes secondaires pour des largeurs particulières du faisceau. Il produit un même niveau d'amplitude pour tous les lobes secondaires.

L'inconvénient de la superposition des fenêtres est une réduction de la directivité.

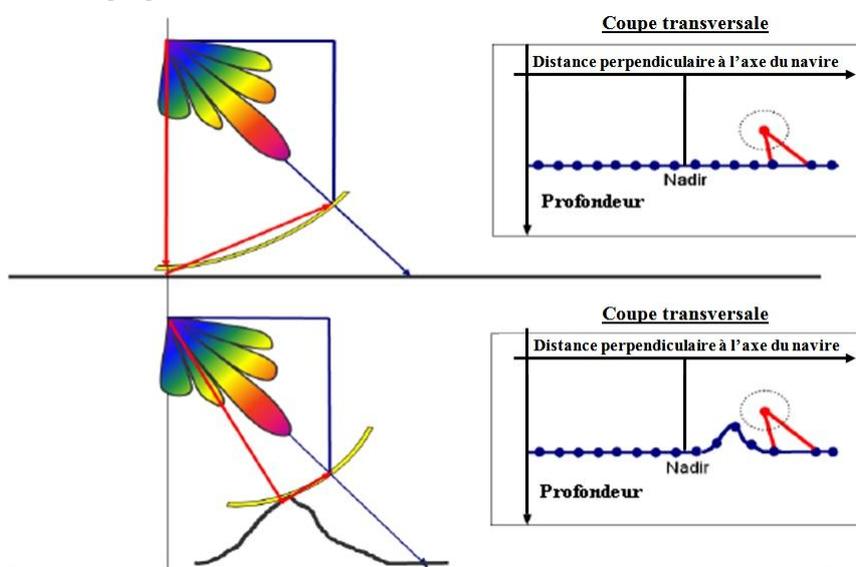


Fig. 3.16 « Faux échos erronés en profondeur et en position provenant de lobes secondaires »

4.3 Classification des sondeurs selon leurs types de faisceaux

Les sondeurs sont classés en monofaisceaux et multifaisceaux. Les sondeurs monofaisceaux peuvent comporter un ou plusieurs transducteurs tandis que les SMF sont toujours constitués de plusieurs éléments. Comme on l'a vu plus haut, cette configuration résulte du besoin de former les voies dans des directions multiples et parfois d'orienter le faisceau pour compenser l'attitude du navire.

4.3.1 Sondeurs monofaisceaux

Les sondeurs monofaisceaux n'ont besoin en principe que d'un transducteur pour l'émission et la réception, mais plusieurs transducteurs peuvent néanmoins être couplés, notamment pour assurer la stabilisation. La connaissance des angles de roulis et de tangage sont nécessaires.

La largeur du faisceau est fonction des dimensions du transducteur et de la longueur d'onde. Plus la fréquence sera élevée, plus large sera la base du transducteur et étroite l'ouverture du faisceau. Pour un faisceau étroit opérant en basse fréquence (grands fonds), il faudra donc un gros transducteur.

Un transducteur pour sondeur monofaisceau peut être à faisceau étroit quand une haute directivité est requise ou à faisceau large quand elle ne l'est pas, mais dans tous les cas, la priorité est donnée à la détection des profondeurs minimales et des obstacles sur le fond marin.

Les faisceaux larges ont la capacité de détecter des échos dans un angle solide largement ouvert, ce qui est utile pour la détection des dangers à la navigation demandant ultérieurement une investigation poussée. Ces faisceaux sont habituellement non stabilisés ; dans des conditions de mer normales, l'attitude des transducteurs est sans incidence sur les mesures.

Cependant, des faisceaux étroits, typiquement de 2 à 5 degrés, sont habituellement requis pour une haute résolution cartographique. (Figure 3.17). Ces faisceaux peuvent être stabilisés dans le but de mesurer les fonds à la verticale du transducteur.

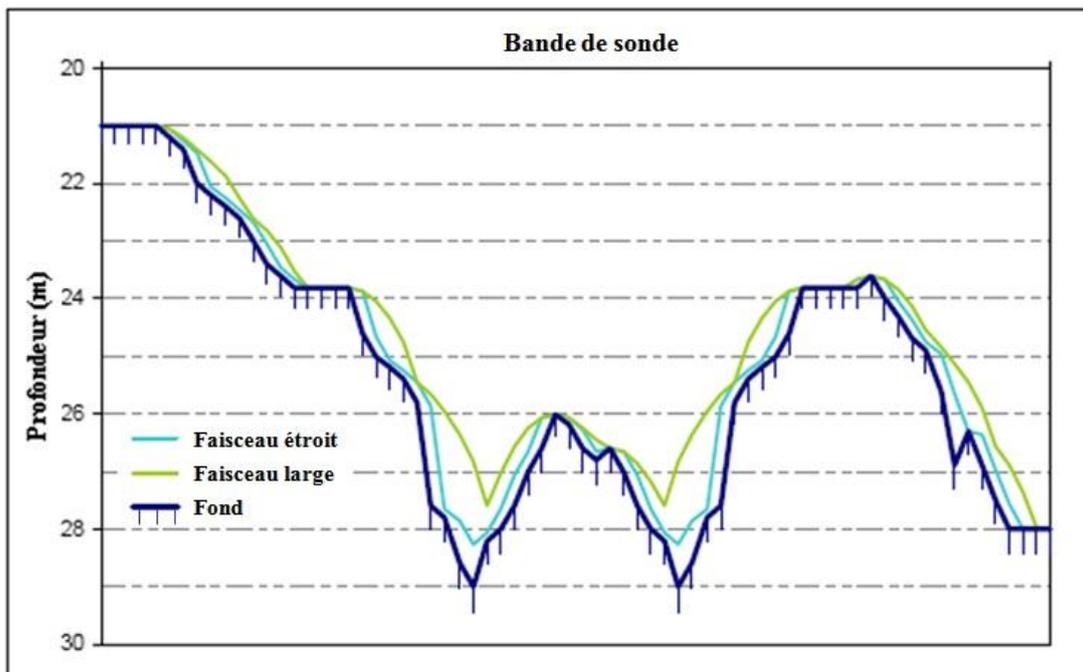


Fig. 3.17 « Influence de la largeur des faisceaux sur les profondeurs »

4.3.2 Sondeurs multifaisceaux

Les SMF sont généralement constitués de transducteurs séparés pour la transmission et pour la réception, c.-à-d. d'un projecteur dans l'axe du navire et d'un hydrophone perpendiculairement. La configuration courante est un faisceau en éventail, étroit dans le sens de la route et large par le travers.

Le récepteur détermine plusieurs faisceaux dans des directions prédéfinies, allongés parallèlement à l'axe de la route et étroits transversalement, ce qui garantit une intersection entre les faisceaux émis et reçus, et ce, quelle que soit l'attitude de la plateforme.

Le traitement des lobes secondaires est essentiel pour une mesure correcte des profondeurs et du positionnement du SMF. Les gains des lobes secondaires sont couramment inférieurs à -20 dB.

4.4 Classification selon le type d'installation

L'installation des transducteurs à bord du porte-sondeur peut être conçue de plusieurs manières. La décision du choix de l'installation dépend de l'encombrement du système, de la possibilité d'implanter la base à l'écart des bruits propres incluant les turbulences dues à l'écoulement de l'eau sous la quille et de la nécessité ou non de rapprocher le transducteur du fond. La base du transducteur peut être fixée sous la coque, être remorquée ou être hors-bord. Chacune de ces installations est décrite dans les paragraphes suivants.

4.4.1 Sondeurs de coque

C'est l'installation habituelle des sondeurs monofaisceaux et des sondeurs multifaisceaux à bord des grands navires, particulièrement de ceux qui sont destinés aux levés par grands fonds.

L'installation des bases de transducteurs sous la coque peut être réalisée de plusieurs façons :

4.4.1.1 Montage à plat coque (*flush mount*) - La base ne forme pas saillie avec le plan de la coque. Cette option peut être retenue pour les sondeurs monofaisceaux comme pour les multifaisceaux. L'avantage de cette solution est qu'il n'est pas nécessaire de prévoir une structure spéciale ; son inconvénient est que la base n'est pas à l'abri des bruits d'écoulement.

4.4.1.2 Montage sur sabot – La base est installée sur une petite structure profilée. Cette option peut être retenue pour les sondeurs monofaisceaux comme pour les multifaisceaux. L'avantage est la réduction des écoulements d'eau ; l'inconvénient est qu'il faut une structure spéciale.

4.4.1.3 Montage sur gondole - Le transducteur est installé sur une gondole fixée sous la coque (Figure 3.18). Cette option est utilisée pour le SMF, particulièrement pour les sondages en eaux profondes. Les avantages sont la réduction des bruits rayonnés et l'élimination des bruits d'écoulement quand l'eau circule entre la coque et la gondole. Les inconvénients sont la nécessité de prévoir une structure spéciale et une augmentation de tirant d'eau de l'ordre de 1 mètre.

4.4.2 Sondeurs remorqués

L'installation d'un transducteur dans un poisson remorqué est utilisée pour le sondeur latéral lorsqu'il est nécessaire d'avoir une bonne stabilité du transducteur, de réduire les bruits propres et de rapprocher le transducteur du fond.

4.4.3 Sondeurs hors-bord

Cette méthode d'installation utilisée indifféremment à bord des petits navires pour les sondeurs monofaisceaux et pour les SMF est destinée aux levés des petits fonds. L'implantation peut être

réalisée au moyen d'un tangon débordant de la muraille ou de l'étrave du navire. Le tangon qui porte le transducteur doit être rigide et résister à la torsion.



Fig. 3.18 « Installation sur gondole »



Fig. 3.19 « Sondeur hors-bord d'étrave »

4.5 Couverture du fond

La couverture du fond, c'est-à-dire la surface insonifiée par un sondeur monofaisceau est définie par l'intersection du faisceau conique par le fond. Son empreinte a pour diamètre (Figure. 3.20) :

$$a = 2 \cdot z \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3.34)$$

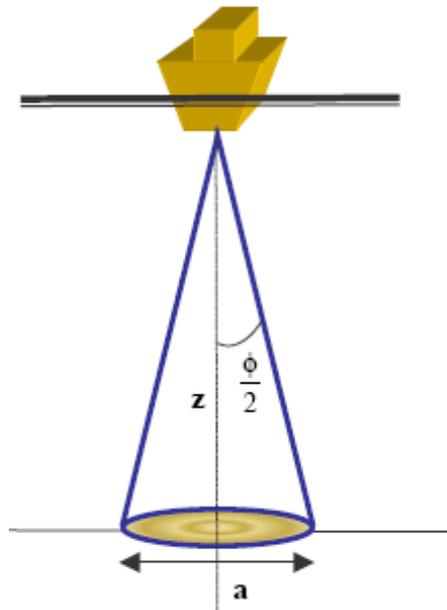


Fig. 3.20 « Couverture du fond par un faisceau vertical simple »

La surface insonifiée par un sondeur multifaisceaux est définie par l'intersection des faisceaux émis et reçus, laquelle dépend de l'inclinaison et de la largeur du faisceau, de la profondeur et de la pente moyenne du fond. La surface insonifiée par chaque faisceau est approximativement elliptique. En supposant le fond plat et horizontal, la largeur transversale a_y de cette ellipse (perpendiculairement au profil suivi par le navire) est approximativement égale à :

$$a_y = \frac{2z}{\cos^2(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_R}{2}\right) \quad (3.35)$$

où z est la profondeur moyenne, β l'angle d'inclinaison du faisceau et ϕ_R la largeur transversale du faisceau de réception. En présence d'une pente définie par un angle ζ , la largeur transversale de l'empreinte acoustique devient approximativement :

$$a_y = \frac{2z}{\cos(\beta)\cos(\beta - \zeta)} \tan\left(\frac{\phi_R}{2}\right) \quad (3.36)$$

Par fond plat, la largeur longitudinale a_x (dans la direction du profil) de l'empreinte de l'ellipse, est approximativement égale à :

$$a_x = \frac{2z}{\cos(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_T}{2}\right) \quad (3.37)$$

où ϕ_T est la largeur du faisceau transmis.

La couverture surfacique du fond est fonction des dimensions de la zone insonifiée, de l'espacement des faisceaux perpendiculairement au profil, de la fréquence de répétition, de la vitesse du navire, des lacets, du roulis et du tangage. Afin d'obtenir une couverture totale, les zones insonifiées par des pings consécutifs doivent se chevaucher afin que chaque point de la surface reçoive au moins une impulsion acoustique.

Par fond plat, l'ouverture angulaire de la fauchée est exprimée par :

$$S_w = 2z \cdot \tan\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (3.38)$$

où $\Delta\theta$ est l'angle formé par les deux faisceaux extrêmes utilisables du SMF encadrant la zone effectivement couverte par le levé hydrographique.

5. SYSTEMES ACOUSTIQUES

Cette section est consacrée à la description des systèmes acoustiques utilisés durant les levés hydrographiques. Ces systèmes sont classés en fonction de leur couverture du fond ; ils comprennent les sondeurs monofaisceaux et les systèmes à balayage, SMF et sonars⁴³ interférométriques.

5.1 Sondeurs monofaisceaux

Ces sondeurs sont utilisés pour la détermination de la profondeur en mesurant l'intervalle de temps entre l'émission de l'impulsion sonore ou ultrasonore et le retour de l'écho réfléchi par le fond.

A l'origine, l'objectif principal du sondeur vertical était de produire un profil continu à haute résolution du fond à partir d'un enregistrement des échos. La bande de sonde était interprétée avec prudence afin de procéder manuellement au choix de sondes.

Au cours des dernières décennies, la technologie des sondeurs monofaisceaux a été progressivement améliorée avec introduction de sorties numériques, élimination des pièces mobiles des enregistreurs et mention des positions sur les bandes de sonde. Plus récemment, l'intégration d'ordinateurs et de processeurs à la construction a permis un traitement du signal encore plus sophistiqué et la représentation des données sur des consoles en couleurs à la place des enregistrements papier.

5.1.1 Principes de fonctionnement

Un sondeur fonctionne par transformation de l'énergie électrique du générateur d'impulsion en énergie acoustique. Comme le transducteur n'émet pas dans toutes les directions, l'énergie acoustique est transmise dans l'eau par un faisceau orienté verticalement.

L'impulsion acoustique traverse la colonne d'eau et frappe le fond où elle est réfléchi, réfractée ou dispersée.

L'énergie réfléchi (l'écho) en retour est captée par le transducteur. La force de l'écho décroissant rapidement avec le temps, elle est automatiquement compensée selon son niveau d'énergie au moyen du contrôle automatique de gain (AGC) réglé en usine et du gain variable avec le temps (TVG). Après amplification, le signal électrique est transféré à un détecteur d'enveloppe et comparé au réglage de seuil afin de filtrer le bruit. Le signal de sortie est alors visualisé et enregistré.

⁴³ Systèmes utilisés pour déterminer la distance d'un objet sous-marin en mesurant l'intervalle de temps entre l'émission d'un signal sonore ou ultrasonore et la réception du signal réfléchi. Origine du nom : *SOUND Navigation and Ranging*.

Le résultat observé est l'intervalle de temps t entre l'émission de l'impulsion et la réception de l'écho. La profondeur mesurée z_m est égale à :

$$z_m = \frac{1}{2} \cdot t \cdot \bar{c} \quad (3.39)$$

où \bar{c} est la célérité moyenne du son dans la colonne d'eau.

5.1.1.1 Les paramètres du sondeur doivent être initialisés correctement afin d'obtenir une bonne précision et un enregistrement clair du fond. Les paramètres les plus importants sont :

- a) **La puissance** : La portée du sondeur dépend de la longueur d'impulsion, de la fréquence et de la puissance transmise. Pour optimiser l'utilisation du sondeur, la puissance doit être réglée au niveau le plus faible compatible avec une détection adéquate car son augmentation, qui permet sans doute de récupérer davantage d'échos, se traduit aussi par une augmentation de la réverbération et un mauvais enregistrement. De plus, la puissance est limitée par la cavitation⁴⁴ et par les contraintes mécaniques imposées au transducteur.
- b) **Le gain** : Le gain n'est autre que l'amplification du signal. S'il est augmenté, le bruit l'est également et peut nuire à la clarté des enregistrements. Il est recommandé de régler le gain en fonction de la nature du fond et de la puissance d'émission.
- c) **Le réglage du niveau d'enregistrement** : Ce paramètre est utilisé sur les enregistreurs des sondeurs analogiques.
- d) **La longueur d'impulsion** : Normalement, la longueur d'impulsion est réglée automatiquement avec la portée. La longueur d'impulsion conditionne la résolution verticale du sondeur et les impulsions courtes permettent une meilleure résolution. Il peut être nécessaire d'augmenter la longueur d'impulsion dans les régions de mauvaise réflectivité ou dans les zones de fortes pentes.

Dans les eaux peu profondes où la résolution est un facteur important, il est nécessaire au contraire d'utiliser des impulsions courtes afin de réduire la probabilité de faux échos causés par une forte réverbération.
- e) **L'échelle** : est la gamme (ou la portée) d'enregistrement du sondeur. La largeur de la bande de sonde étant fixe; la résolution verticale est faible pour les grands fonds.
- f) **Les fenêtres de réception** : L'ouverture de fenêtres de réception décalées en phase est une façon de s'affranchir des limitations imposées par l'enregistrement du fond sur une bande de sonde de largeur imposée. L'ouverture manuelle ou automatique d'une fenêtre de réception encadrant le fond permet de conserver une échelle suffisamment grande et une résolution verticale satisfaisante, quelle que soit la profondeur de l'eau. (Figure 3.21).
- g) **Le tirant d'eau** : Ce paramètre correspond à l'immersion du transducteur. Pour corriger les profondeurs du tirant d'eau instantané, celui-ci doit être observé au début des travaux et contrôlé de nouveau à la fin des sondages.
- h) **La vitesse de défilement du papier** : Cette vitesse est particulièrement importante. Elle doit être choisie de manière à garantir une bonne résolution horizontale des mesures.

⁴⁴ Ce phénomène se traduit par la formation de bulles à proximité du transducteur. Il survient quand la pression acoustique excède la pression hydrostatique.

- i) **La célérité** : La valeur nominale de la vitesse du son doit correspondre à la célérité moyenne dans la zone de travaux. Pour les levés de haute précision, la célérité peut être calée sur sa valeur à l'immersion du transducteur ou à 1500 m/sec, mais par la suite, les profondeurs doivent être corrigées du profil de célérité réel lors du traitement des données.

Pour les sondeurs analogiques classiques, ce paramètre n'est pas une célérité observée mais un réglage des composants mécaniques et électriques réalisé par calage exact de la profondeur mesurée sur une profondeur réelle observée (étalonnage à la barre).

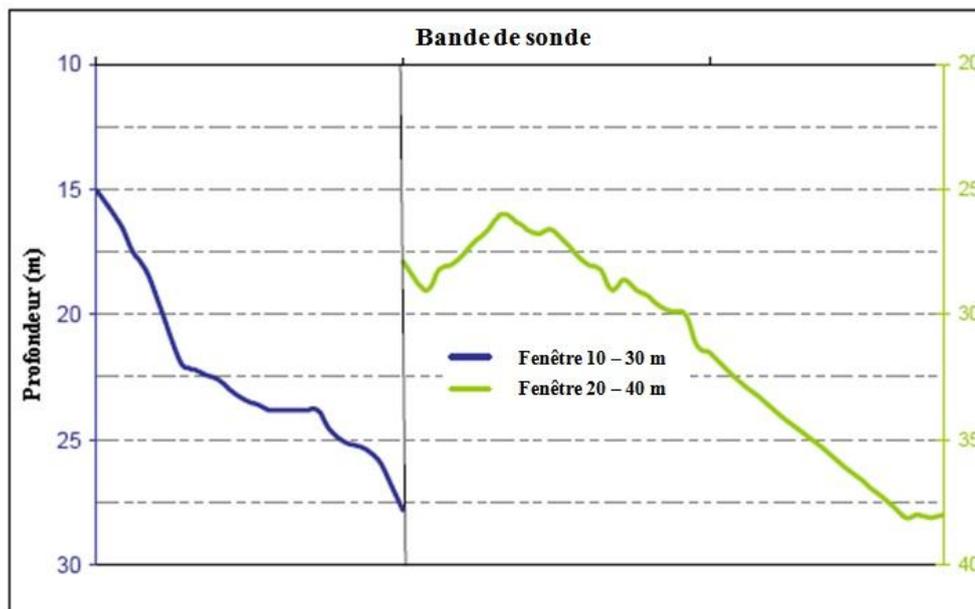


Fig. 3.21 « Fenêtres de réception »

Le principe général du sondeur monofaisceau vient d'être décrit, cependant il est encore possible d'identifier dans cette catégorie deux types de sondeurs, numériques ou analogiques.

Le cycle du sondeur analogique traditionnel, dont le diagramme est représenté à la figure 3.22, commence par le déclenchement d'une impulsion électrique et l'émission d'un signal de puissance dans l'eau. Après réception de l'écho et conversion de celui-ci en énergie électrique, le signal de faible voltage est pré-amplifié et transmis à un amplificateur d'enregistrement qui trace l'écho sur la bande de sonde. Celle-ci est un enregistrement graphique des mesures de profondeurs obtenues avec des résolutions verticales et horizontales adéquates. Une fois ce cycle complété, un autre recommence.

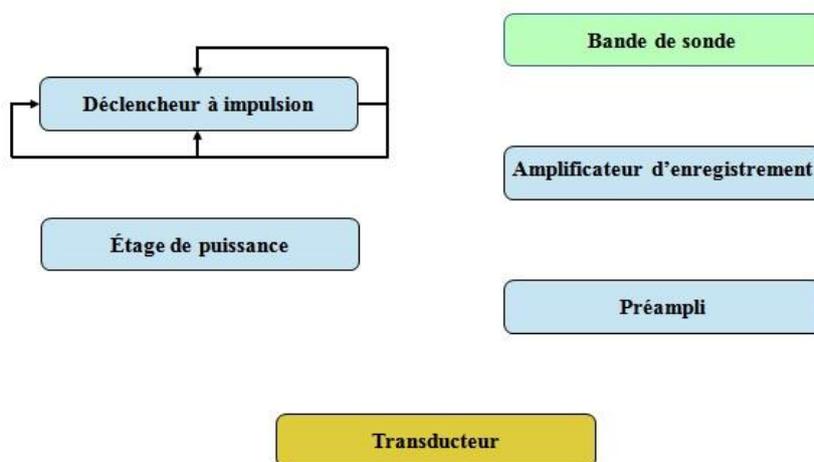


Fig. 3.22 « Schéma fonctionnel d'un sondeur analogique »

Les sondeurs hydrographiques pour petits fonds sont généralement bi-fréquences (haute et basse).

L'enregistrement simultané de deux fréquences permet de séparer les retours du fond entre les sédiments meubles et les roches sous-jacentes grâce à leurs différences d'impédance acoustique.

Le sondeur numérique (voir figure 3.23) fonctionne de façon similaire au sondeur analogique pour la transmission du signal, mais à la réception de l'écho, le signal reçu est amplifié en fonction du temps (gain variable avec le temps) et envoyé à un détecteur d'enveloppe qui le convertit dans le format numérique utilisé pour la représentation de la profondeur. Ceci permet à l'information d'être enregistrée et affichée en plusieurs formats.

5.1.1.2 **Précision** : La précision des sondes est fonction de plusieurs facteurs dépendants du sondeur lui-même et du milieu. Le bilan d'erreurs est généralement basé sur ces facteurs (voir 5.1.4).

5.1.1.3 **Résolution** : La résolution est la capacité de séparer les échos provenant d'objets proches ; elle est généralement exprimée comme la distance minimale entre deux objets dont les traces peuvent être distinguées. Dans la mesure des profondeurs, la résolution verticale est un paramètre important qui dépend des facteurs suivants :

- a) durée d'impulsion : les impulsions les plus longues ont la plus petite résolution (voir 2.4.3). Deux objets à l'intérieur d'un faisceau étroit seront enregistrés comme un seul écho si la distance qui les sépare est inférieure à une demi-longueur d'impulsion; ils seront perçus comme deux échos séparés dans le cas contraire ;
- b) sensibilité et résolution de l'enregistrement ;
- c) largeur du faisceau émis.

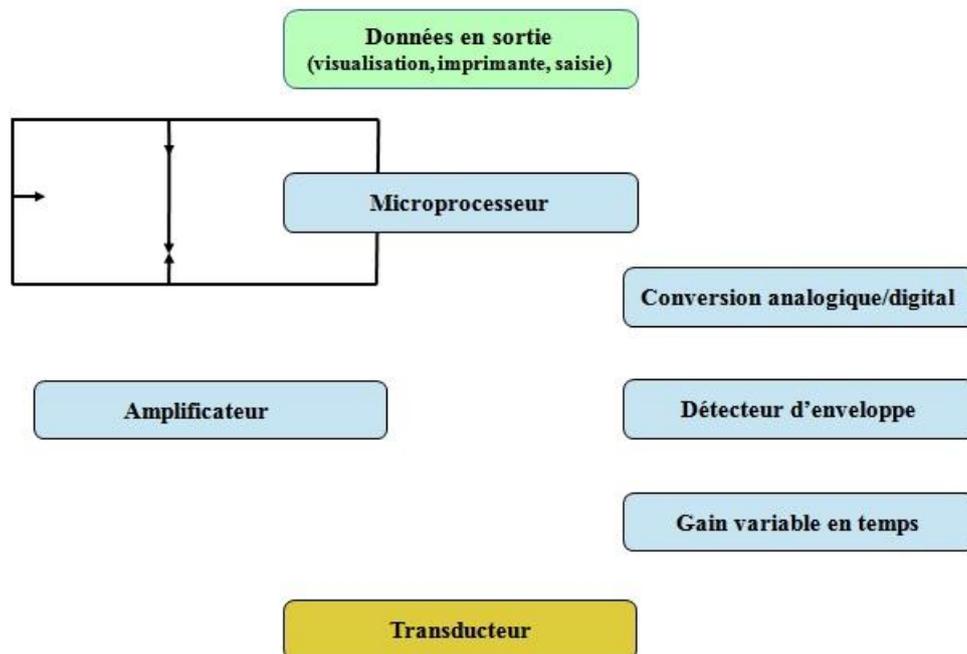


Fig. 3.23 « Schéma fonctionnel d'un sondeur numérique »

5.1.1.4 **La fréquence** du sondeur est choisie en fonction de l'utilisation recherchée, c.-à-d. de la gamme de mesure des profondeurs. Dans certains cas il est préférable d'utiliser un même équipement pour plusieurs profondeurs. À cet effet, les sondeurs peuvent avoir plusieurs fréquences et plusieurs bases de transducteur dans le but d'améliorer l'acquisition et la qualité des données.

Les fréquences sont souvent associées à des canaux. Les sondeurs à deux canaux sont principalement utilisés pour les petits fonds et les eaux côtières; pour les grands fonds, on utilise généralement une seule fréquence basse.

5.1.2 Installation et étalonnage

Le transducteur peut être fixé sous la coque ou en montage hors-bord, sur le côté ou devant l'étrave. Le transducteur doit être le plus éloigné possible des sources de bruit du navire et suffisamment profond pour ne pas être gêné par le bruit de surface et pour rester immergé même par mer agitée. Il est également important que le transducteur soit fixé solidement et orienté verticalement. Il est souhaitable enfin que le compensateur de pilonnement et l'antenne de positionnement soient situés sur le même axe vertical que celui du transducteur.

L'étalonnage est une tâche de routine qui consiste à régler le sondeur afin de garantir la précision des mesures de profondeur. L'étalonnage peut être exécuté au moyen d'une barre d'étalonnage métallique ou d'un transducteur spécial ; il a pour but d'ajuster la célérité instrumentale. Les sondes peuvent également être corrigées en fonction du profil de célérité au cours de la phase de traitement différé.

L'étalonnage des sondeurs petits fonds pour une célérité moyenne de la colonne d'eau peut être réalisé selon les méthodes suivantes :

- a) L'étalonnage à la barre consiste à descendre une barre ou une plaque métallique sous le transducteur à différentes profondeurs (par exemple tous les deux mètres). On enregistre alors les corrections à appliquer lors du traitement des données ou on force le sondeur à afficher l'immersion de la barre d'étalonnage en jouant sur le réglage de célérité (Figure 3.24). En pareil cas, la valeur adoptée pour l'étalonnage est la valeur moyenne des observations. Cette méthode peut être utilisée jusqu'aux fonds de 20 à 30 mètres.

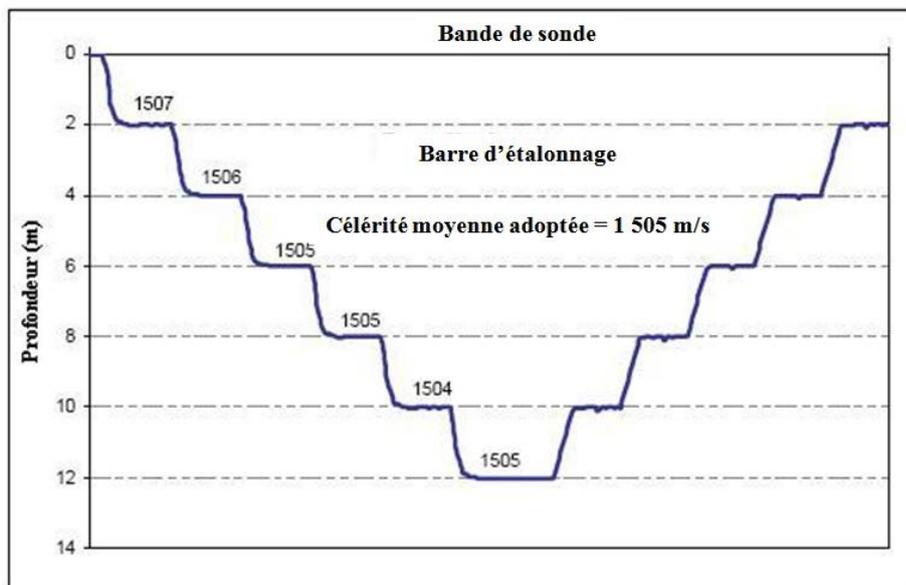


Fig. 3.24 « Étalonnage à la barre »

- b) Le transducteur d'étalonnage est un appareil destiné à calibrer le sondeur à partir de la distance parcourue par un signal. La procédure d'étalonnage consiste à faire afficher par le sondeur la distance parcourue par le signal du transducteur d'étalonnage en jouant sur le réglage de célérité. Le transducteur est descendu à plusieurs profondeurs et le sondeur est réglé en conséquence, chaque réglage n'étant valable que pour la profondeur correspondante. La valeur d'étalonnage adoptée doit être la moyenne de toutes les observations. Cette méthode peut être utilisée jusqu'aux fonds de 20 à 30 mètres.

- c) Une méthode combinée utilisant le transducteur d'étalonnage et un profil de célérité peut aussi être utilisé pour des profondeurs supérieures à celles mentionnées plus haut. Le sondeur est réglé selon la procédure décrite au (b) ci-dessus et on la corrige avec le profil de célérité. Dans les sondeurs plus modernes, la célérité est réglée sur sa valeur réelle.

La correction de célérité est appliquée aux sondes durant la phase de traitement en faisant l'hypothèse que les données ont été acquises avec la célérité vraie à l'immersion du transducteur. La correction est basée sur la différence entre la vitesse du son adoptée pendant les sondages et la moyenne harmonique des célérités du profil.

Pour les profondeurs supérieures à 200 mètres, il n'est plus requis d'appliquer aux sondes une correction de célérité. Une célérité de 1 500 m/s est généralement affichée où les valeurs peuvent être choisies dans les tables de Matthews (Publication N.P. 139 de l'UKHO).

5.1.3 Mise en œuvre du sondeur monofaisceau et enregistrement des données

La mise en œuvre de chaque sondeur doit être conforme à sa notice. Il est néanmoins important de souligner les aspects suivants :

- avant le début des sondages le sondeur doit être étalonné pour la célérité ;
- une gamme de portée adaptée aux fonds prévus doit être sélectionnée ;
- la fréquence doit être adaptée à la portée recherchée ;
- lors de l'utilisation d'un sondeur analogique, il est essentiel d'ajuster les gains de réception et d'enregistrement pour produire un tracé lisible.

5.1.4 Sources d'erreurs et techniques de contrôle de qualité

Les erreurs de mesure peuvent être divisées en trois catégories : erreurs grossières, erreurs systématiques et erreurs aléatoires.

Les erreurs grossières sont relatives aux défauts mécaniques ou électroniques de l'équipement.

Les erreurs systématiques sont principalement le résultat de décalages (erreurs fixes) ou de biais (erreurs variables en fonction des conditions) des capteurs d'attitude du porte-sondeur, d'un mauvais alignement du transducteur ainsi que de toutes autres erreurs angulaires affectant les capteurs. Ces erreurs peuvent être facilement corrigées si leur signe et leur module sont identifiés. Cette catégorie d'erreurs peut être déterminée et supprimée à l'étalonnage.

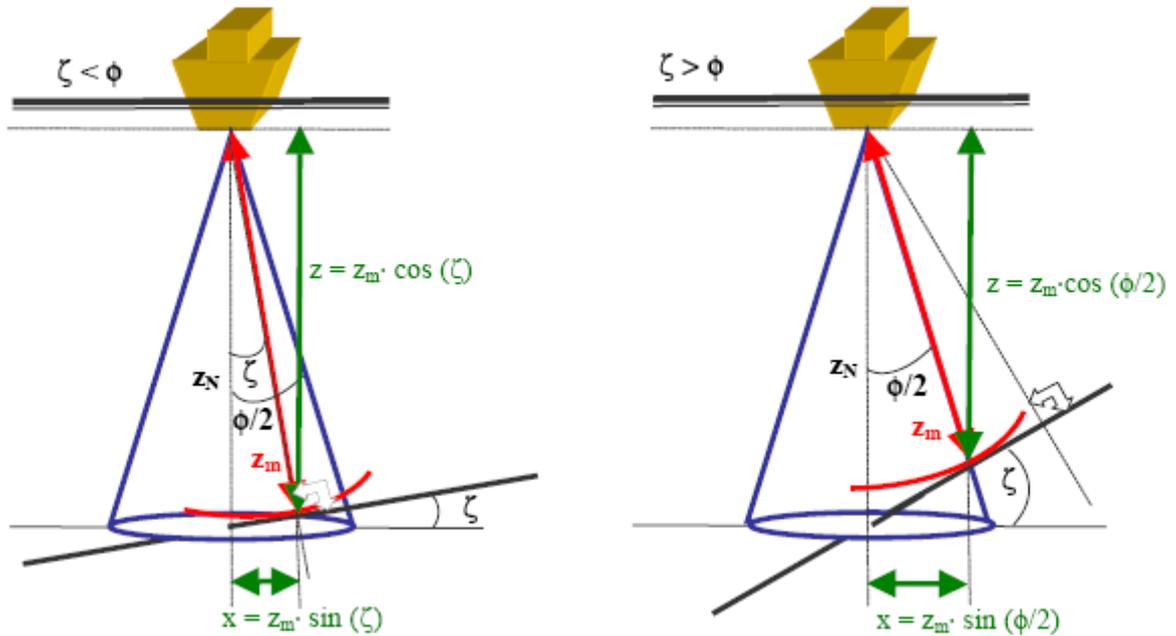
Après suppression des erreurs grossières et des erreurs systématiques, il reste les erreurs aléatoires qui peuvent être analysées par méthodes statistiques.

Les hydrographes doivent avoir conscience des sources d'erreurs et de leur incidence sur les sondes. Cette section en identifie plusieurs et présente les techniques usuelles de contrôle de qualité.

- 5.1.4.1 Erreurs de pente : En prenant en considération les différentes pentes représentées à la figure 3.25, l'erreur sur la mesure de la profondeur Δz dépend de l'ouverture du faisceau et de son inclinaison. Si aucune correction n'est appliquée, l'erreur de pente sera exprimée par :

$$dz = \begin{cases} z_m (\sec(\zeta) - 1) & \text{pour } \zeta < \frac{\phi}{2} \\ z_m \left(\sec\left(\frac{\phi}{2}\right) - 1 \right) & \text{pour } \zeta > \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (3.40)$$

où $\frac{\phi}{2}$ est la demi-ouverture du faisceau et ζ la pente du fond.



a) pente inférieure à la demi-ouverture du faisceau

b) pente supérieure à la demi-ouverture du faisceau

Fig. 3.25 « Effets de la pente et de l'angle d'ouverture sur la valeur et le positionnement de la sonde »

5.1.4.2 Erreurs dues à la célérité: Il est difficile de bien suivre les variations de célérité. Pour les sondeurs monofaisceaux, l'erreur ($d\mathbf{z}_m$) affectant la sonde est proportionnelle à l'erreur ($d\mathbf{c}$) de célérité moyenne et au temps (ou à la profondeur) :

$$dz_c = \frac{1}{2} \cdot t \cdot dc \quad (3.41)$$

ou

$$dz_c = z \cdot \frac{dc}{c} \quad (3.42)$$

L'amplitude de l'erreur de célérité varie selon :

- la précision de la mesure de célérité
- la variation temporelle de la célérité
- la variation spatiale de la célérité

Noter que la variance de la profondeur $\sigma_{z_c}^2$, due aux erreurs de mesures et aux variations de célérité s'écrit :

$$\sigma_{z_c}^2 = \left(\frac{z}{c}\right)^2 (\sigma_{c_m}^2 + \sigma_c^2) \quad (3.43)$$

où $\sigma_{c_m}^2$ est la variance de la mesure de célérité et σ_c^2 la variance des fluctuations temporelles et spatiales de la célérité.

Les variations temporelles et spatiales de la célérité sont une contribution externe majeure aux erreurs de mesure des profondeurs. Durant la planification ou au début des travaux, il est important de procéder à un certain nombre de relevés de célérité répartis dans la zone et à différents moments de la journée, afin d'aider les hydrographes à choisir en connaissance de cause la fréquence et la position des profils de célérité à effectuer au cours du levé.

5.1.4.3. Erreurs dues à la mesure du temps : Un sondeur convertit en profondeurs des mesures de temps, aussi l'erreur $d\mathbf{t}$ sur la mesure du temps est-elle directement liée à l'erreur $d\mathbf{z}_t$ sur la

sonde. Dans les sondeurs modernes l'erreur de mesure du temps est généralement petite et constante et elle est prise en considération durant l'étalonnage.

$$dz_t = \frac{1}{2} c \cdot dt \quad (3.44)$$

L'erreur principale provient de l'identification exacte du point adopté au milieu de l'écho, c.-à-d. des algorithmes utilisés pour la détection du signal.

A noter que la variance $\sigma_{z_t}^2$ de l'erreur de profondeur due à l'erreur de mesure du temps, s'écrit:

$$\sigma_{z_t}^2 = \left(\frac{1}{2}c\right)^2 \sigma_{t_m}^2 \quad (3.45)$$

où $\sigma_{t_m}^2$ est la variance de l'erreur de mesure du temps.

5.1.4.4 Erreurs dues au roulis, au tangage et au pilonnement : Le roulis et le tangage contribuent à l'erreur de profondeur quand leurs angles dépassent la demi-ouverture $\phi/2$ du faisceau. La figure 3.26 représente les erreurs de mesure sur la valeur et le positionnement d'une sonde dues à un roulis d'angle θ_R ; cette figure est valable pour le tangage en changeant θ_R en θ_T .

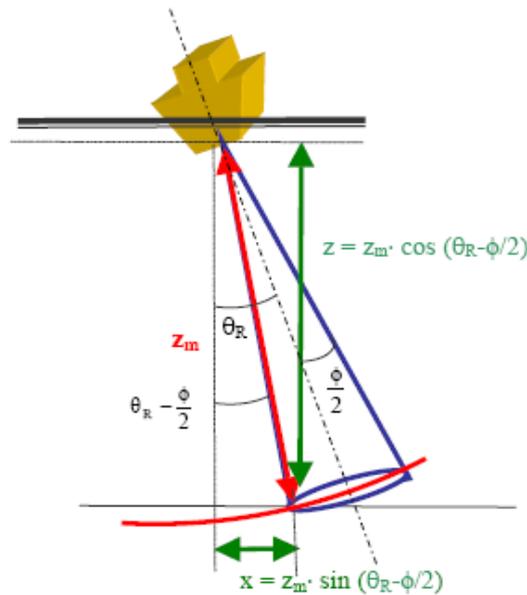


Fig. 3.26 « Effet du roulis et de l'angle d'ouverture sur la valeur et le positionnement de la sonde »

Un sondeur à faisceau large n'est pas sensible au roulis et au tangage du navire hydrographique.

Pour les sondeurs à faisceau étroit, cet effet peut être compensé par stabilisation, par exemple, en maintenant mécaniquement le faisceau à la verticale indépendamment de l'attitude du bâtiment ou en compensant par le calcul la profondeur mesurée en lui appliquant la correction instantanée suivante :

$$dz_{\text{roulis}} = \begin{cases} z_m \left[1 - \cos \left(\theta_R - \frac{\phi}{2} \right) \right] & \text{pour } \theta_R > \frac{\phi}{2} \\ 0 & \text{pour } \theta_R < \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (3.46)$$

Le pilonnement (\mathbf{h}) du porte-sondeur sous l'effet des vagues et de la houle est mesuré au moyen de capteurs inertiels ou d'un compensateur de pilonnement. Celui-ci doit être placé au-dessus du transducteur pour mesurer le pilonnement sur le même axe vertical.

L'installation des capteurs inertiels doit être proche du centre de gravité du navire hydrographique et le vecteur reliant le centre de gravité au transducteur doit être connu. Connaissant les angles instantanés de roulis et de tangage, le pilonnement mesuré \mathbf{h}_m peut être transformé en pilonnement du transducteur \mathbf{h}_t par addition du pilonnement induit \mathbf{h}_i , (Figure 3.27).

$$h_t = h_m + h_i \quad (3.47)$$

Pour calculer le pilonnement induit, il faut assimiler le porte-sondeur à un corps rigide libre de tourner autour des trois axes (x, y, z) décrits au § 3. La rotation en roulis et tangage autour du centre de gravité auprès duquel le pilonnement est généralement mesuré correspond à l'écart de profondeur du transducteur mesuré dans le système de référence du navire (identifié par la lettre **N**) par rapport au système local de coordonnées (identifié par la lettre **L**). Cet écart est appelé pilonnement induit.

Le pilonnement induit adapté à partir de Hare (1995) pour le système de référence défini au § 3 et à l'annexe A, est égal à :

$$h_i = z_t^L - z_t^V = -x_t^V \sin(\theta_T) + y_t^V \cos(\theta_T) \sin(\theta_R) + z_t^V (\cos(\theta_T) \cos(\theta_R) - 1) \quad (3.48)$$

où θ_R est l'angle de roulis, θ_T est l'angle de tangage et (x_t, y_t et z_t) sont les coordonnées du transducteur à l'instant t .

L'erreur totale sur la profondeur mesurée due au pilonnement est alors :

$$dh = dh_m + dh_i \quad (3.49)$$

où dh_m est l'erreur de mesure du pilonnement et dh_i l'erreur de détermination du pilonnement induit.

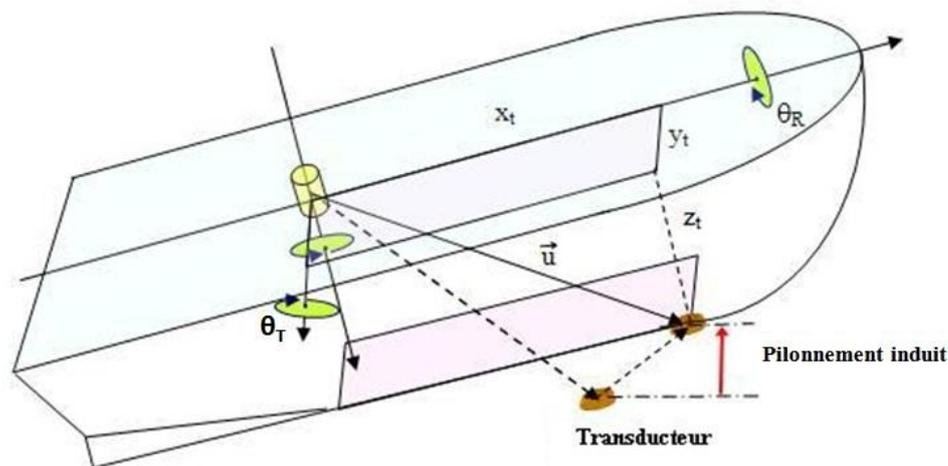


Fig. 3.27 « Pilonnement induit »

Noter que la variance du pilonnement induit est dépendante de la précision des calages (*offsets*) du transducteur, du capteur de mouvement et des précisions angulaires en roulis et tangage (Hare, 1995).

La variance totale du pilonnement correspond à la variance de la profondeur, σ_h^2 , c.-à-d. :

$$\sigma_h^2 = \sigma_{h_m}^2 + \sigma_{h_i}^2 \quad (3.50)$$

où $\sigma_{h_m}^2$ est la variance du pilonnement mesuré et $\sigma_{h_i}^2$ la variance du pilonnement induit. Cette dernière erreur est normalement négligeable quand elle est comparée à l'erreur de mesure du pilonnement.

Quand il n'y a pas de compensation de pilonnement, il faut lisser manuellement les enregistrements. Cette tâche nécessite une grande expérience dans l'interprétation des tracés afin de préserver l'allure des fonds. Quand les mouvements de plateforme ne sont pas trop marqués, la procédure admise consiste à lisser le tracé du fond à mi-distance* entre les creux et les crêtes (Figure 3.28).

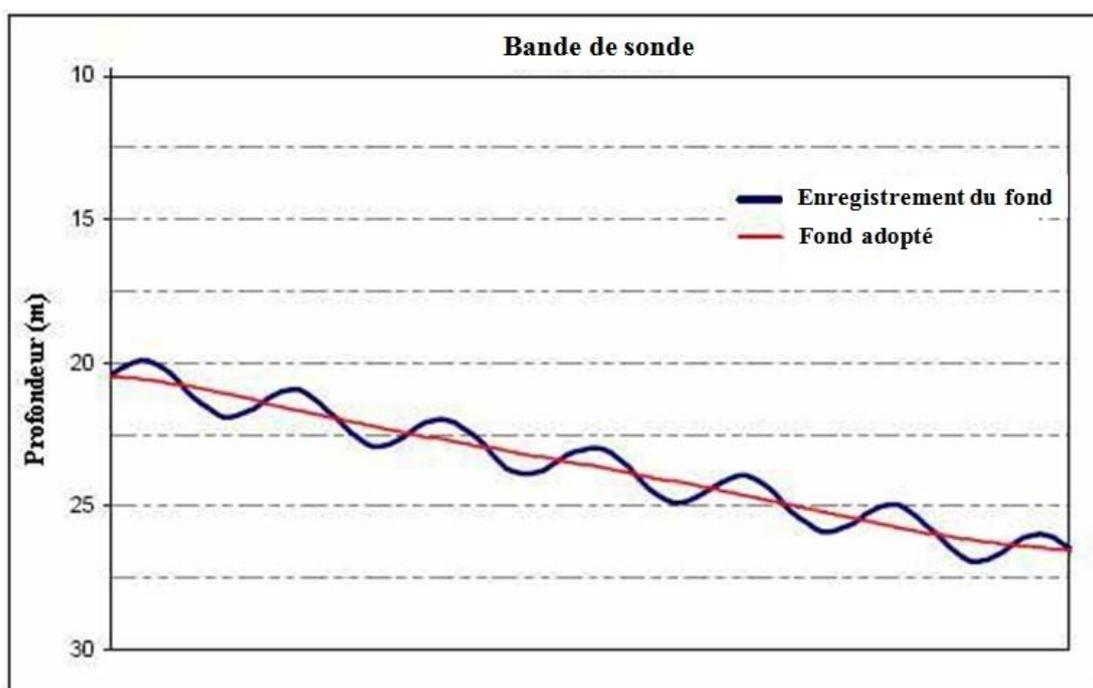


Fig. 3.28 « Filtrage manuel du pilonnement »

5.1.4.5 Erreurs dues au tirant d'eau, au surenfoncement, à l'accroupissement et à la position relative du transducteur : La mesure de l'immersion (ou tirant d'eau) de la base est fondamentale pour une mesure précise de la profondeur et sa valeur doit être entretenue durant le levé ; les causes de sa variation sont dues principalement à la consommation d'eau et de carburant. La variation du tirant d'eau, pour un même déplacement, augmente avec la diminution de la flottabilité. L'erreur $dz_{\text{tirant d'eau}}$ se propage directement comme une erreur de profondeur.

Le surenfoncement (*settlement*) se traduit par un enfoncement du bâtiment de sondage quand il est en route par rapport à son tirant d'eau stoppé. Ce phénomène qui est particulièrement perceptible dans les eaux peu profondes est dû à la dépression locale de la surface de l'eau dans laquelle le navire se meut. L'erreur due au surenfoncement s'écrit $dz_{\text{surenfoncement}}$.

L'accroupissement (*squat*) est un autre effet dynamique qui correspond à un changement d'assiette du navire comparé à sa position stoppé. Ce phénomène est une réponse à l'élévation et à la dépression de la surface de l'eau autour de la coque résultant des systèmes de vagues d'étrave et de poupe. Pour les porte-sondeurs sensibles à l'accroupissement, celui-ci est

* NdT: ou le tiers de cette distance, selon la pratique recommandée par le SHOM en France.

généralement fourni par une table en regard de la vitesse du navire. L'erreur d'accroupissement s'écrit $dz_{\text{accroupissement}}$.

La position relative du transducteur par rapport aux capteurs de mouvement ou au compensateur de pilonnement doit être prise en compte pour corriger la profondeur en fonction du pilonnement induit, voir 5.1.4.4.

L'erreur totale dz_i due au décalage d'immersion de la base du transducteur est égale à :

$$dz_i = \sqrt{dz_{\text{tirant d'eau}}^2 + dz_{\text{surenfoncement}}^2 + dz_{\text{accroupissement}}^2} \quad (3.51)$$

tandis que la variance totale de l'écart de profondeur correspondant s'écrit :

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{tirant d'eau}}^2 + \sigma_{\text{surenfoncement}}^2 + \sigma_{\text{accroupissement}}^2 \quad (3.52)$$

où $\sigma_{\text{tirant d'eau}}^2$, $\sigma_{\text{surenfoncement}}^2$ et $\sigma_{\text{accroupissement}}^2$ sont les variances respectives des erreurs de tirant d'eau, de surenfoncement et d'accroupissement.

5.1.4.6 La lecture des enregistrements et la résolution de la mesure de profondeur dépendent des principes de fonctionnement du sondeur. Dans le cas d'un enregistrement analogique, l'opérateur doit régler le sondeur durant le levé afin d'obtenir une trace nette et une résolution adéquate tandis qu'avec l'enregistrement numérique, son attention doit se concentrer sur le processus d'acquisition des données.

Avec les bandes de sonde, le gain et l'intensité doivent être réglés pour obtenir un enregistrement lisible, aussi une échelle verticale offrant une discrimination suffisante doit-elle être sélectionnée. A cet effet on utilisera couramment les fenêtres de réception (§ 5.1.1.1.).

La bande de sonde doit être préparée en vue de son exploitation. Cette tâche consiste à sélectionner les points de l'enregistrement qui correspondent au choix de sondes, lequel sera réalisé au moyen d'un répartiteur.

L'erreur associée à la lecture de l'enregistrement dépend de l'expérience et de la patience de l'hydrographe. Si l'on considère par exemple une bande de sonde de 20 cm de large et l'échelle 0 – 200 mètres, une erreur de lecture de 0,5mm se traduira par une erreur sur la profondeur de 0,5m et cette échelle n'est pas adaptée aux eaux peu profondes. L'erreur de lecture s'écrira dz_{lect} et sera associée à la variance σ_{lect}^2 .

5.1.4.7 L'interprétation de l'écho est la responsabilité de l'hydrographe. Cette interprétation nécessite de l'expérience pour identifier les formes particulières, les échos multiples et les faux échos.

a) Les **faux échos** sont causés par des corps étrangers tel que des algues ou des bancs de poissons dans la colonne d'eau (Figure 3.29), ou par des couches d'eau séparées par des changements brusques de température ou de salinité ou les deux.

Les faux échos sont enregistrés occasionnellement par les sondeurs ou peuvent être interprétés à tort comme étant des profondeurs correctes. En cas de doute sur la validité d'une sonde, une recherche devra être faite et le profil resondé si nécessaire.

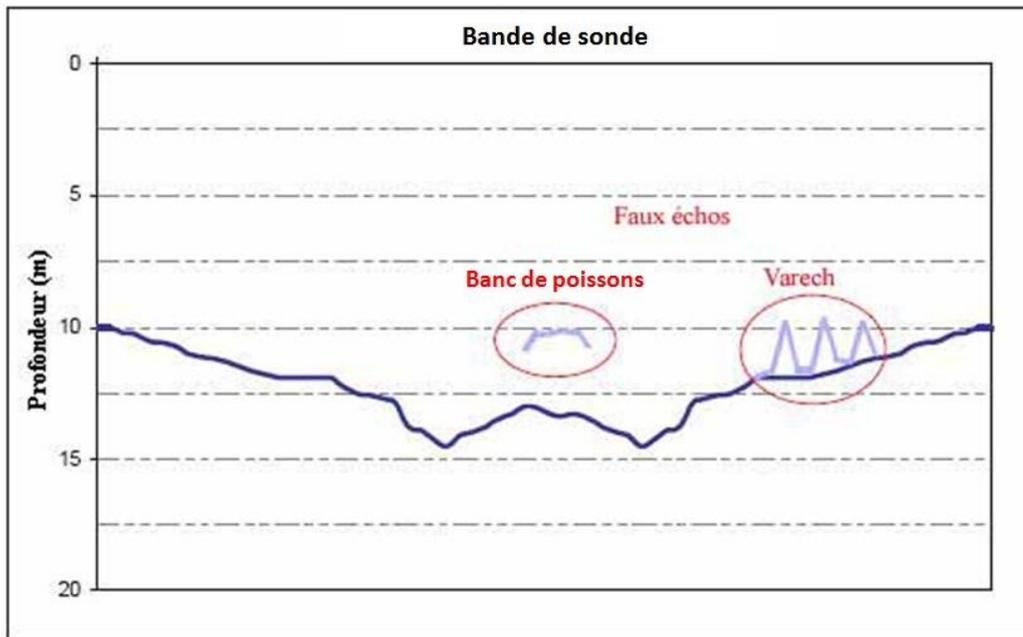


Fig. 3.29 « Enregistrement de faux échos »

- b) **Échos multiples ou doubles échos** : Ce sont les doubles échos reçus après la première réception par suite de la multiplicité des réflexions aller-retour entre le fond et la surface, voire avec la coque du navire hydrographique elle-même. Ces réflexions sont généralement enregistrées comme étant des multiples du premier fond (Figure 3.30).*

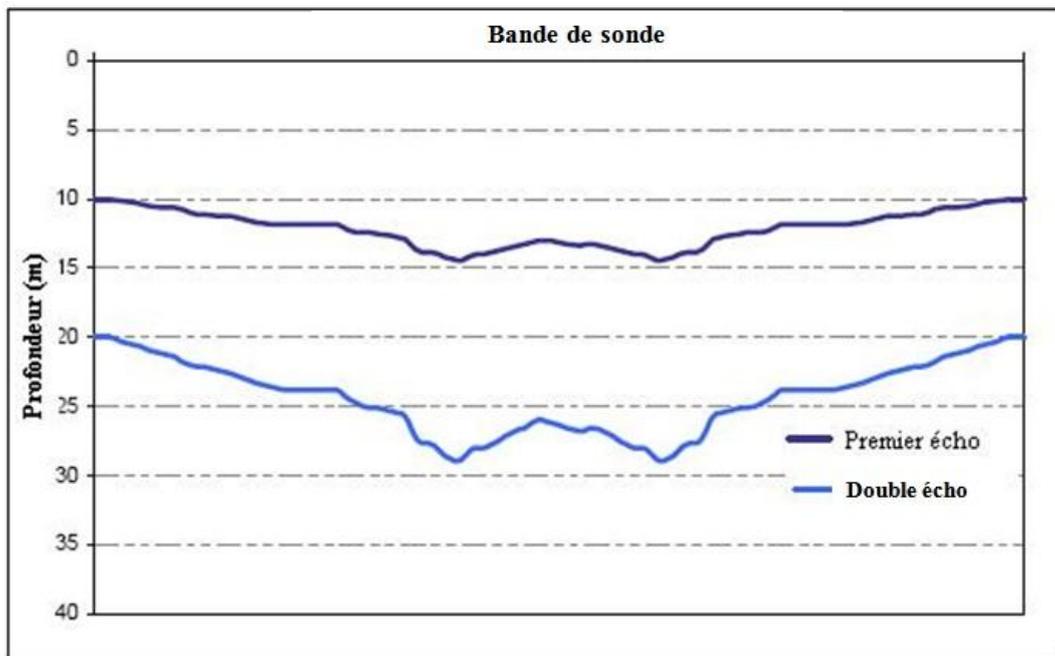


Fig. 3.30 « Enregistrement d'échos multiples »

- c) **Pilonnement** : Les mouvements d'ascenseur causés par l'état de la mer peuvent être compensés par le capteur de pilonnement ou filtrés manuellement sur la bande de sonde.

* NdT: Se méfier de la combinaison dangereuse d'un double écho et d'un mauvais choix de fenêtre de réception. Un navire hydrographique a pu exécuter ainsi un levé en poursuivant le double écho du fond dans une fenêtre de réception. Ce n'est qu'en se mettant à l'abri dans une baie comportant un seuil de 10 mètres, alors que le sondeur en indiquait 20, qu'il s'est rendu compte qu'il était accroché sur un faux écho.

L'expérience de l'hydrographe est alors l'outil utilisé bien qu'il soit parfois difficile de distinguer le pilonnement des irrégularités du fond.

- d) **Échos latéraux** : Ce sont également de faux échos mais qui résultent de détections par les lobes secondaires et qui donnent lieu à des erreurs de mesure des profondeurs et du positionnement (voir 4.2).
- e) **Sédiments meubles** : Ils sont généralement détectés par les sondeurs à haute fréquence. Dans les eaux peu profondes, il est recommandé d'utiliser deux fréquences en même temps pour différencier les sédiments meubles du fond rocheux (Figure 3.31).

5.1.4.8 Réduction des profondeurs : Les profondeurs mesurées, corrigées de l'attitude du porte-sondeur, sont réduites au système de référence vertical par prise en compte de la marée. L'erreur due à la marée est notée $dz_{\text{marée}}$.

A l'erreur de mesure de la marée s'ajoute parfois une erreur plus significative, celle de la correction cotidiale qui résulte de la différence entre la marée sur zone et la marée observée à la côte. Cette erreur d'extrapolation, notée $dz_{\text{cotidiale}}$, peut être assez significative à quelques miles du marégraphe (voir chapitre 4). Un modèle de marée ou des moyennes pondérées de deux marégraphes ou plus peuvent être requis.

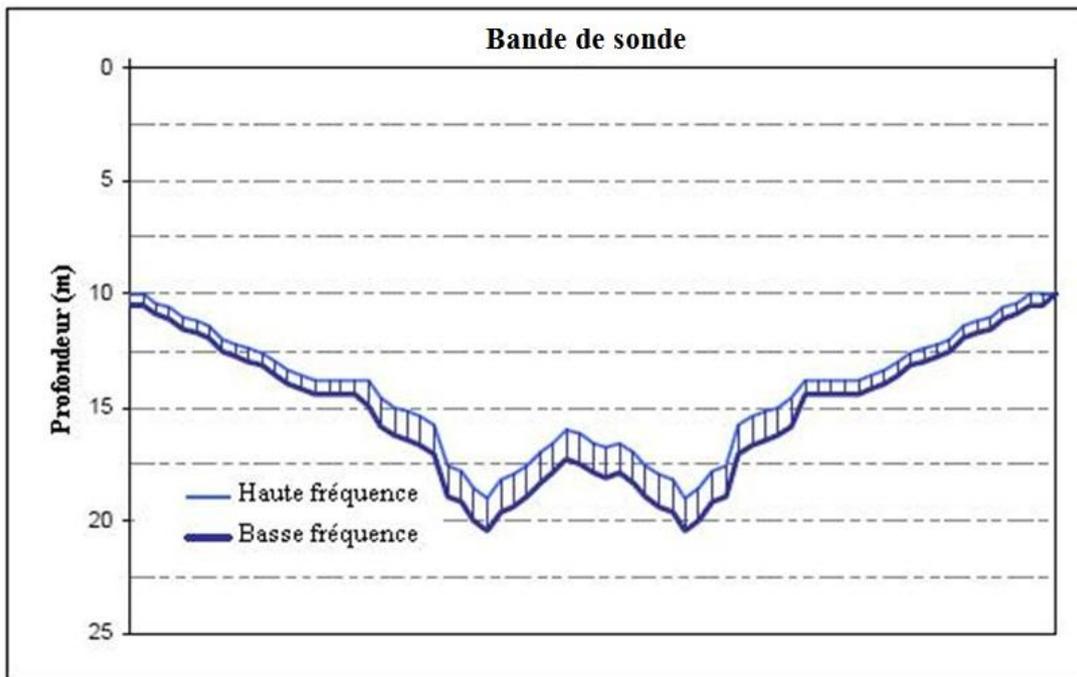


Fig. 3.31 « Enregistrement de sondeur bi-fréquence »

La variance $\sigma_{\text{marée}}^2$ de la marée due aux erreurs de mesure et à la variation cotidiale s'écrit :

$$\sigma_{\text{marée}}^2 = \left(\sigma_{\text{marée}_m}^2 + \sigma_{\text{cotidiale}}^2 \right) \quad (3.53)$$

où $\sigma_{\text{marée}_m}^2$ est la variance de la mesure et $\sigma_{\text{co-tidal}}^2$ la variance de l'erreur cotidiale.

La détermination de la marée associée au positionnement RTK (cinématique GPS temps réel) permet d'accéder à une marée locale précise, cependant le calcul nécessite un modèle des différences entre l'ellipsoïde de référence, le WGS84 et le système de référence vertical.

Le contrôle de qualité est réalisé statistiquement par comparaison des sondes obtenues aux nœuds des profils traversiers de vérification et des profils du sondage régulier. Les résultats de cette comparaison doivent être en accord avec les normes de précision de la S-44 (Figure 3.32).

Avec les notations introduites précédemment, la variance des erreurs de profondeur est égale à :

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_c}^2 + \sigma_{z_t}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{lect}^2 + \sigma_{marée}^2 \quad (3.54)$$

L'erreur de profondeur estimée avec un niveau de confiance à 1σ (68 %) est la racine carrée de l'équation 3.54. Dans l'hypothèse où les composantes des erreurs suivent approximativement une loi de distribution normale, l'erreur estimée de la profondeur réduite, avec un niveau de confiance à 2σ (95%), est obtenue en remplaçant chaque terme de forme σ_n^2 par $(2\sigma_n)^2$.

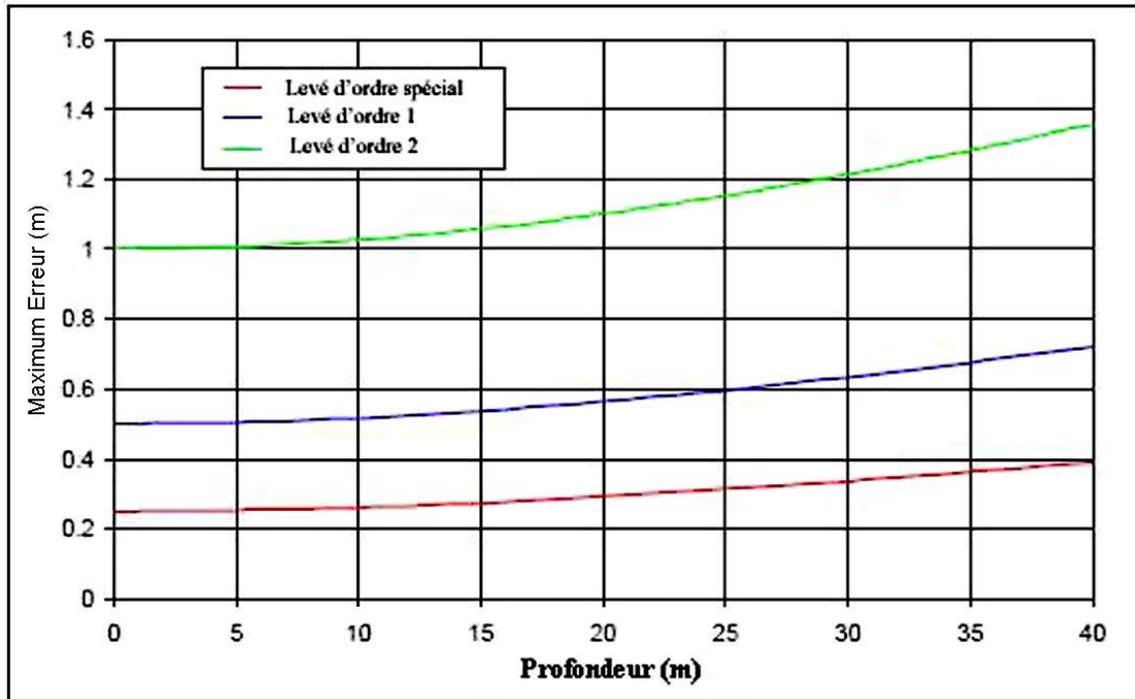


Fig.3.32 « Norme de précision pour les levés d'ordre spécial, d'ordre 1 et d'ordre 2 (S-44) »

Il est recommandé pour chaque levé de créer un budget d'erreurs afin de vérifier que les sondages sont bien conformes aux normes de la S-44. Les tableaux et la figure 3.33 de l'exemple qui suit représentent un budget d'erreur pour un sondeur et un environnement donnés.

Exemple :

Caractéristiques du sondeur		Conditions opérationnelles	
Type	= Monofaisceau (modèle x)	Célérité moyenne	= 1 500 m/sec
Fréquence	= 200 kHz	Pilonnement	= 1 m
Ouverture du lobe	= 20°	Roulis	= 5°
Durée d'impulsion	= 0,1 ms	Vitesse de sonde	= 8 nœuds
		Surenfoncement (<i>settlement</i>)	= N/A
		Accroupissement (<i>squat</i>)	= 0,05 m

Erreurs estimées ou erreurs standard (1 σ) :		Erreurs estimées (2 σ) :	
Err. de tirant d'eau	= 0,05 m	(confiance de 95%) Err. de tirant d'eau	= 0,10 m
Err. de célérité	= 5 m/s	Err. de célérité	= 10 m/s
Erreurs sur la sonde :		Erreurs sur la sonde :	
Err. de célérité	= (5/1 500)·z m	Err. de célérité	= (5/1 500)·z m
Err. de temps	= 0,02 m	Err. de temps	= 0,02 m
Err. d'accroupissement	= 0,05 m	Err. d'accroupissement	= 0,05 m
Err. de pilonnement	= 0,10 m	Err. de pilonnement	= 0,10 m
Err. de marée	= 0,05 ms	Err. de marée	= 0,05 ms
Err. cotidale	= 0,05 ms	Err. cotidale	= 0,05 ms

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_c}^2 + \sigma_{z_t}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{lect}^2 + \sigma_{marée}^2$$

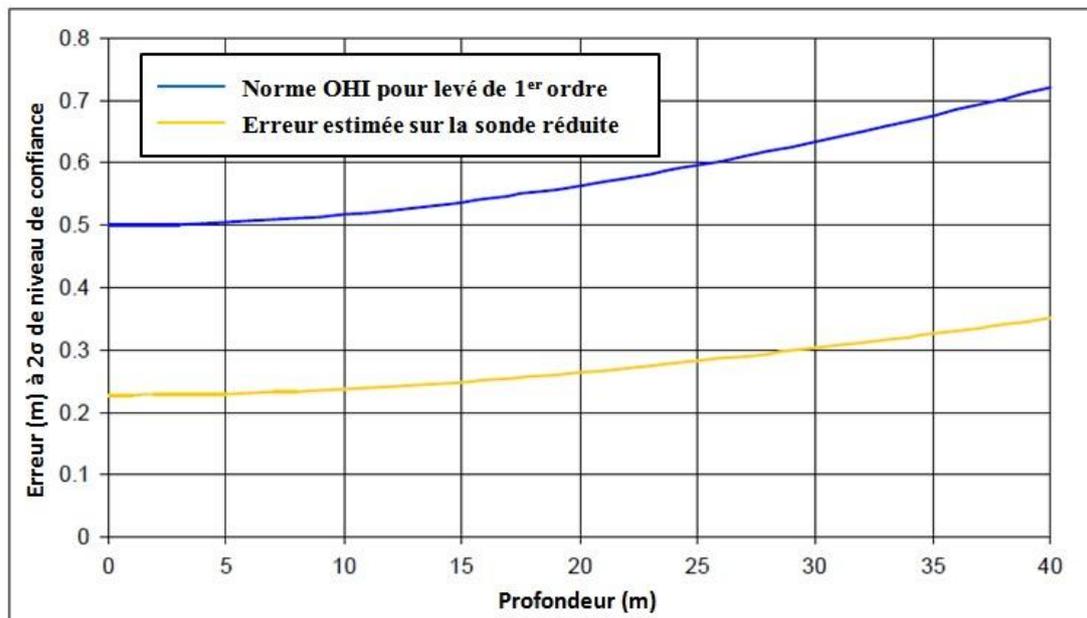


Fig. 3.33 « Estimation de l'erreur de profondeur »

5.2. Systèmes à balayage

Les systèmes à balayage mesurent la profondeur sur une bande située de part et d'autre du transducteur. Ces systèmes sont disposés de façon à ce que le balayage forme un angle droit avec le profil suivi par le porte-sondeur. La surface balayée quand le navire progresse s'appelle une fauchée.

Cette section décrit les sondeurs multifaisceaux et les sonars interférométriques.

5.2.1 Sondeurs multifaisceaux (SMF)

Les SMF sont des instruments précieux pour la détermination des profondeurs quand une couverture totale du fond est requise. Parce qu'ils permettent une insonification totale, ces systèmes ont une plus grande résolution et une meilleure capacité de détection.

5.2.1.1 Principes de fonctionnement : Le principe de fonctionnement des SMF est basé, en général, sur l'émission d'une impulsion en forme d'éventail dont l'énergie acoustique est ensuite réfléchi par le fond. Le SMF comporte plusieurs faisceaux d'incidence connue, formés

électroniquement en utilisant des techniques de traitement du signal. Le trajet aller-retour entre l'émission et la réception est calculé par des algorithmes de détection du fond. En traçant les rayons sonores (voir 5.2.1.8.1), il est possible de déterminer la profondeur et la distance séparant le SMF du centre des pastilles insonifiées.

Le faisceau émis est étroit dans l'axe du navire et large par le travers ; inversement les faisceaux formés à la réception sont étroits par le travers et allongés dans l'axe. Les intersections des faisceaux avec le plan du fond définissent des pastilles insonifiées pour lesquelles les profondeurs sont mesurées.

Les profondeurs étant mesurées à partir d'une plateforme mobile dotée de six degrés de liberté (trois translations et trois rotations), il est nécessaire d'observer soigneusement la latitude, la longitude, le pilonnement, le roulis, le tangage et le cap pour calculer avec précision les profondeurs et les positions associées.

A. La **détection du fond** est le processus consistant à déterminer le temps d'arrivée et l'amplitude du signal acoustique réfléchi par le fond ; sa fiabilité affecte la qualité des mesures. Les erreurs grossières de profondeur peuvent, entre autres, être liées à la mauvaise performance des algorithmes utilisés pour la détection du fond ; ces derniers peuvent être divisés en deux catégories, la détection par l'amplitude et la détection par la phase.

a) **Détection par l'amplitude** : le transducteur émet une impulsion acoustique vers le fond et déclenche la période d'écoute. Au cours de cette phase, le signal réfléchi est échantillonné dans le temps pour chaque faisceau. Le temps de parcours du signal pour le point correspondant à la profondeur est défini par l'amplitude de l'écho (Figure 3.34).

Les méthodes les plus courantes de détection par l'amplitude sont décrites ci-dessous :

i) **Front montant du signal réfléchi** : cette méthode est généralement utilisée quand l'angle d'incidence du signal est voisin de zéro degré. L'instant de détection du fond est déterminé par l'arrivée du front montant du premier signal reçu.

Avec l'augmentation des angles d'incidence, le signal de retour perd de la netteté que lui valait son bref temps de parcours et l'identification du front montant n'est plus possible. Deux autres méthodes peuvent être employées qui prennent en compte les variations de la force des signaux réfléchis par l'empreinte acoustique.

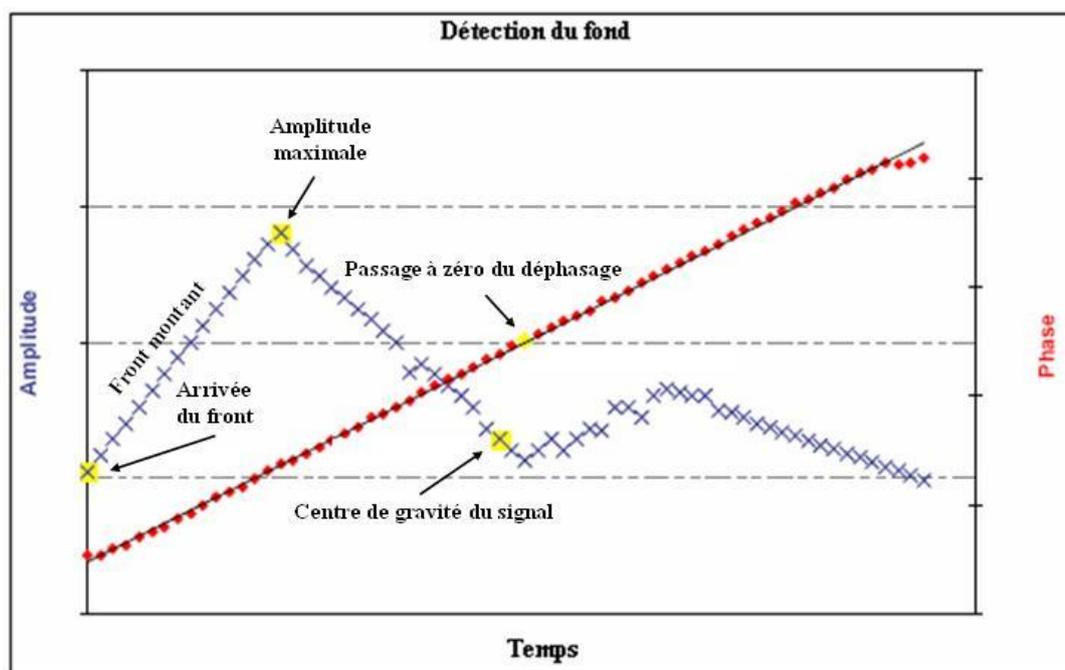


Fig. 3.34 « Méthodes de détection de l'écho du fond »

- ii) Amplitude maximale du signal réfléchi : la détection du fond correspond à l'instant de l'amplitude maximale de rétrodiffusion.
- iii) Centre de gravité du signal réfléchi : la détection du fond correspond à l'instant du centre de gravité du signal.
- b) **Détection par la phase** : La détection par l'amplitude est utilisée pour les faisceaux intérieurs (près du nadir) qui correspondent à une forte amplitude de rétrodiffusion et à un faible échantillonnage. Pour les faisceaux extérieurs, l'amplitude de la rétrodiffusion diminue et l'échantillonnage devient très grand ; l'écho est dégradé dans le temps et les méthodes de détection par l'amplitude obtiennent de mauvais résultats. Le phénomène est accentué quand le fond est en pente dans une direction transversale opposée à la source. La détection par la phase sera alors utilisée pour les grandes incidences.

Dans cette méthode, les transducteurs utilisés pour chaque faisceau sont divisés en deux sous-ensembles qui se recoupent généralement et dont les centres sont séparés par un certain nombre de longueurs d'onde, chaque sous-ensemble formant un faisceau dans une direction angulaire prédéterminée. L'avantage est qu'en cas d'arrivée simultanée d'échos de diverses provenances, le SMF ne prend en compte que ceux du lobe ainsi formé. La mesure des différences de phases est alors utilisée pour estimer le temps d'arrivée de l'écho dans la direction prédéterminée en recherchant le passage à zéro des déphasages [Moustier (de), 1993]. Cette méthode est illustrée par la figure 3.35, dans laquelle l'équivalent du centre des deux sous-ensembles situés à une distance ℓ l'un de l'autre est représenté par A et B et où θ est l'angle du signal reçu, mesuré à partir de l'axe acoustique. Une approximation polynomiale de second ordre peut être appliquée à une petite section encadrant le déphasage estimé afin d'affiner la détection du passage à zéro.

Quand le retour du signal provient de l'axe acoustique, c'est-à-dire pour $\theta = 0$, les signaux des deux sous-ensembles sont en phase, ce qui correspond au temps de parcours de l'onde.

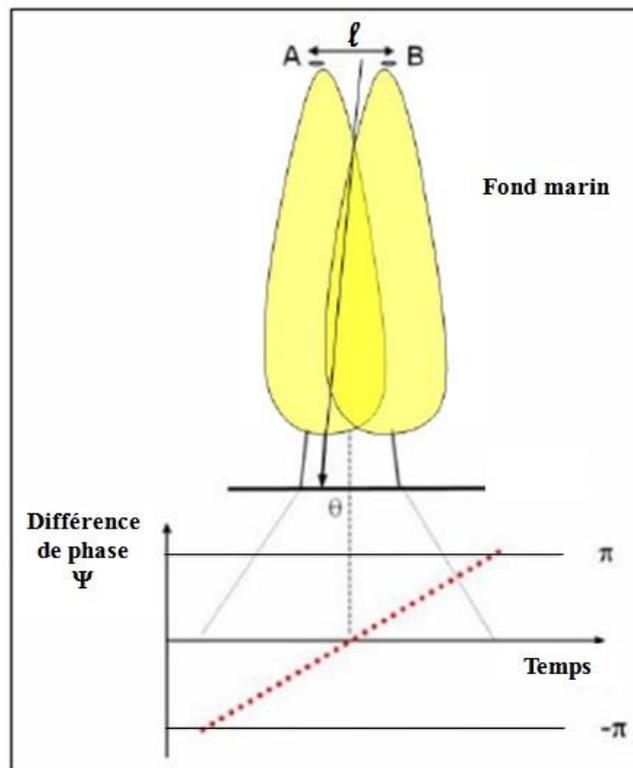


Fig. 3.35 « Détection par la phase (Passage à zéro du déphasage) »

Une combinaison des méthodes par l'amplitude et par la phase est généralement requise pour renforcer la détection sur la totalité de la fauchée. Près du nadir, la détection par l'amplitude est préférée car les temps de parcours pour ces faisceaux sont trop courts pour permettre une détection valable par la phase. La détection par l'amplitude est également utilisée dans le cas de fortes pentes éloignées du nadir et associés à des remontées bathymétriques, à l'exception de la combinaison extrême avec de très fortes pentes dans la direction opposée au transducteur. Une détection par la phase des faisceaux centraux risquerait d'entraîner des erreurs grossières dues à des réflexions à mi-colonne ou à des retours d'échos forts provenant des lobes secondaires. Les détections hors nadir sont mieux interprétées par la phase mais la détection par l'amplitude peut néanmoins être conservée dans le cas de retours forts causés par des différences de réflectivité du fond, par une réflexion quasi-spéculaire ou par des signaux très contrastés, comme il s'en rencontre avec des cibles telles que des épaves ou des roches.

B. Transformations de Fourier rapides (FFT) :

D'après le § 4.2, pendant la formation des faisceaux, les signaux émis par chaque élément de l'antenne sont émis sur le même modèle, mais après introduction d'un retard de temps. La somme des amplitudes des N transducteurs est elle-même une transformation de Fourier du vecteur à N composantes correspondant au modèle de radiation de l'antenne linéaire. Si N est une puissance de 2, le calcul se simplifie et la transformation de Fourier devient une transformation de Fourier rapide⁴⁵ (*Fast Fourier Transform*). Cette méthode a l'avantage d'accélérer le processus de formation du faisceau.

Cette méthode est détaillée par Moustier (de), 1993.

5.2.1.1 Précision : Les mesures de portées et d'angles des SMF sont plus complexes que pour les monofaisceaux. Plusieurs facteurs contribuent aux erreurs de mesures incluant la taille de la fauchée, l'angle d'incidence sur le fond, la largeur des faisceaux émis et reçus, la précision d'attitude et de pilonnement, les algorithmes de détection et les variations du profil de célérité.

On calculera généralement un budget d'erreurs en se basant sur ces facteurs (voir 5.2.1.8).

5.2.1.2 Résolution : Avec leur capacité d'insonification totale, les systèmes multifaisceaux offrent une meilleure représentation du fond et une plus haute résolution cartographique que les monofaisceaux. Pour ce qui concerne la mesure des profondeurs, la résolution va cependant dépendre de la fréquence, de la largeur des faisceaux et des algorithmes de détection.

La résolution de la sonde est fonction de la longueur de l'impulsion et des dimensions de la surface insonifiée. Aux incidences normales, la surface insonifiée par un SMF est relativement petite et par conséquent la résolution sera plus fine que pour un sondeur monofaisceau.

5.2.1.3 La fréquence d'un SMF est choisie en fonction des objectifs du levé et principalement des portées et des résolutions recherchées.

Les fréquences caractéristiques des SMF sont :

- | | |
|------------------------------------|---|
| a. Petits fonds (< 100 mètres) : | fréquences supérieures à 200 kHz; |
| b. Fonds moyens (< 1 500 mètres) : | fréquences comprises entre 50 et 200 kHz; |
| c. Grands fonds (> 1 500 mètres) : | fréquences comprises entre 12 et 50 kHz. |

⁴⁵ Il est toujours possible d'appliquer les FFT même si N n'est pas un carré à condition de compléter les données par des zéros (*zero-padded FFT*), voir Moustier (de), 1993.

5.2.1.4 Capteurs associés aux systèmes intégrés :

En plus du sondeur lui-même, le système SMF inclut également :

- a) Une centrale d'attitude utilisée pour mesurer le roulis, le tangage, les lacets et le pilonnement. Ce capteur est muni d'une unité de mesure inertielle (IMU) et d'un couple de récepteurs GPS avec leurs antennes. Par suite des technologies mises en œuvre, cette centrale est également capable de fournir une position de haute précision.
- b) Un profileur de célérité utilisé pour mesurer la célérité dans la colonne d'eau.
- c) Une célérimètre de coque pour mesurer la célérité à proximité du transducteur. Ceci est une obligation pour une antenne plane avec formation de faisceaux.
- d) Un système de positionnement intégré à la centrale d'attitude, comme on l'a vu plus haut. Le GPS en mode pseudo différentiel ou en mode cinématique temps réel (RTK) est le système le plus couramment utilisé dans le monde.
- e) Un capteur de cap. La solution la plus commode et la plus précise, également intégrée à la centrale d'attitude, est celle du cap fourni par le GPS à deux récepteurs.

5.2.1.5 Installation et étalonnage

Les transducteurs du SMF peuvent être soit fixés sur la coque, soit montés en version hors-bord sur le côté ou devant l'étrave du navire hydrographique. Les transducteurs de coque sont utilisés à bord des grands bâtiments ou pour un emploi permanent. Les autres installations sont réalisées pour un usage temporaire, souvent pour les petites embarcations.

L'étalonnage sur zone test (*patch test*) est une procédure essentielle pour déterminer l'effet composé des *offsets* angulaires (décalages en roulis, tangage, et azimut) du transducteur et de la centrale d'attitude, ainsi que le décalage dû au temps de latence du positionnement. Des analyses et des procédures détaillées peuvent être trouvées dans Godin (1996).

L'étalonnage doit être réalisé à l'installation, en cas de modification significative de cette dernière ou après de longues périodes d'inactivité.

Il convient de vérifier les paramètres d'installation et d'exécuter un profil de célérité pour calculer la réfraction avant de procéder à l'étalonnage.

a) Décalage dû au temps de latence

Le temps de latence (*latency*) est le décalage de temps séparant la mesure de la profondeur de l'instant du calcul de la position. Pour déterminer ce décalage, la procédure consiste à sonder un même profil à deux vitesses différentes par fond en pente. À noter que plus fort est le gradient, plus haute sera la résolution de ce paramètre. La pente devra être régulière et suffisamment étendue pour permettre un échantillonnage adéquat. La Figure 3.36 montre l'étalonnage du temps de latence.

Le temps de latence est obtenu en mesurant l'écart longitudinal des sondes le long de la pente pour différentes vitesses du navire. Pour s'affranchir de l'influence d'un décalage éventuel en tangage, les profils doivent être exécutés dans la même direction.

L'*offset* δt dû au temps de latence a pour valeur :

$$\delta t = \frac{\Delta x}{v_2 - v_1} \quad (3.55)$$

où Δx est l'écart apparent séparant le même profil sondé à la vitesse v_1 , puis v_2 .

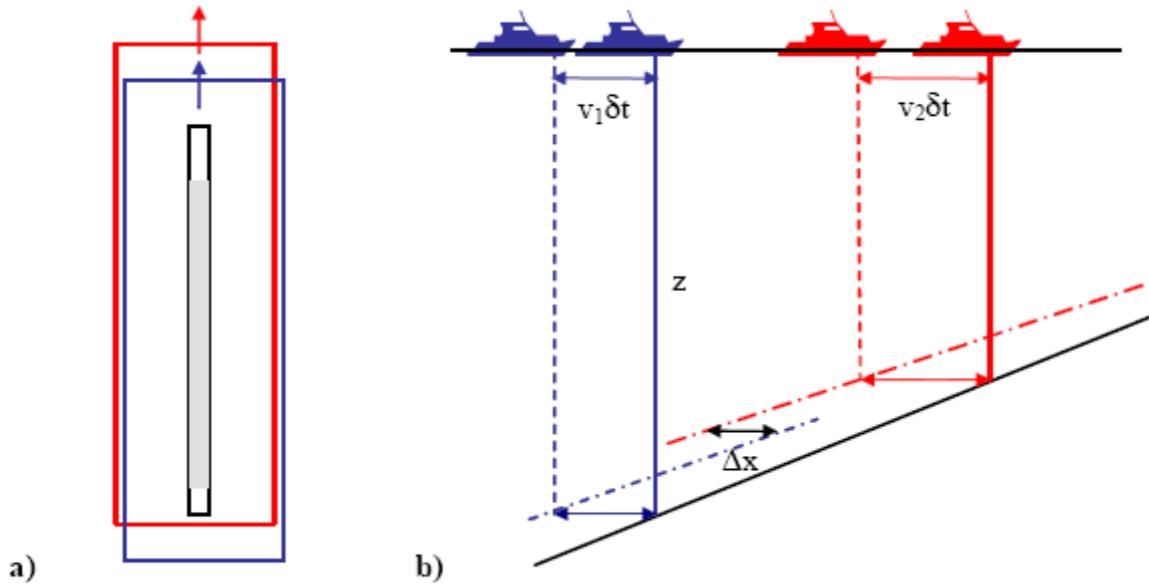


Fig. 3.36 « Étalonnage pour l'offset dû au temps de latence »

- a) Vue du dessus des deux passes du même profil sondé aux vitesses v_1 et v_2 .
 b) Coupe longitudinale faisant apparaître la différence entre le fond réel et les deux enregistrements du même profil sondé à la vitesse v_1 , puis v_2 .

b) Décalage dû au tangage

Le décalage dû au tangage (*pitch offset*) est la somme des décalages angulaires du capteur inertiel et de l'alignement du transducteur avec la verticale locale dans le plan longitudinal du bâtiment. Pour déterminer ce décalage, la procédure consiste à sonder un même profil dans les deux sens et à la même vitesse par fond en pente. Comme pour le temps de latence, plus le gradient est fort, plus haute sera la résolution de ce paramètre. La pente doit être régulière et suffisamment étendue pour permettre un échantillonnage adéquat. La Figure 3.37 illustre l'étalonnage pour le décalage dû au tangage.

Comme pour la détermination précédente, le décalage dû au tangage est obtenu en mesurant l'écart longitudinal des sondes le long de la pente. Pour s'affranchir du temps de latence, le système devra déjà avoir été compensé pour ce paramètre.

L'offset $\delta\theta_T$ dû au tangage a pour valeur :

$$\delta\theta_T = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{2 \cdot z}\right) \quad (3.56)$$

où Δx est l'écart apparent d'une sonde du même profil sondé dans un sens, puis dans l'autre.

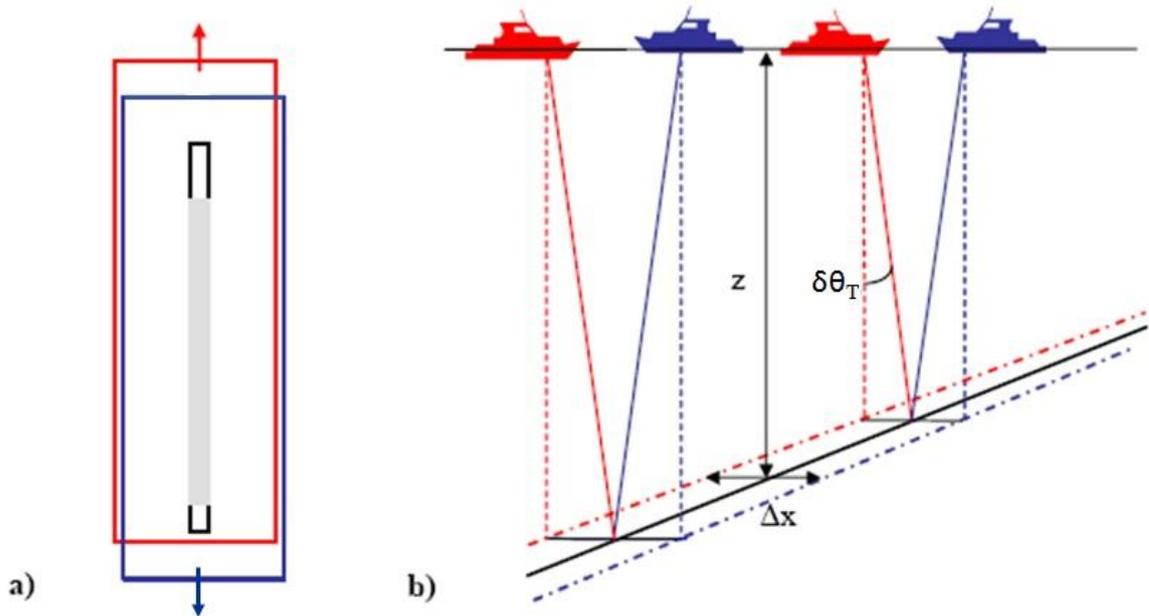


Fig. 3.37 « Étalonnage pour l'offset dû au tangage »

- a) Vue du dessus des deux passes du même profil sondé dans les deux sens.
 b) Coupe longitudinale faisant apparaître l'écart entre le fond réel et les deux enregistrements du même profil sondé dans les deux sens.

c) Décalage dû à l'azimut

Le décalage dû à l'azimut (*azimuthal offset*) est la somme des décalages angulaires du capteur de cap et de l'alignement du transducteur perpendiculairement à l'axe du navire. Pour déterminer ce décalage, la procédure consiste à sonder deux profils adjacents à la même vitesse mais à caps opposés dans une zone comportant un détail bathymétrique caractéristique tel qu'un haut fond. Les faisceaux extérieurs des profils adjacents doivent se recouvrir (pas plus que 20% de la fauchée) dans la zone du détail bathymétrique. La Figure 3.38 montre l'étalonnage du décalage dû à l'azimut.

Comme pour les déterminations précédentes, le décalage dû à l'azimut est obtenu en mesurant l'écart longitudinal du détail bathymétrique observé sur les deux profils adjacents. Pour s'affranchir des décalages dus au temps de latence et au tangage, le système devra déjà avoir été compensé pour ces deux paramètres.

L'offset $\delta\alpha$ dû à l'azimut a pour valeur :

$$\delta\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta L}\right) \quad (3.57)$$

où Δx est l'écart apparent du détail bathymétrique observé à partir des deux profils adjacents parcourus en sens opposés et ΔL la distance séparant ces deux profils.

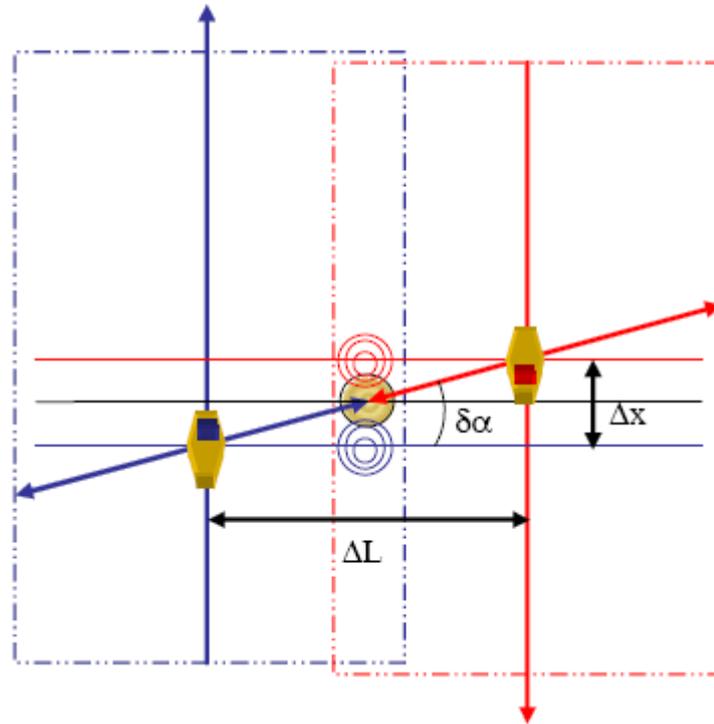


Fig. 3.38 « Étalonnage pour l'offset dû à l'azimut »

d) Décalage dû au roulis

Le décalage dû au roulis (*roll offset*) est la somme des décalages angulaires du capteur inertiel et de l'alignement de transducteur avec la verticale locale dans le plan transversal du bâtiment. Pour déterminer ce décalage, la procédure consiste à sonder un même profil dans les deux sens et à la même vitesse par fond plat et régulier, avec recouvrement des fauchées. La Figure 3.39 montre l'étalonnage pour le décalage dû au roulis.

Comme pour les déterminations précédentes, le décalage dû au roulis est obtenu en mesurant l'écart des profondeurs mesurées par les faisceaux extérieurs des deux profils sondés en sens inverses. Pour s'affranchir des influences du temps de latence, du tangage et de l'azimut, le système devra déjà avoir été compensé pour ces trois paramètres.

L'offset $\delta\theta_R$ dû au roulis a pour valeur :

$$\delta\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{2 \cdot \Delta y}\right) \quad (3.58)$$

où Δz est l'écart des profondeurs mesurées par les faisceaux extérieurs des deux profils et Δy la demi-fauchée ou la distance du nadir au point où les écarts de profondeurs ont été mesurés.

L'étalonnage est généralement pratiqué en interactif et les compensations ou calculs d'offsets réalisés sur des plages d'échantillonnages afin d'obtenir une moyenne. Les incertitudes affectant les décalages peuvent être du même ordre de grandeur que la répétabilité des capteurs d'attitude.

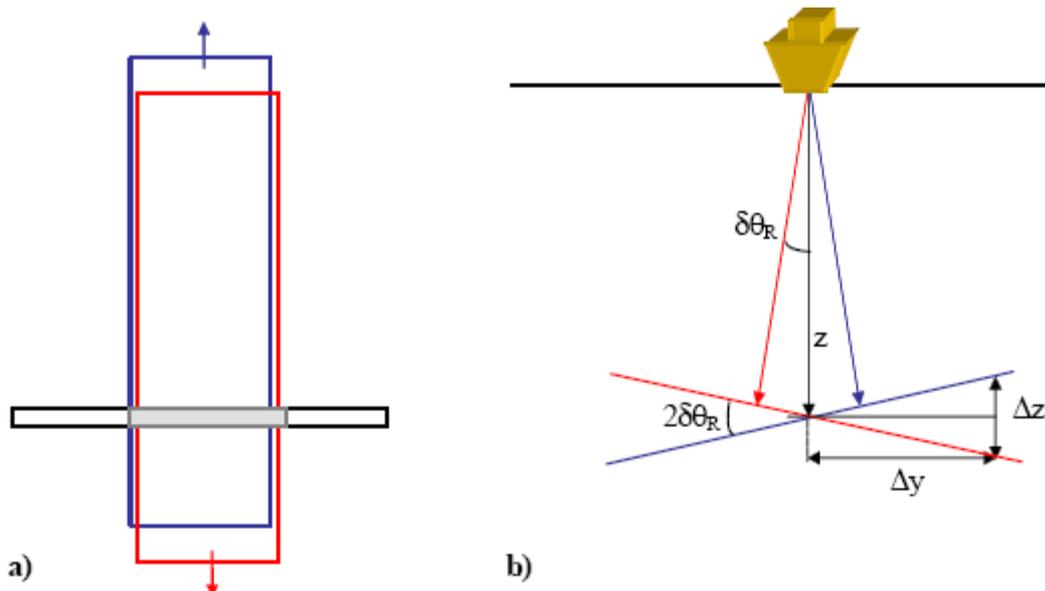


Fig. 3.39 « Étalonnage pour l'offset dû au roulis »

- a) Vue du dessus des deux profils sondés dans un sens puis dans l'autre.
 b) Coupe transversale montrant l'écart en profondeur causé par l'offset dû au roulis.

5.2.1.7 Mise en œuvre du SMF et enregistrement des données

La configuration du porte-sondeur et les paramètres d'étalonnage doivent être vérifiés au début du levé. Certains paramètres opérationnels doivent également être vérifiés, en particulier ceux utilisés durant l'acquisition des données et qui peuvent varier en fonction des zones sondées (par ex. les profondeurs maximales et les profondeurs attendues dans la zone, le taux maximum d'échantillonnage, etc.).

Au début du levé, un profil de célérité doit être exécuté et les résultats transférés au sondeur, généralement pour utilisation en temps réel. La célérité au niveau du transducteur doit être comparée à celle du célérimètre de coque. Durant les sondages, plusieurs profils de célérité doivent être exécutés aux emplacements prédéfinis en fonction des variations temporelles et spatiales de la célérité.

Pendant les sondages, le système est à peu près complètement automatisé, mais l'hydrographe doit cependant vérifier l'acquisition et l'intégrité des données. L'insonification totale et le recouvrement entre fauchées adjacentes doivent être assurés et contrôlés. Il est très important de comparer le recouvrement des faisceaux extérieurs entre fauchées adjacentes et de contrôler les tendances à « sourire » que pourraient présenter les pings (*smile/frown artifacts*).

À la fin de chaque séance de sonde, il est fortement recommandé de sauvegarder les données et de créer une copie de secours.

5.2.1.8 Source d'erreurs et techniques de contrôle de qualité

Les sources d'erreurs ont été discutées au 5.1.4 mais il s'agissait de sondeurs monofaisceaux ; celles qui suivent sont relatives au SMF. Dans le cas des erreurs communes aux deux systèmes, c.à.d. qui ne varient pas avec l'angle du faisceau, on se référera au § 5.1.4. On trouvera d'autres détails sur les incertitudes propres aux SMF dans Hare [1995] et Lurton [2002].

5.2.1.8.1 Erreurs dues à la célérité : les erreurs de célérité se traduisent par des réfractions incorrectes et, par conséquent, par des erreurs de profondeur et de positionnement.

Le tracé du rayon sonore⁴⁶ est basé sur la loi de Descartes/Snellius qui établit la relation entre la direction du rayon et la vitesse de l'onde acoustique.

$$\frac{\sin \theta_0}{c_0} = \dots = \frac{\sin \theta_i}{c_i} = \kappa \quad (3.59)$$

où pour une profondeur z_i , c_i est la célérité, θ_i l'angle d'incidence formé par le rayon et la normale au dioptré et κ le paramètre du rayon.

Considérant le profil de célérité discret de la figure 3.40, il est logique de supposer que le gradient de célérité de la couche située entre deux points du bathycélérogramme est constant. La célérité $c_i(z)$ peut alors s'écrire comme suit :

$$c_i(z) = c_{i-1} + g_i(z - z_{i-1}), \quad \text{pour } z_{i-1} \leq z \leq z_i \quad (3.60)$$

où g_i est le gradient constant de la couche i donné par :

$$g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \quad (3.61)$$

Dans chaque couche, l'impulsion acoustique suit une trajectoire de rayon de courbure constant ρ_i , donné par :

$$\rho_i = -\frac{1}{\kappa g_i} \quad (3.62)$$

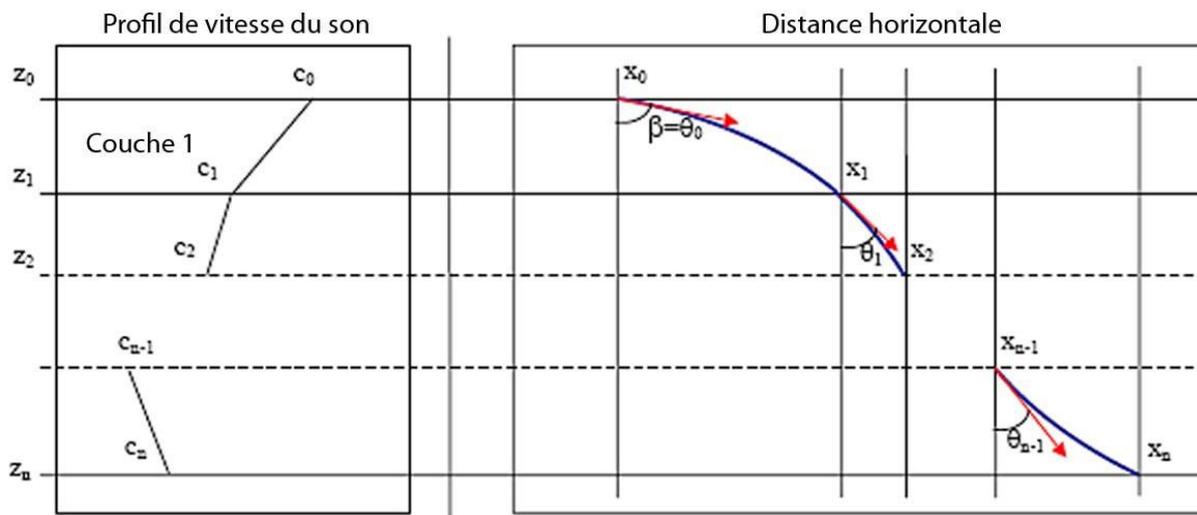


Fig. 3.40 « Tracé des rayons sonores »

Considérant le rayon sonore émis à la profondeur z_0 de célérité c_0 sous un angle d'incidence θ_0 (ou β), la distance horizontale parcourue par l'impulsion acoustique pour traverser la couche i est :

⁴⁶ Le rayon acoustique correspond à une ligne tracée à partir de la source et dont chaque point est porté par la perpendiculaire au front d'onde.

$$\Delta x_i = \rho_i (\cos \theta_i - \cos \theta_{i-1}) = \frac{\cos \theta_{i-1} - \cos \theta_i}{\kappa g_i} \quad (3.63)$$

En remplaçant $\cos(\theta_i)$ par $\sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}$, il vient :

$$\Delta x_i = \frac{\sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2} - \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}}{\kappa g_i} \quad (3.64)$$

et le temps de parcours de l'impulsion acoustique dans la couche i est obtenu par :

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \int_{c_{i-1}}^{c_i} \frac{dc}{c \cdot \cos(\theta)} \quad (3.65)$$

qui peut s'écrire :

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (3.66)$$

Pour obtenir la distance horizontale totale parcourue par le signal acoustique et le temps de parcours, il suffit de sommer les distances Δx_i et les temps Δt_i depuis le transducteur jusqu'au fond, soit :

$$x = \sum_{i=1}^n \frac{[1 - (\kappa c_{i-1})^2]^{1/2} - [1 - (\kappa c_i)^2]^{1/2}}{\kappa g_i} \quad (3.67)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (3.68)$$

La profondeur et la position d'une sonde sont le résultat de l'intégration du parcours aller ($\Delta t/2$) de l'impulsion dans la direction déterminée par l'angle d'incidence du faisceau et corrigée du profil de célérité entre la source et le fond.

Avec un profil de célérité à gradient g constant, la profondeur obtenue est :

$$z = \int_0^{\Delta t/2} (c_0 + g \cdot z) \cdot \cos(\theta) dt \quad (3.69)$$

L'erreur dz_c sur la profondeur due à la variation dg du gradient et à la variation dc_0 de la célérité au niveau du transducteur est obtenue par différenciation de l'équation 3.69. Elle a pour approximation :

$$dz_c = \frac{z^2}{2c_0} (1 - \tan^2(\beta)) dg + \frac{z}{c_0} dc_0 \quad (3.70)$$

où β et c_0 sont respectivement l'angle d'incidence du faisceau et la célérité au niveau du transducteur. Dans l'équation 3.70 le premier terme correspond à la fois à la portée et aux erreurs de courbure du rayon dues à la variation de gradient du profil de célérité alors que le second terme correspond aux erreurs de profondeur causées par un *offset* de la célérité à la profondeur du transducteur. En considérant qu'il n'y a pas de corrélation entre ces erreurs, la variance de la profondeur due aux erreurs de célérité s'écrit :

$$\sigma_{z_{c_profil}}^2 = \left(\frac{z^2}{2c_0} \right)^2 (1 - \tan^2(\beta))^2 \sigma_g^2 + \left(\frac{z}{c_0} \right)^2 \sigma_{c_0}^2 \quad (3.71)$$

où σ_g^2 correspond à la variance du gradient du profil de célérité et σ_{c_0} à la variance de la valeur initiale du profil de célérité utilisée pour le calcul des profondeurs.

Dans la pratique, les erreurs de célérité sont difficiles à quantifier et les problèmes de variation temporelle et spatiale peuvent être parfois si importants que la seule solution pratique est de limiter l'angle d'ouverture du SMF.

Il existe une autre erreur due à une valeur erronée ou à une variation de la célérité à l'immersion du transducteur ; cette composante introduit une erreur sur l'angle d'incidence du faisceau, qui entraîne à son tour des erreurs dans la mesure de la profondeur et du positionnement.

Pour la formation du faisceau ou sa stabilisation, il est nécessaire d'introduire des retards de temps dans les éléments du transducteur (4.2). Pour calculer ces retards il est nécessaire de connaître la célérité à la profondeur du transducteur, ce qui est généralement réalisé en installant un capteur de célérité à proximité. Toute erreur de célérité au niveau de la base du transducteur se propagera en tant qu'erreur de l'angle d'incidence du faisceau (Figure 3.41).

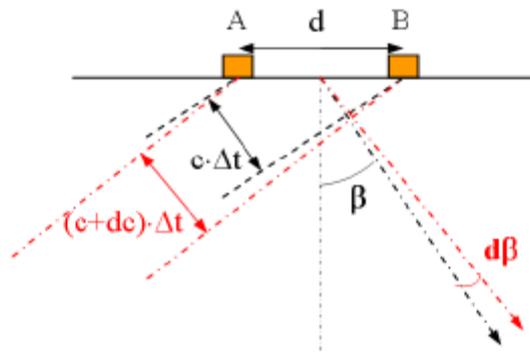


Fig. 3.41 « Erreur de formation du faisceau due à une erreur de célérité »

Le retard de temps introduit pour former le faisceau est obtenu par :

$$\Delta t = \frac{d}{c_0} \sin(\beta) \quad (3.72)$$

soit

$$\beta = \text{Arcsin} \left(\frac{c_0 \cdot \Delta t}{d} \right). \quad (3.73)$$

Par différenciation et simplification appropriée, on obtient :

$$d\beta = \frac{\tan(\beta)}{c_0} dc_0. \quad (3.74)$$

En se propageant, l'erreur de formation du faisceau entraîne une erreur de profondeur de :

$$dz_\beta = -\frac{z}{c_0} \cdot \tan^2(\beta) dc_0. \quad (3.75)$$

La variance de l'erreur de profondeur due à une erreur de formation du faisceau est alors :

$$\sigma_{z\beta}^2 = \left(\frac{z}{c_0} \right)^2 \tan^4(\beta) \sigma_{c_0}^2 \quad (3.76)$$

où $\sigma_{c_0}^2$ correspond à la variance de la célérité utilisée pour la formation du faisceau, généralement mesurée par le capteur de coque.

Finalement, la variance totale estimée de la profondeur due aux erreurs de célérité s'écrit comme suit :

$$\sigma_{z_c}^2 = \sigma_{z_{c_profil}}^2 + \sigma_{z\beta}^2 \quad (3.77)$$

Les erreurs mentionnées ci-dessus peuvent être détectées par examen visuel des enregistrements visant notamment à détecter les courbures anormales des rayons sonores.*

5.2.1.8.2 Erreurs dues à l'attitude : les mesures des profondeurs dépendent des erreurs de tangage et de roulis dont les contributions au bilan d'erreurs s'écrivent comme suit :

$$dz_{\theta_R} = R \cdot \cos(\theta_T) \cdot \sin(\beta - \theta_R) d\theta_R \quad (3.78)$$

et

$$dz_{\theta_P} = R \cdot \sin(\theta_T) \cdot \cos(\beta - \theta_R) d\theta_P \quad (3.79)$$

Les variances des erreurs sur la profondeur sont respectivement :

$$\sigma_{z\theta_R}^2 = (z \cdot \cos(\theta_T) \cdot \tan(\beta - \theta_R))^2 \sigma_{\theta_R}^2 \quad (3.80)$$

et

$$\sigma_{z\theta_T}^2 = (z \cdot \sin(\theta_T))^2 \sigma_{\theta_T}^2 \quad (3.81)$$

La variance des erreurs totales de profondeur dues à l'attitude et au pilonnement du porte-sondeur sont :

$$\sigma_{z_{attitude}}^2 = \sigma_{z\theta_R}^2 + \sigma_{z\theta_T}^2 + \sigma_h^2 \quad (3.82)$$

où σ_h^2 est la variance du pilonnement.

5.2.1.8.3 Erreurs dues au tirant d'eau, au surenfoncement, à l'accroupissement et à la position relative du transducteur : la mesure précise de l'immersion du transducteur et la connaissance du comportement en route du porte-sondeur, de son surenfoncement et de son accroupissement, sont fondamentales pour obtenir une bonne précision des profondeurs mesurées. Les erreurs affectant ces paramètres contribuent à l'erreur sur la profondeur, et ce, indépendamment de l'incidence des faisceaux.

La variance totale de l'erreur sur la sonde due à une erreur de mesure de l'immersion du transducteur (tirant d'eau) déjà exprimée au § 5.1.4.5, a pour valeur :

* NdT: Cet examen n'est vraiment valable que par fond plat. Quand le ping est relevé aux extrémités (on dit qu'il « sourit »), il y a lieu de refaire un profil de célérité, ou de réduire l'angle d'ouverture du SMF.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{tirant d'eau}}^2 + \sigma_{\text{surenfoncement}}^2 + \sigma_{\text{accroupissement}}^2 \quad (3.83)$$

où $\sigma_{\text{tirant d'eau}}^2$, $\sigma_{\text{surenfoncement}}^2$ et $\sigma_{\text{accroupissement}}^2$ sont les variances respectives des erreurs de tirant d'eau, de surenfoncement et d'accroupissement.

5.2.1.8.4 Erreur due à la réduction de la profondeur : cette erreur a déjà été analysée au § 5.1.4.8.

Le contrôle de qualité (QC) peut être effectué statistiquement par comparaison des profils de vérification avec la surface bathymétrique générée à partir des profils du sondage régulier. Les écarts statistiques générés par cette comparaison doivent être conformes aux précisions recommandées par la S-44.

La variance estimée des erreurs de profondeurs réduites obtenue en additionnant les variances précédentes, a pour expression :

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_c}^2 + \sigma_{z_{\text{attitude}}}^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{\text{marée}}^2 + \sigma_{z_{\text{détection}}}^2 \quad (3.84)$$

où $\sigma_{z_{\text{détection}}}$ correspond à la variance de l'erreur de profondeur telle que déterminée par l'algorithme de détection implanté dans le système SMF [Lurton, 2002].

L'erreur estimée de profondeur à 68% de confiance (ou 1σ) est la racine carrée de l'équation 3.84. Dans l'hypothèse d'une répartition gaussienne, l'erreur estimée à 95% de confiance (ou 2σ), est obtenue par substitution de tous les termes de forme σ_n^2 par $(2\sigma_n)^2$.

5.2.2 Sonars interférométriques

5.2.2.1 Les systèmes interférométriques : Ces systèmes utilisent la phase du signal sonore pour mesurer l'angle du front d'onde réfléchi par le fond marin ou par une cible acoustique. Ce principe diffère de celui du SMF qui forme au sein de la fauchée des faisceaux dont chacun détermine une profondeur, soit par l'amplitude soit par la phase [Hughes Clarke, 2000].

Ces sonars comportent deux antennes horizontales ou plus qui produisent chacune un faisceau étroit dans l'axe du profil et large en travers. L'une de ces antennes est utilisée pour l'émission et l'insonification d'une fraction de surface sous-marine, dispersant de l'énergie acoustique dans toutes les directions dont une partie retourne vers les transducteurs, lesquels mesurent l'angle du front d'onde. La portée est également calculée sur la durée du trajet aller-retour.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'angle du front d'onde. La méthode la plus simple consiste à combiner les signaux identiques de deux antennes, dont les interférences forment une figure de franges correspondant aux égales variations de phase des signaux acoustiques. Si les deux transducteurs sont séparés par une demi-longueur d'onde, le zéro de phase générera une frange unique perpendiculairement à l'axe des antennes dans une direction déterminée sans ambiguïté. Si les transducteurs sont séparés par plusieurs longueurs d'onde, l'angle du front d'onde correspondra aux directions des maxima (ou des minima) du signal reçu (Figure 3.42). Cependant, cette méthode utilisée seule ne produisant que quelques mesures, on lui ajoutera le gradient des franges afin d'étendre son domaine d'application.

5.2.2.2 Sonars à balayage vers l'avant : Les sonars à ouverture horizontale sont utilisés pour détecter les obstructions par balayage mécanique ou électronique sur l'avant du bâtiment. Ces systèmes sont particulièrement bien adaptés à la détection des obstructions dans les zones non ou mal hydrographiées.

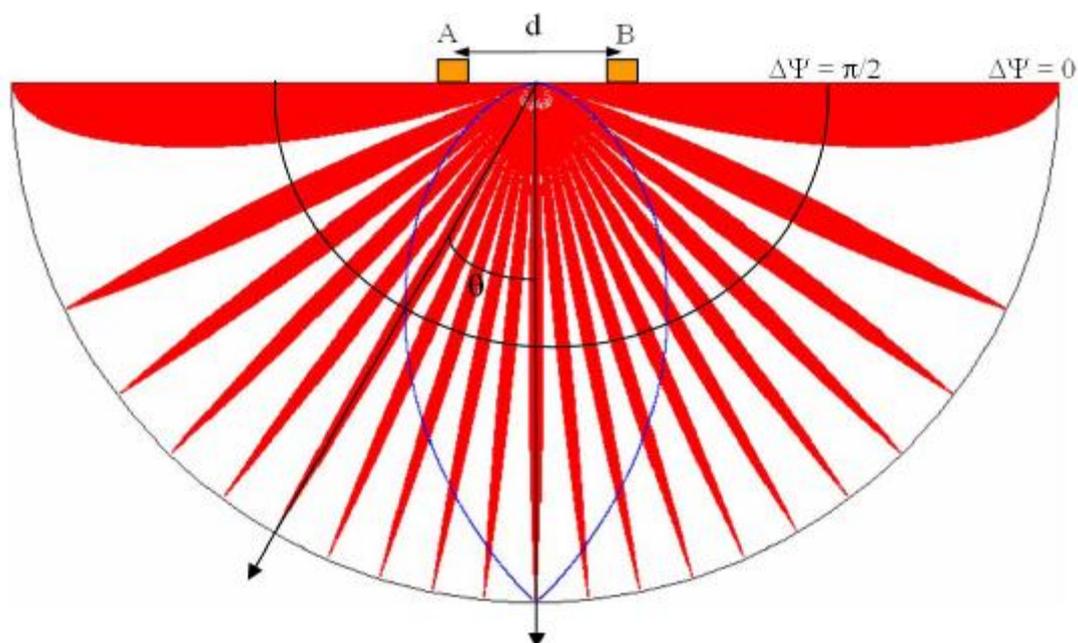


Fig. 3.42 « Figure de franges résultant d'interférences constructives ou destructives de signaux reçus par deux antennes situées à une distance l'une de l'autre égale à dix fois la longueur d'onde acoustique (rouge) et à la demi-longueur d'onde (bleu) »

6. SYSTEMES NON ACOUSTIQUES

En complément des systèmes acoustiques présentés dans les sections précédentes, d'autres systèmes électromagnétiques peuvent également être utilisés pour déterminer les profondeurs, tels que le laser aéroporté, les systèmes à induction électromagnétique et l'altimétrie satellitale. Ces systèmes, ainsi que certaines méthodes mécaniques anciennes de sonde et de dragage, sont décrits ci-après.

6.1 Sondeurs laser aéroportés

Les sondeurs laser⁴⁷ offrent à la fois une alternative et un complément aux systèmes acoustiques pour les levés en eaux peu profondes [Guenther et al., 1996].

Un sondeur laser est composé d'un dispositif de balayage, d'un système global de positionnement (GPS) et d'une centrale de mesure inertielle (IMU).

6.1.1 Principe de fonctionnement

Le laser hydrographique aéroporté, ou lidar (*Light Detection And Ranging*), est un système de mesure de la profondeur de l'eau. Ce système émet des impulsions laser à deux fréquences (bleu-vert et infrarouge) par balayage d'une fauchée perpendiculaire à l'axe de vol ; il enregistre le retour des deux impulsions lumineuses, la première réfléchiée par la surface de l'eau et la seconde par le fond marin (Figure 3.43). La différence de temps mesurée entre les deux retours est convertie en distance.

⁴⁷ Laser est l'acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Le laser consiste essentiellement en une diode émettrice qui produit une lumière cohérente à une fréquence spécifique.

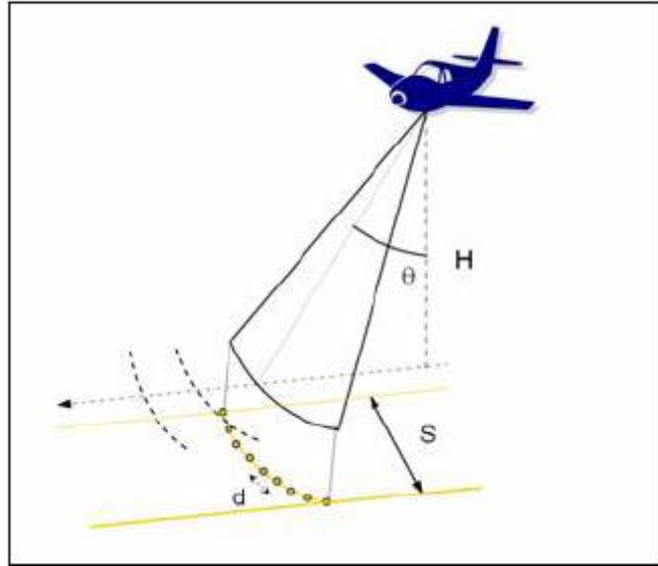


Fig. 3.43 « Géométrie de la mesure lidar »

La propagation de la lumière dans l'eau de mer, comme celle du son, est fonction de la température, de la pression et de la salinité. L'eau de mer est, jusqu'à un certain point, transparente à la lumière. Par conditions idéales, sans matières en suspension, l'atténuation est fonction de l'absorption et de la dispersion.

Pour les fenêtres infrarouges et visibles du spectre électromagnétique, la transparence de l'eau de mer dépend de la quantité de matières en suspension. C'est elle⁴⁸ qui fixe la limite d'utilisation du lidar en sondage. La profondeur maximale d'utilisation du lidar est approximativement 2 à 3 fois la profondeur observée avec un disque de Secchi⁴⁹.

Une impulsion lumineuse bi-fréquence est émise vers la mer. Une partie de l'énergie du faisceau infrarouge est réfléchié par la surface vers l'avion. Le faisceau bleu-vert pénètre dans l'eau, est partiellement réfléchi par le fond marin puis détecté par le récepteur. En utilisant un système précis de mesure du temps et connaissant la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau, la distance du fond peut être mesurée. Le calcul de la profondeur nécessite de tenir compte de la loi de réfraction de Descartes-Snellius (Figure 3.44).

$$\frac{\sin \theta_a}{c_a} = \frac{\sin \theta_w}{c_w} \quad (3.85)$$

où θ_a est l'angle d'incidence dans l'air, θ_w l'angle de réfraction dans l'eau de mer et c_a et c_w les vitesses respectives de la lumière dans l'air et dans l'eau.

⁴⁸ La transparence de l'eau de mer, c.-à-d. la transmission de la lumière visible à travers l'eau, peut être mesurée de façon quantitative en déterminant les profondeurs mesurées par un disque de Secchi.

⁴⁹ Le disque de Secchi est un instrument simple destiné à la mesure de la transparence de l'eau. Il est constitué d'une plaque blanche d'environ 30 cm de large, attachée horizontalement à une ligne graduée en mètres. Le disque est descendu dans l'eau de mer et la profondeur à laquelle il n'est plus visible est notée.

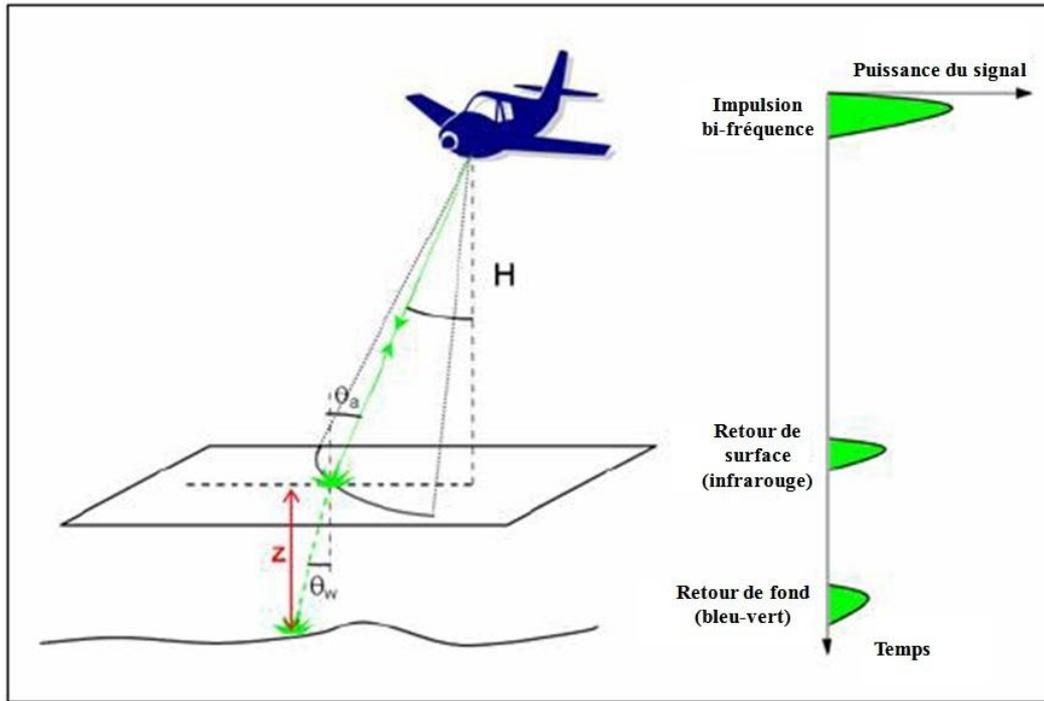


Fig. 3.44 « Principe de fonctionnement du lidar »

6.1.2 Capacités et limitations

Les lidars sont efficaces en eaux peu profondes en raison de leur rendement remarquable [Axelsson et Alfredsson - 1999] résultant de la vitesse de l'aéronef et de la largeur de balayage qui est indépendante de la profondeur de l'eau. A l'inverse, les SMF opèrent à faible vitesse et leur fauchée est proportionnelle à la profondeur (généralement 2 à 7 fois la profondeur de l'eau).

Les lidars assurent une couverture quasi-totale des fonds dans des conditions extrêmes de salinité et de température, là où les systèmes acoustiques peuvent produire des données de mauvaise qualité.

La sécurité des vedettes de sonde est un autre avantage du lidar, particulièrement dans les eaux dangereuses pour la navigation.

Malgré les avantages ci-dessus, les lidars sont très sensibles aux matières en suspension et à la turbidité dans la colonne d'eau. Par conditions optimales, c.-à-d. dans des eaux très claires, les profondeurs maximales accessibles peuvent atteindre 50, voire exceptionnellement, 70 mètres.

6.2 Systèmes électromagnétiques aéroportés

Les systèmes aéroportés à induction électromagnétique sont utilisés depuis plus de 40 ans pour prospector les gisements de minerais métalliques. Les progrès accomplis dans cette technique ont permis d'utiliser les principes d'induction électromagnétique pour cartographier les structures sous-marines par petits fonds. On trouvera des informations détaillées sur les systèmes d'induction électromagnétique aéroportés dans Zollinger & al. [1987] et Smith & Keating [1996].

6.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de ces systèmes est basé sur les techniques géophysiques de mesure de la conductivité électrique de l'assise rocheuse ou de l'épaisseur d'une couche conductrice.

Un dipôle émetteur fixé sur un hélicoptère ou un avion à voilure fixe produit un champ magnétique primaire tandis qu'un récepteur remorqué détecte le champ magnétique secondaire induit dans le sol.

En supposant que les couches sont horizontales, le traitement du signal en temps ou en fréquence peut être utilisé pour déterminer la conductivité σ_w , et l'épaisseur de la colonne d'eau, c.-à-d. la profondeur, et la conductivité σ_s du fond (Figure 3.45).

6.2.2 Capacités et limites

Grâce à leurs basses fréquences de fonctionnement, ces systèmes non acoustiques possèdent la capacité d'opérer à travers une épaisse couche de glace. Ils sont cependant limités à des profondeurs de moins de 100 mètres et ne sont utilisés actuellement que pour les levés de reconnaissance.

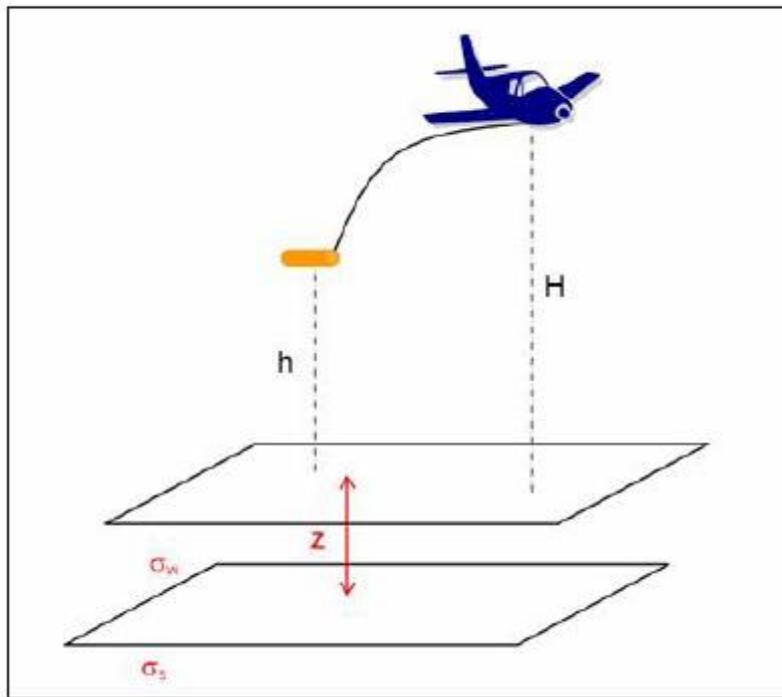


Fig. 3.45 « Principe de fonctionnement d'un système électromagnétique aéroporté »

6.3 Télédétection

Cette section présente les méthodes de détermination des profondeurs par photographies aériennes et imagerie satellitale comme moyens complémentaires de couverture de grandes surfaces.

6.3.1 La photobathymétrie

La photographie aérienne est utilisée couramment pour définir le trait de côte, reconnaître et planifier les levés hydrographiques, localiser les hauts-fonds et fournir une description qualitative des fonds marins mais non pour mesurer les profondeurs avec précision.

6.3.1.1 Principes opératoires

Les processeurs d'images numériques ont la capacité de corrélérer l'intensité de lumière et la profondeur. Cependant la variation d'intensité lumineuse est aussi dépendante des matières en suspension et de la réflectivité des fonds. C'est pourquoi une vérité-terrain doit être établie pour tenir compte de ces variations.

6.3.1.2 Capacités et limitations

L'application de la photobathymétrie, dans les limites présentes de cette technologie, reste principalement un outil de reconnaissance et de planification dans les zones où il n'y a pas, ou peu, d'information sur les profondeurs.

6.3.2 Topographie sous-marine par altimétrie satellitale

Les images satellitales dans la bande visible peuvent être utilisées d'une manière similaire à celles de la photobathymétrie. Cependant les satellites peuvent être équipés d'altimètres de haute résolution pour cartographier la surface des océans et, en leur appliquant un traitement de données approprié, il est possible d'estimer les profondeurs océaniques à travers le monde entier.

La surface de l'océan a une forme irrégulière qui réplique jusqu'à un certain point la topographie du fond de l'océan. Les détails cartographiques, comme les monts sous-marins, contribuent à la modification locale du champ gravitationnel de la terre, induisant une déviation de la verticale qui se traduit par une pente et un bombement de la surface de la mer. La surface de l'océan peut être cartographiée à l'aide d'altimètres satellitaires précis. L'anomalie, c'est à dire la différence entre la surface observée de l'océan et une surface théorique, telle que celle de l'ellipsoïde associé au WGS 84, peut être déterminée et la profondeur de l'eau estimée (Figure 3.46).

L'intégration de l'altimétrie satellitale et des relevés bathymétriques peut produire des ensembles de données plus fiables qui contribuent à la connaissance de la topographie des fonds marins dans les régions où les levés hydrographiques sont clairsemés [Smith et Sandwell, 1997].

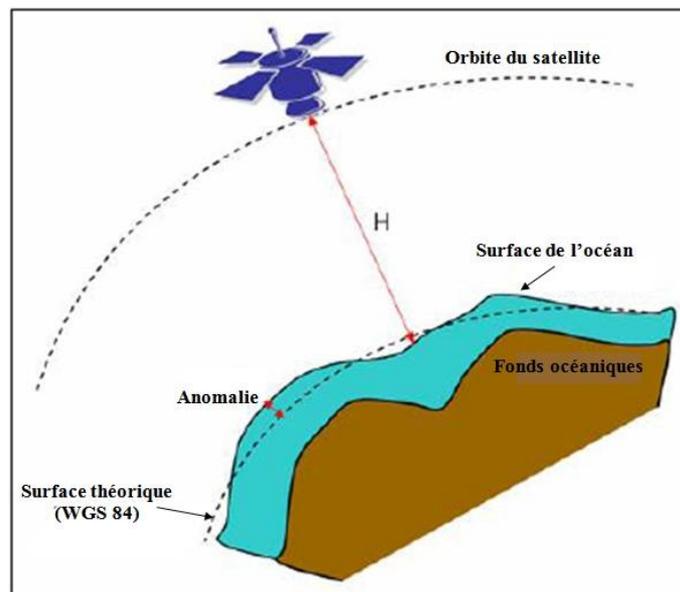


Fig. 3.46 « Topographie sous-marine par altimétrie satellitale »

6.4 Instruments mécaniques

Les instruments mécaniques ont été les premiers utilisés pour mesurer des profondeurs. Ils sont toujours valides et sont parfois encore employés de nos jours.

Les systèmes étudiés jusqu'à maintenant mesuraient indirectement les profondeurs et étaient sensibles aux caractéristiques de l'eau de mer, aussi, dans des conditions courantes, des erreurs grossières pouvaient-elles se glisser dans les mesures. Celles-ci provenaient d'échos générés au sein de la colonne d'eau et n'étaient pas, par conséquent, liées au fond marin. Elles pouvaient par exemple être

causées par des algues, des bancs de poisson, des couches diffusantes profondes, des panaches thermiques et des sédiments en suspension. Des erreurs pouvaient également se produire le long des quais quand un écho du quai lui-même était reçu par un lobe secondaire.

Les méthodes mécaniques (plombs de sonde ou perches graduées) ne sont pas sensibles à ces conditions environnementales particulières et peuvent offrir une méthode alternative.

Les méthodes de dragage hydrographique à fil ou à rail sont autant de façons non ambiguës de déterminer les profondeurs minimales au-dessus des épaves ou des obstructions et pour garantir les profondeurs de sécurité d'un chenal navigable.

6.4.1 Plombs de sonde et perches graduées

Le plomb de sonde peut aider l'hydrographe à lever les ambiguïtés résultant de faux échos.

Quand le fond est visible, un plomb de sonde ou une perche graduée peuvent être positionnés sur une tête de roche afin d'en coter la profondeur. Dans les zones où la détection à vue et la mesure sont plus difficiles, on leur préférera les méthodes de dragage hydrographique.

6.4.1.1 Descriptions

Le plomb de sonde est une ligne graduée attachée à un plomb. La ligne est utilisée pour déterminer les profondeurs à la main, généralement par fonds de moins de 50 mètres.

Une correction de compensation de rétrécissement ou d'élongation de la ligne doit être appliquée aux profondeurs obtenues, mais cette source d'erreur peut être éliminée par utilisation d'un fil comportant une âme en acier.

La perche graduée peut être également utilisée pour mesurer les sondes inférieures à 4 mètres.

Comme mentionné précédemment, ces instruments sont parfois utilisés de nos jours pour vérifier les sondes anormales mesurées par les sondeurs acoustiques en eaux peu profondes.

6.4.1.2 Sources d'erreurs

Les sources d'erreurs dans les mesures au plomb de sonde sont dues principalement à :

- a) à la courbure de la ligne provoquée par le courant. La correction peut être problématique, aussi est-il recommandé de n'entreprendre les mesures que lorsque l'effet du courant est négligeable, l'erre résiduelle du navire restant alors la seule source d'erreur de ce genre ;
- b) au pilonnement, qui contribue à fausser les mesures de profondeurs. Cette difficulté est surmontée en prenant la moyenne des lectures entre les crêtes et les creux des vagues.

6.4.1.3 Mise en œuvre, enregistrement et traitement des données

La mesure directe du fond doit être faite navire stoppé et sans erre, si possible en évitant les périodes de courant fort et de marée. Entre deux mesures successives, il est d'usage de garder le plomb de sonde à la traîne afin de détecter toute autre remontée de fond caractéristique.

6.4.2 Drague-rail

Les sondages au sondeur monofaisceau ne mesurent la profondeur que le long des profils, laissant la zone intermédiaire inexplorée ou sans information détaillée bien que le sondeur latéral soit souvent utilisé pour détecter et localiser les structures remarquables situées entre les profils. Il est possible que

le sondeur monofaisceau ne puisse pas déterminer la cote minimale des têtes de roches ou des épaves, surtout quand l'écho est trop faible. C'est notamment le cas des mâts et des ferrailles allongées.

En garantissant une profondeur minimale au-dessus des obstacles, le dragage hydrographique précis à fil ou à rail est un moyen approprié pour assurer la sécurité de la navigation au sens de la S-44. Il peut même être considéré comme suffisant pour les levés d'ordre spécial ou de premier ordre.

6.4.2.1 Description

La drague-rail est une barre de 5 à 6 mètres environ dont les extrémités peuvent être lestées pour en réduire le relèvement en route. Elle est suspendue sous le bâtiment au moyen de lignes graduées.

Cet instrument est très facile à fabriquer ; sa mise au point se fait par essais successifs. Elle est souvent plus efficace et facile à manœuvrer qu'une drague à fil.

6.4.2.2 Méthode opératoire

La drague-rail est suspendue horizontalement sous le bâtiment. Elle peut être équipée de culbuteurs ou de tout autre senseur pour signaler une croche sur le fond.

L'immersion de la drague-rail doit être rapportée à la surface de référence verticale, la hauteur de la marée enregistrée pendant le dragage et les profondeurs réduites en conséquence.

Une couverture surfacique totale de la zone navigable doit être réalisée au seuil de sécurité fixé. Si une obstruction est détectée, une recherche complète doit être exécutée autour de l'obstacle afin de confirmer que la cote minimale a bien été atteinte.

6.4.3 **Drague à fil**

En tant qu'alternative à la drague-rail, la drague à fil (drague Oropesa)* peut être utilisée pour déterminer la profondeur minimale au-dessus d'une structure sous-marine quand, d'après la rugosité du fond, l'existence de pinacles ou d'obstructions est suspectée.

Des informations détaillées sur le dragage à fil peuvent être trouvées dans le manuel d'hydrographie du NOAA [1976].

6.4.3.1 Description

La drague à fil est constituée de deux panneaux divergents analogues à ceux utilisés par les chalutiers et reliés entre eux par une chaîne à maillons ovales de 40 à 60 mètres. L'attelage est capelé sur l'embarcation et remorqué de telle sorte que la drague soit trainée au-dessus du fond approximativement à 60 mètres sur l'arrière [manuel d'hydrographie du NOAA - 1976].

* NdT : Les missions hydrographiques françaises utilisaient des dragues à fil dites « dragues américaines » remorquées par deux embarcations et qui furent déclassées définitivement vers 1990.

REFERENCES

- Artilheiro, F. (1996) *“Analysis and Procedures of Multibeam Data Cleaning for Bathymetric Charting”* Master’s Report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton New Brunswick, Canada.
- Axelsson, R. and M. Alfredsson (1999) *“Capacity and Capability for Hydrographic Missions”* US Hydrographic Conference 1999. Wiley and Sons, Toronto.
- Clay, C. e H. Medwin (1977) *“Acoustical Oceanography”* Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference ‘96, Halifax, NS, Canada, pp. 25-31.
- Godin, A. (1996). *“The Calibration of Shallow Water Multibeam Echo-Sounding Systems”* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice. 15, pp. 54-71.
- Guenther, G., R. Thomas, and P. LaRocque (1996). *“Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System”* Revue hydrographique internationale (LXXII), Monaco, pp. 37-69.
- Hare, R. (1995). *“Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding”* In: P. Cook and C. Carlton (eds) Continental Shelf Limits - The Scientific and Legal Interface. Oxford University Press, New York.
- Hughes Clarke, J. (2000). *“Present-day Methods of Depth Measurement”* Wiley and Sons, Toronto.
- Kinsler, L., A. Frey, A. Coppens, and J. Sanders (1982). *“Fundamentals of Acoustics”*. Canadian Hydrographic Conference 2002.
- Lurton, X. (2002). *“Acoustical Measurement Accuracy Modelling for Bathymetric Sonars”* Revue hydrographique internationale, LXV(2), p. 25.
- Moustier, C. de- (1988) *“State of the Art in Swath Bathymetry Survey Systems”* Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration, J.M.F. Moura and I.M.G. Lourtie Eds., pp. 329-354.
- Moustier, C. de- (1993). *“Signal Processing for Swath Bathymetry and Concurrent Seafloor Acoustic Imaging”* Organisation Hydrographique Internationale, Monaco.
- OHI (1998). *“Dictionnaire hydrographique” - Publication spéciale n° 32, 5^{ième} édition* Organisation Hydrographique Internationale, Monaco.
- OHI (2008). *“Normes de l’OHI pour les levés hydrographiques” - Publication spéciale n° 44, 5^{ième} édition* Organisation Hydrographique Internationale, Monaco.
- OMG (1996). *“Multibeam Sonar Surveying Training Course. Ocean Mapping Group”* University of New Brunswick.

- Pickard, G. and W. Emery (1990). *“Descriptive Physical Oceanography – An Introduction” 5th edition* Pergamon Press, Oxford.
- Pföhner, F. (1993). *“Model for Calculation of Uncertainty in Multibeam Depth Soundings”* Report from Simrad Subsea AS, Horten, Norway, FEMME 93, 16 p.
- Seippel, R. (1983). *“Transducers, Sensors and Detectors”* Prentice-Hall.
- Smith, R. and P. Keating (1996). *“The usefulness of multicomponent, time-domain airborne electromagnetic measurements”* Geophysics, Vol. 61, No. 1, pp. 74–81.
- Smith, W. and D. Sandwell (1997). *“Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Sounding”* Science 277. pp. 1956-1962.
- Urlick, R. (1975). *“Principles of Underwater Acoustics”* McGraw-Hill, Toronto.
- Zollinger, R., H. Morrison, P. Lazenby, and A. Becker (1987). *“Airborne Electromagnetic Bathymetry”* Geophysics, Vol. 52 no. 8, pp. 1172-1137.

BIBLIOGRAPHIE

- Andersen, O. and P. Knudsen (1998). *“Global Gravity Field from ERS1 and GEOSAT Geodetic Mission Altimetry”* Journal of Geophysical Research 103(C4), pp. 8129-8137.
- Arabelos, D. (1997). *“On the Possibility to Estimate the Bottom Topography from Marine Gravity and Satellite Altimetry Data Using Collocation”* In: R. Forsberg, M. Feissel, R. Dietrich (eds) Geodesy on the Move Gravity, Geoid, Geodynamics, and Antarctica IAG Symposia 119, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, pp. 105-112.
- Burtch, R. (2002). *“Lidar Principles and Applications”* IMAGIN Conference 2002, Traverse City.
- Calmant, S. and N. Baudry (1996). *“Modelling Bathymetry by Inverting Satellite Altimetry Data: A Review”* Marine Geophysics Research 18, pp. 23-134.
- Collet, C., J. Provost, P. Rostaing, P. Pérez, and P. Bouthemey (2000). *“SPOT Satellite Data Analysis for Bathymetric Mapping”* IEEE, pp. 964-967.
- Denbigh, P. (1989). *“Swath bathymetry: Principles of operation and an analysis of errors”* IEEE Journal of Oceanic Engineering 14, pp. 289–298.
- Dixon, T., M. Naraghi, M. McNutt, and S. Smith (1983). *“Bathymetric Prediction from SEASAT Altimeter Data”* Journal of Geophysical Research 88, pp. 1563-1571.
- Durey, L., G. Terrie, R. Arnone, and A. Martinez (1997). *“Bottom Reflectance Maps from Hyperspectral Sensors: An Application to AAHS Data”* In Proceedings, ERIM Fourth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Orlando, pp. 17-19.
- Geng, X. and A. Zielinski (1999). *“Precise Multibeam Acoustic Bathymetry”* Marine Geodesy, 22, pp. 157-167.
- Guenther, G. (1985). *“Airborne Laser Hydrography: System Design and Performance Factors”* NOAA Professional Paper Series, National Ocean Service.
- Guenther, G., A. Cunningham, P. LaRocque, and D. Reid (2000). *“Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry”* Proceedings of EARSeL Symposium 2000. Dresden, Germany.

- Guenther, G., M. Brooks, and P. LaRocque (1998). *"New Capabilities of the SHOALS Airborne Lidar Bathymeter"* Proceedings 5th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, ERIM International, October 5-7, San Diego, CA, Vol. I, 47-55.
- Guenther, G., P. LaRocque, and W. Lillycrop (1994). *"Multiple Surface Channels in SHOALS Airborne Lidar"* SPIE: Ocean Optics XII, Vol. 2258, pp. 422-430.
- Guenther, G., R. Thomas, and P. LaRocque (1996). *"Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System"* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters from Theory to Practice, Vol. 2964, pp. 54-71.
- Hammerstad E. (1995). *"Simrad EM 950/1000 - Error Model for Australian Navy"* Extract of Report, Simrad Subsea AS, Horten, Norway, 4 p.
- Hare, R. and A. Godin (1996). *"Estimating Depth and Positioning Errors for the Creed/ EM 1000 Swath Sounding System"* Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference '96. Halifax, NS, Canada, pp. 9-15.
- Herlihy, D., B. Hillard, and T. Rulon (1989). *"National Oceanic and Atmospheric Administration Sea Beam System - Patch Test"* Revue hydrographique internationale, Monaco, LXVI(2), pp. 119-139.
- Hughes Clarke, J. (1995). *"Reference Frame and Integration."* Lecture IV-1 in Coastal Multibeam Hydrographic Surveys. United States / Canada Hydrographic Commission Multibeam Working Group, St. Andrews, New Brunswick, Canada.
- Hughes Clarke, J. (1995a). *"Interactive Bathymetry Data Cleaning"* Lecture X-4 from Coastal Multibeam Hydrographic Surveys. United States / Canada Hydrographic Commission Multibeam Working Group, St. Andrews, New Brunswick, Canada.
- Ingham, A. (1992). *"Hydrography for the Surveyor and Engineer"* 3rd edition, BSP, Oxford.
- Irish, J. and W. Lillycrop (1999). *"Scanning Laser Mapping of the Coastal Zone: The SHOALS System"* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54. pp. 123-129.
- Irish, J., J. McClung, and W. Lillycrop (2000). *"Airborne Lidar Bathymetry: the SHOALS System"* PIANC Bulletin. 2000 (103), pp. 43-53.

- Jung, W. and P. Vogt (1992). *"Predicting Bathymetry from Geosat ERM and Ship Borne Profiles in the South Atlantic Ocean"* Tectonophysics 210, pp. 235-253.
- Lillycrop W., L. Parson, and J. Irish (1996). *"Development and Operation of the SHOALS Airborne Lidar Hydrographic Survey System"* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters from Theory to Practice, Vol. 2964, pp. 26-37.
- Lillycrop, W. and J. Banic, (1993). *"Advancements in the US Army Corps of Engineers Hydrographic Survey Capabilities: The SHOALS System"* Marine Geodesy, Vol. 15, pp. 177-185.
- Lillycrop, W., J. Irish, and L. Parson (1997). *"SHOALS System: Three Years of Operation with Airborne Lidar Bathymetry - Experiences, Capability and Technology Advancements"* Sea Technology, Vol. 38, No. 6, pp. 17-25.
- Lillycrop, W., L. Parson, L. Estep, P. LaRocque, G. Guenther, M. Reed, and C. Truitt (1994). *"Field Test Results of the U.S. Army Corps of Engineers Airborne Lidar Hydrographic Survey System"* Proceedings of the 6th Biennial National Ocean Service International Hydrographic Conference, Norfolk, VA, pp. 144-151.
- Parson, L., W. Lillycrop, C. Klein, R. Ives, and S. Orlando (1996). *"Use of LIDAR Technology for Collecting Shallow Bathymetry of Florida Bay"* Journal of Coastal Research, Vol. 13, No. 4.
- Pope, R., B. Reed, G West, and W. Lillycrop. (1997). *"Use of an Airborne Laser Depth Sounding System in a Complex Shallow-water Environment"* Proceedings of Hydrographic Symposium XVth International Hydro Conference. Monaco.
- Quinn, R., (1992), *"Coastal Base Mapping with the LARSEN Scanning Lidar System and Other Sensors"* Proceedings, 5th Biennial National Ocean Service International Hydrographic Conference, Baltimore.
- Riley, J. (1995). *"Evaluating SHOALS Bathymetry Using NOAA Hydrographic Survey Data"* Proceedings 24th Joint Meeting of UNIR Sea Bottom Surveys Panel, Tokyo, Japan.
- Sinclair, M. (1998). *"Australians Get on Board with New Laser Airborne Depth Sounder"* Sea Technology, June 1998, pp. 19-25.
- Sinclair, M. (1999). *"Laser Hydrography - Commercial Survey Operations"* Hydro 99.
- Smith, R. and M. Smith (2000). *"Airborne Lidar and Airborne Hyperspectral Imagery: A Fusion of Two Proven Sensors for Improved Hydrographic Surveying"* Proceedings Canadian Hydrographic Conference 2000.

- Thomas, R. and G. Guenther (1990). *"Water Surface Detection Strategy for an Airborne Laser Bathymeter"* SPIE: Ocean Optics X, Vol. 1302, pp. 597-611.
- USACE (2002). *"Hydrographic Surveying Manual"* U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
- Vergos, G. and M. Sideris (1998). *"On Improving the Determination of the Gravity Field by Estimating the Bottom Ocean Topography with Satellite Altimetry and Shipborne Gravity Data"* Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Whitman, E. (1996). *"Laser Airborne Bathymetry - Lifting the Littoral"* Sea Technology, August 1996, pp. 95-98.
- Wozencraft, J. (2001). *"The Coastal Zone Revealed Through Shoals Lidar Data"* Proceedings US Hydrographic Conference 2001.
- Wright, C. and J. Brock (2002). *"EAARL: A LIDAR for Mapping Shallow Coral Reefs and Other Coastal Environments"* Seventh International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments Proceedings 2002.
- Yakima, W., Wilt M., H. Morrison, K. Lee, and N. Goldstein (1989). *"Electromagnetic Sounding in the Columbia Basin"* Geophysics, Vol. 54, No. 8, pp. 952-961.
-

CHAPITRE 3 – ANNEXE A

COORDONNÉES ET SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE

Les sondes sont mesurées par un navire en mouvement, associé généralement à un système de référence à trois axes orthogonaux (système de coordonnées du navire) utilisé pour positionner ses capteurs hydrographiques et pour mesurer son attitude ainsi que son pilonnement.

L'attitude du bâtiment se ramène à des déplacements angulaires autour de ces axes, roulis transversal autour de l'axe des x, tangage longitudinal autour de l'axe des y, et lacets horizontaux autour de l'axe des z. Considérons un système orthogonal de référence direct avec l'axe des z pointé vers le bas et la convention habituelle pour la plupart des capteurs d'attitude, à savoir roulis positif quand le navire gite vers tribord, tangage positif quand la proue pointe vers le haut, et lacet positif quand la rotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre.

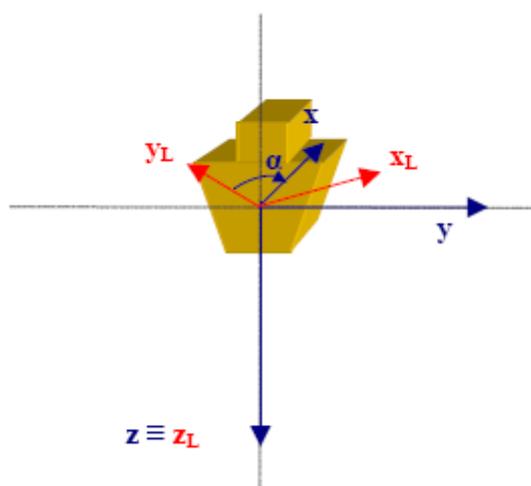


Fig. A.1 « Système de référence du navire »

Dans la figure A.1, la rotation $R_1(\theta)$ dans le plan (y,z) , c.-à-d. autour de l'axe des x, peut être exprimée par la matrice de rotation suivante :

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{A. 1})$$

et les rotations $R_2(\theta)$ et $R_3(\theta)$ autour de l'axe des y et des z par, respectivement :

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (\text{A. 2})$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A. 3})$$

La transformation qui résulte de ces trois rotations successives est égale au produit des matrices de rotation. Chaque nouvelle rotation fait l'objet d'une multiplication à gauche de ce produit.

En considérant les rotations successives R_1 , R_2 et R_3 d'angles θ_1 , θ_2 et θ_3 autour des axes x , y et z , la matrice de transformation est donnée par l'égalité :

$$R_3(\theta_3) \cdot R_2(\theta_2) \cdot R_1(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3)\cos(\theta_2) & \sin(\theta_3)\cos(\theta_1) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & \sin(\theta_3)\sin(\theta_1) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) \\ -\sin(\theta_3)\cos(\theta_2) & \cos(\theta_3)\cos(\theta_1) - \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_3)\sin(\theta_1) + \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_2)\cos(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (\text{A. 4})$$

Les profondeurs mesurées, rapportées initialement au système de coordonnées du navire, doivent être exprimées dans le système local qui est un trièdre orthogonal indirect, dont l'axe des x est pointé vers l'est, l'axe des y vers le nord géographique et l'axe des z vers le bas.

Un navire hydrographique étant soumis au roulis, au tangage et aux lacets, notés respectivement θ_R , θ_T et α , les coordonnées $(x', y', z')_N$ du faisceau de portée oblique R et d'incidence β (Figure A.2) devront être transposées du système de coordonnées trirectangle direct du navire vers le système de coordonnées trirectangle indirect local, soit $(x, y, z)_L$.

Pour ce faire, les rotations autour des axes x , y et z devront être introduites avec des signes inversés, soit $-\theta_R$ pour le roulis, $-\theta_T$ pour le tangage et $-\alpha$ pour les lacets.

De plus, puisqu'on passe d'un trièdre direct à un trièdre indirect, les axes des z étant l'un et l'autre orientés vers le bas, il faudra permuter les x et les y en changeant de système, ce qui est obtenu en appliquant la matrice R_{xy} .

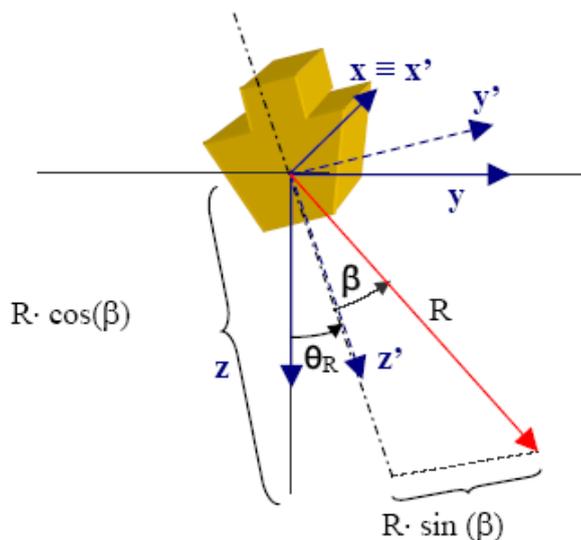


Fig. A.2 « Passage de coordonnées navire en coordonnées locales »

La transformation des coordonnées du faisceau (R, β) du système de coordonnées navire dans le système local sera exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_L = R_{xy} \cdot R_3(-\alpha) \cdot R_2(-\theta_T) \cdot R_1(-\theta_R) \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}_N = T(\alpha, \theta_T, \theta_R) \begin{bmatrix} 0 \\ R \sin(\theta) \\ R \cos(\theta) \end{bmatrix}_N \quad (\text{A. 5})$$

où R_{xy} (passage d'un trièdre direct à un trièdre indirect) est donné par la matrice :

$$R_{xy} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

et $T(\alpha, \theta_T, \theta_R)$ est la matrice de passage permettant de transformer les coordonnées navire en coordonnées locales. Cette matrice a pour expression :

$$T(\alpha, \theta_T, \theta_R) = \begin{bmatrix} \sin(\alpha) \cos(\theta_T) & \cos(\alpha) \cos(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R) & -\cos(\alpha) \sin(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R) \\ \cos(\alpha) \cos(\theta_T) & -\sin(\alpha) \cos(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R) & \sin(\alpha) \sin(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R) \\ -\sin(\theta_T) & \cos(\theta_T) \sin(\theta_R) & \cos(\theta_T) \cos(\theta_R) \end{bmatrix}$$

En définitive, les nouvelles coordonnées du faisceau (R, β) dans le système local s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_L = \begin{bmatrix} \{\cos(\alpha) \cos(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R)\} \cdot R \sin(\beta) + \{-\cos(\alpha) \sin(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R)\} \cdot R \cos(\beta) \\ \{-\sin(\alpha) \cos(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R)\} \cdot R \sin(\beta) + \{\sin(\alpha) \sin(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R)\} \cdot R \cos(\beta) \\ \cos(\theta_T) \sin(\theta_R) \cdot R \sin(\beta) + \cos(\theta_T) \cos(\theta_R) \cdot R \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

en se rappelant que l'angle β d'incidence du faisceau est compté positivement vers tribord et négativement vers bâbord.

PAGE LAISSÉE INTENTIONNELLEMENT EN BLANC