

Sonars cartographiques et interférométrie associée

Christophe Sintès, Didier Guériot, Gérard Llor

GET/ENST-Bretagne

Technopôle Brest-Iroise

CS 83818

29238 Brest CEDEX 3

France

E-mail : Christophe.Sintes@enst-bretagne.fr

E-mail : Didier.Gueriot@enst-bretagne.fr

E-mail : Gerard.Llor@enst-bretagne.fr



interférométrie est une technique qui prend une place de plus en plus importante dans les applications sonars et en particulier pour les sonars cartographiques. Ceci s'explique par la simplicité de mise en œuvre de cette technique et le gain de précision qu'elle apporte. Cet article propose d'analyser les fonctionnements de différents types de sonars cartographiques, en particulier les sonars latéraux et multifaisceaux. Dans un premier temps sont analysés les fonctionnements spécifiques de ceux-ci, en mode classique puis en mode interférométrique. Si cette technique s'adapte très bien à ces appareils de télédétection, le traitement des données nécessite quelques précautions avant de pouvoir reconstruire de manière tridimensionnelle, l'environnement du fond sous-marin. Ces précautions concernent les hypothèses de base à respecter ainsi que la prise en considération de l'impact du bruit sur la qualité de la phase interférométrique. En définitive, l'interférométrie reste une technique simple qui permet d'accroître les performances des outils de télédétection sous-marine.

Introduction et principe de base

Le principe de la télédétection sous-marine moderne était à ses prémices assez original, puisque l'idée consiste à remplacer des méthodes de mesures physiques (perche ou plomb de sonde) par une chose immatérielle : une onde acoustique. Pour ce faire, il faut envoyer une onde dans le milieu de propagation sous-marin ; ce dernier module ou modifie cette onde et une partie de celle-ci est captée par un récepteur. En général, récepteur et émetteur sont confondus par souci de simplicité. Concrètement, l'onde est modulée par les variations du fond sous-marin, par la présence d'objets ou d'inhomogénéités. Généralement ce sont ces modulations qui sont observées et interprétées. Ce premier principe de télédétection appliqué à la mesure d'une distance, a donné son nom au sonar (*sound navigation and ranging*). Les applications sonar ne se contentent pas seulement de la notion de modulation en fonction du temps (traitement de signal) mais elles s'intéressent également à la direction de la modulation

(traitement d'antenne), pour estimer la direction de l'écho. La suite présente des applications typiques de cartographie au travers de sonars multifaisceaux et de sonars latéraux. Cette description bien que non exhaustive permet de bien illustrer la problématique de l'interférométrie dans le cadre sous-marin.

Les différents types de sonars cartographiques

Cette section vise à donner une idée synthétique du principe de fonctionnement d'un sonar soit en vue de former une image (pour les sonars latéraux), soit de fournir des points de sondes pour les sondeurs multifaisceaux.

Sondeur multifaisceaux

À partir des années 1980, avec la maîtrise de la technique des réseaux phasés, le sondeur bathymétrique peut par une combinaison de formation de voies à la réception former plusieurs cellules d'insonification en une seule émission (un ping). Ces cellules sont réparties sur une ligne perpendiculaire à l'avance du navire ce qui permet au sondeur multifaisceaux d'avoir une fauchée plus large qu'un sondeur monofaisceau et sans trou de couverture. Cela diminue d'autant le nombre de passages parallèles à effectuer, augmentant ainsi le taux de couverture horaire.

À titre indicatif, cette technique fournit une quantité importante de sondes à chaque émission sonar : les faisceaux sont ouverts de 1° en moyenne (voire moins pour les multifaisceaux de dernière génération, par exemple $0,5^\circ$ pour le sondeur Reson Seabat 7125) pour une couverture totale pouvant atteindre $2^\circ 75'$, soit une largeur de la fauchée de 7,5 fois la hauteur d'eau sous le sondeur. Le nombre de voies formées en réception est couramment de plusieurs centaines (880 voies pour le récent Seabat 7150). Les sondes bathymétriques ainsi mesurées atteignent une précision de 0,2 % de la hauteur d'eau. L'Organisation Internationale Hydrographique exige que la précision soit inférieure à 1 %. Le sondeur multifaisceaux est donc un outil privilégié pour les travaux d'hydrographie. La figure 1 présente la configuration typique d'un échosondeur multifaisceaux.

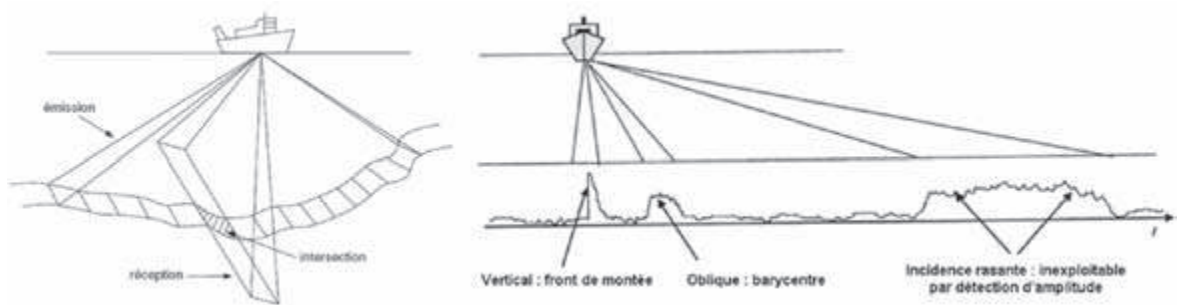


Fig. 1 : Principe de fonctionnement d'un sondeur multifaisceaux

Sonar latéral

Le sonar latéral, comme son nom l'indique, insonifie latéralement le fond et non verticalement comme précédemment pour le sondeur vertical. Le sonar latéral est un sonar à illumination à incidence rasante. Généralement, ce sonar se déplace à hauteur constante et proche du fond pour percevoir ce dernier à faible rasance. Pour ce faire, comme indiqué sur la figure 2, il est monté soit sur un poisson remorqué, soit sur un engin autopropulsé (AUV: Autonome underwater vehicle; UUV: Unnamed underwater vehicle). Grâce à l'angle de rasance, la moindre variation de relief du fond génère une ombre portée sur le fond de dimension bien supérieure à l'objet, ce qui va aider à sa détection et éventuellement sa classification.

Le sonar latéral émet une onde sonore brève (parfois modulée en fréquence associée à un traitement par compression d'impulsion), puis enregistre les signaux lui revenant du fond. Cette émission très directive est faite avec une ouverture réduite selon l'axe Y et importante dans le sens vertical. Seuls les réflecteurs présents dans une zone « large de ΔY » et qui s'étend de la verticale du sonar à la fin de la portée, vont réémettre de l'énergie (cf. figure 2). Or, tous ces micro-émetteurs ne sont pas à la même distance du capteur, par conséquent, les instants d'arrivée de leurs contributions sur ce capteur sont différents : plus les réflecteurs sont éloignés du capteur, plus leurs échos arrivent tardivement.

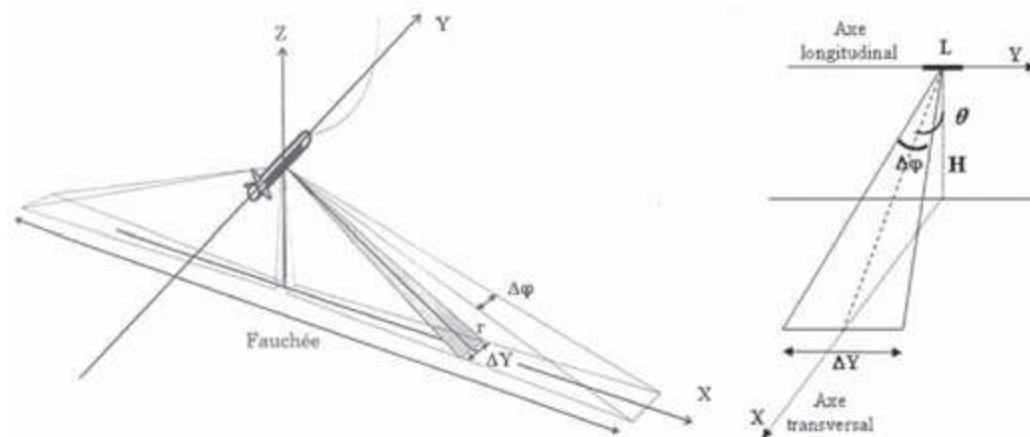


Fig. 2 : Principe du sonar latéral (avec coupe transversale sur une fauchée)

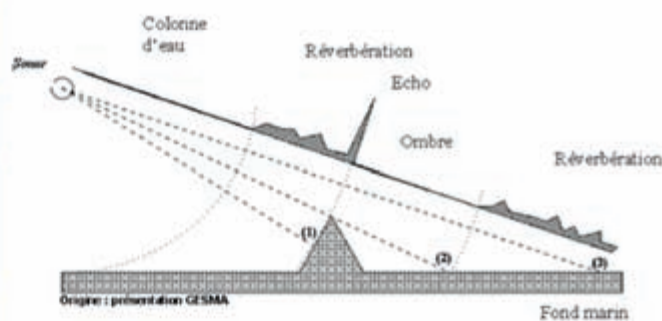
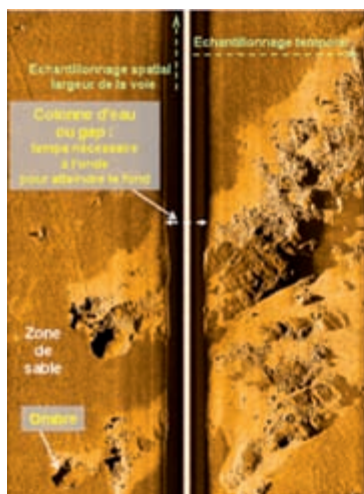


Fig. 3 : Exemple d'image issue d'un sonar latéral avec une illustration de l'évolution du niveau du signal reçu en fonction du temps

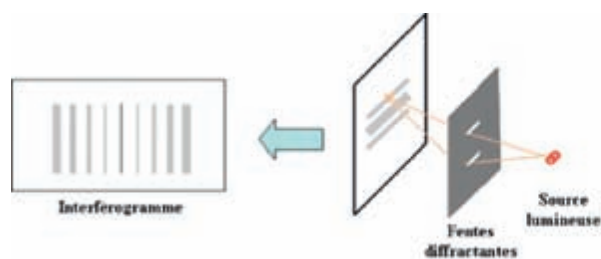
La juxtaposition de ces tranches de fond sous-marin insonifiées, fournit une représentation bidimensionnelle du signal réverbéré, visualisée sous forme d'image dont le contraste est associé à l'amplitude ou à l'énergie du signal. Pour que la représentation soit conforme, il faut que les zones d'illumination ne se chevauchent pas d'un *ping* à l'autre et que la couverture de la zone soit continue. La facilité d'interprétation et la qualité des images issues des sonars modernes sont étonnantes. La figure 3 montre la capacité de cette technique à former des images qui sont intuitivement faciles à interpréter tant la proximité est grande avec les images optiques. La similitude d'une telle image par rapport à une image « optique », correspondrait à une source de lumière rasante (issue du sonar) avec une caméra de visualisation située à la verticale de la scène. Néanmoins, la comparaison n'est pas aussi simple car autant le processus d'émission et d'illumination est conforme à une source lumineuse étendue disposée sur la trajectoire du sonar, autant le processus d'acquisition est temporel et non spatial comme dans le cas d'une caméra.

Limites des sonars cartographiques

Les deux types de sonars définis précédemment trouvent leurs limites. Le sonar latéral est incapable de percevoir un relief sans présence d'ombre c'est-à-dire dans le cas où les variations de relief sont parallèles à l'avancement du sonar ou quand la pente du relief est quasi parallèle à l'angle du plan oblique. Cette limite provient de la méthode d'acquisition en réception qui est basée sur un échantillonnage temporel du signal (par opposition à un échantillonnage angulaire) et peut rendre difficile une interprétation correcte, dans certaines conditions. Dans ce cas, il faut recourir à une représentation 3D du milieu pour le sonar latéral et en particulier, connaître l'angle d'arrivée du front d'onde (c'est-à-dire l'angle du plan oblique). L'interférométrie peut s'avérer une très bonne méthode pour remédier à ce problème ; en effet, elle permet grâce une mesure de différence de marche d'associer à chaque pixel de l'image un angle de visée et une distance, et de ce fait, une localisation.

Pour un sondeur multifaisceaux, l'information angulaire est disponible et donnée par l'angle de formation de voie. Le principal problème du sondeur multifaisceaux est le dimensionnement de l'échantillonnage angulaire qui est contraint par la taille de l'antenne. En particulier, pour des angles rasants, la méthode de détection de l'instant d'arrivée du front d'onde dans l'angle solide de réception, trouve sa limite car la surface au sol insonifiée est importante et la sonde est mal localisée en distance. La figure 1 (région de droite) illustre très bien ce problème.

(1) En raison du phénomène de diffraction, les deux fentes se comportent comme deux sources lumineuses cohérentes (c'est-à-dire en phase) émettant leur énergie vers l'écran situé en arrière.



Interférométrie [1]

L'interférométrie optique est basée sur la cohérence des photons issus d'un même train d'onde. Ces derniers étant en phase, ils peuvent interférer et donner des figures d'interférence. Le dispositif de Young tel que montré sur la figure 4, met en évidence ce phénomène.

La cohérence des deux ondes $\langle E_1(t)E_2(t) \rangle_T$ permet au produit scalaire de varier de -1 à $+1$ et, ainsi d'amplifier ou d'annuler l'intensité résultante I qui vaut alors :

$$I = K \langle E_1^2 \rangle + K \langle E_2^2 \rangle + \underbrace{2KE_1E_2 \langle \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle}_{\text{terme d'interférence}} \quad (2)$$

Avec K une constante, E_1 , E_2 , les champs électrostatiques issus des deux fentes, et φ_1 , φ_2 leurs phases respectives. Le terme d'interférence dépend la différence de marche δM entre les rayons.

Celle-ci génère un déphasage $\Delta\phi$ qui explique la périodicité des raies.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta M \quad \text{avec } \lambda, \text{ la longueur d'onde.} \quad (3)$$

Étant donné que les trains d'onde d'une onde lumineuse monochromatique ont une phase aléatoirement distribuée, ils sont décorrélés entre eux. En considérant un train d'onde particulier, les trains d'onde suivants ne participent pas à la sommation cohérente avec celui-ci. Ceci explique la raison pour laquelle, il est nécessaire d'utiliser une source lumineuse dite monochromatique (lampe à mercure ou à sodium, par exemple) car ces sources présentent un encombrement spectral très limité et un encombrement temporel (c'est-à-dire une longueur de cohérence du train d'onde) important. Ainsi, les photons qui se projettent sur l'écran, possèdent la même fréquence et sont en phase. La durée de la sommation par intégration est alors optimale.

Interférométrie sonar latéral [2]

La transposition de ce principe optique au sonar latéral est immédiate. Le fond marin réverbérant est associé à la source sonore monochromatique et les fentes d'Young aux deux antennes réceptrices du sonar. La source radiante, dans ce cas, n'est pas équidistante des deux antennes contrairement à la configuration d'un dispositif de type « fentes d'Young » et la différence de marche provient de la non-équidistance des antennes à la source. L'écran a été « remplacé » par le calcul du produit scalaire des valeurs des deux champs de pression cohérents, mesurés sur les antennes.

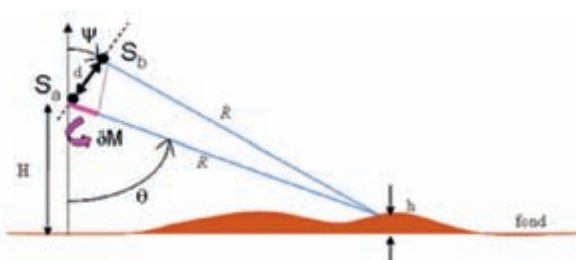


Fig. 4 : Dispositif de Young & configuration géométrique typique d'un sonar interférométrique

Les signaux captés par les antennes subissent également les opérations classiques d'échantillonnage et de formation de voies. L'interférométrie se fait sur l'enveloppe complexe du champ de pression (homologue au champ électromagnétique, pour cette application) par multiplication des enveloppes complexes des signaux : $S_a S_b^*$ avec S_a , l'enveloppe complexe de la voie a et S_b , l'enveloppe complexe de la voie b. L'argument de cette expression donne $\varphi_a - \varphi_b$ c'est-à-dire la différence de phase instantanée (propriété des signaux en quadrature) des signaux S_a et S_b issus de la même onde plane (sous l'hypothèse $c\tau/2 \gg d$).

Cette différence de phase correspond à une différence de marche $d \cos(\theta + \psi)$, avec ψ , l'angle d'inclinaison de **la ligne formée par les deux antennes** (ou « baseline ») par rapport à la verticale. Cette différence de marche dépend donc de l'angle d'arrivée θ de l'onde plane par rapport à la normale à la baseline et cet angle θ est relié à $\Delta\varphi$ par la relation suivante (d étant la longueur de la baseline).

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta M = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\theta + \psi) \quad (4)$$

Cette relation est fondamentale pour l'interférométrie à émetteur commun. Dans le cas où le fond est illuminé avec deux sources émettrices/réceptrices distinctes, on obtient :

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta M = \frac{4\pi}{\lambda} d \cos(\theta + \psi) \quad (5)$$

Ainsi, la détermination de l'angle θ d'arrivée du front d'onde, pour chaque point de la portée sonar, permet d'accéder à l'élévation de la cellule de résolution concernée. La relation (6) permet de calculer cette élévation moyennant la connaissance de la distance cible – sonar.

$$h = H - R \cos \theta \quad (6)$$

Interférométrie Sondeur multifaisceaux

L'interférométrie permet d'améliorer le positionnement de la sonde car la mesure de la distance sondeur-sol dans l'axe du faisceau est largement améliorée. Le principe de mise en œuvre est relativement simple et repose sur la création avec l'antenne de réception, de deux sous-voies dirigées vers la même direction d'intérêt, et dont les centres de phase sur l'antenne physique sont distants de quelques longueurs d'onde. Cela revient en quelque sorte, à diviser l'antenne en deux parties ou sous-antennes qui vont faire office, comme dans le cas du sonar latéral, d'antennes distinctes, à la différence qu'elles pourront se superposer en partie (c'est-à-dire avoir des capteurs élémentaires en commun).

Il est possible de faire interférer les signaux issus des deux sous-antennes en calculant comme dans le cas du sonar latéral, le produit $S_a S_b^*$. L'instant correspondant à l'axe de visée est donné par le passage par zéro de l'argument du signal interférométrique, ce qui correspond à l'instant où la différence de marche est identique entre les deux capteurs.

Les cellules de résolution correspondent à des tâches spatiales liées à l'échantillonnage temporel du signal, c'est-à-dire en première approximation à l'étalement sur le fond, de la durée d'impulsion. En revanche, la cellule d'insonification correspond à la tâche spatiale liée à l'échantillonnage angulaire du signal émis.

Pratiquement, la recherche de l'instant du passage par zéro est effectuée par une régression linéaire sur la rampe de phase. L'interférométrie est utilisée seulement quand les angles s'éloignent de la verticale, c'est-à-dire quand la cellule de résolution devient optimale (longueur de la durée d'impulsion pour une émission sans filtrage adapté : $c\tau/2$). Aux angles verticaux, on conserve la technique de la détection du maximum d'amplitude dans la voie formée car pour ces

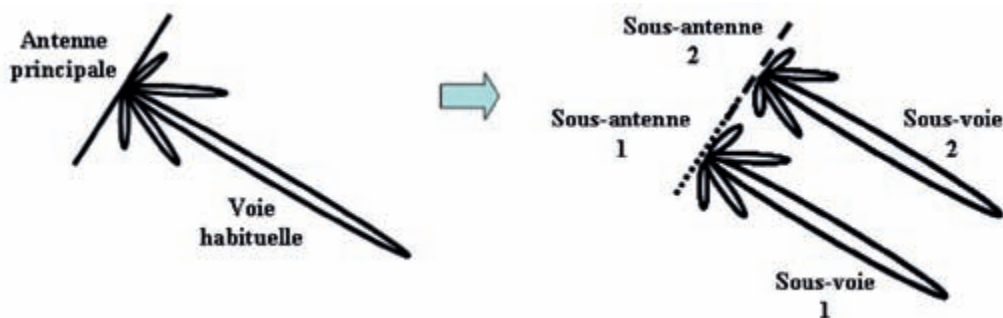


Fig. 5: Principe d'interférométrie pour des sondeurs multifaisceaux

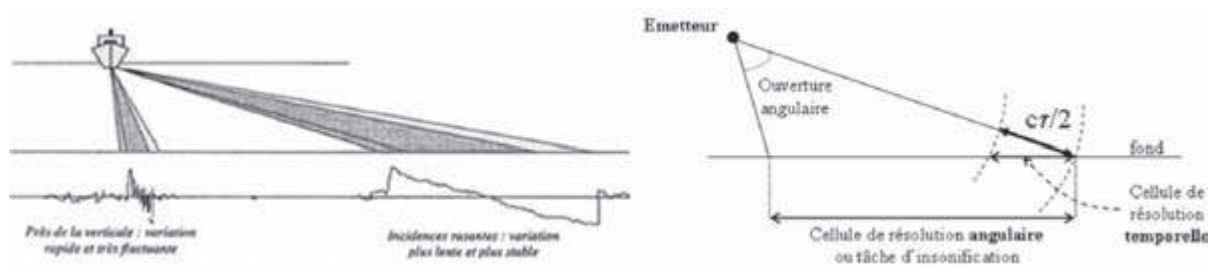


Fig. 6: Détection du point de sonde par interférométrie

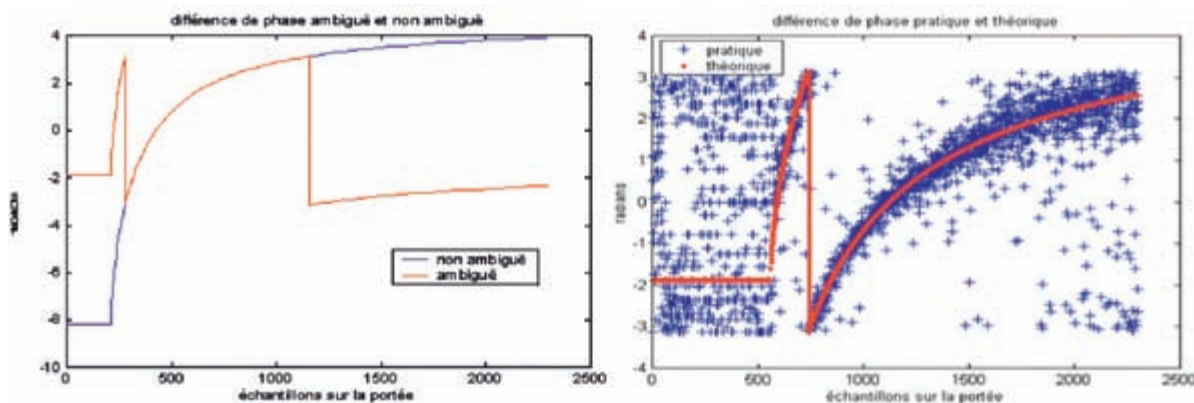


Fig. 7: Effet de restriction de la phase interférométrique à l'intervalle $[-\pi, \pi[$

angles, l'interférométrie ne fonctionne pas. Cela provient d'un phénomène nommé «*glint*» : il s'agit d'un phénomène d'interférence de tous les points brillants, dû à la trop grande étendue de la cellule de résolution. Dans le cadre des sondeurs multifaisceaux, les deux techniques de mesure fournissent des erreurs bathymétriques similaires pour leurs zones d'intérêt angulaires ce qui les rend très complémentaires.

Le principe de la largeur de bande et de temps de cohérence évoqué pour le cas de l'interférométrie optique reste valable pour l'interférométrie sonar. Ainsi, l'interférométrie sonar est une technique adaptée à une émission à bande étroite (c'est-à-dire avec un grand temps de cohérence), afin d'accroître le contraste des franges d'interférences. Si la bande est faible pour une impulsion non modulée, la durée d'émission est grande. Un accroissement de la durée d'émission dégrade la résolution en distance et la qualité de l'image sonar.

À première vue, la notion d'interférométrie est antagoniste avec la notion d'image. En fait, il faut nuancer ce propos : la largeur de bande est une notion fondamentale et il est préférable d'en disposer davantage que pas assez. En effet, la télédétection est basée sur la notion de modulation du signal par le milieu. Si le milieu évolue rapidement, il faudra échantillonner suffisamment rapidement cette évolution pour éviter le repliement de spectre. Cette vitesse d'échantillonnage correspond à la bande du signal utilisé. Ainsi pour une image, la résolution n'est pas donnée par la troncature mais par l'inverse de la bande du signal ; par conséquent, plus le signal a une large bande, plus la résolution spatiale est importante. Ceci ne gêne pas la qualité de l'interférométrie, car elle est basée avant tout, sur un temps de cohérence qui se traduit en optique, par une largeur de bande. Plus on intègre longtemps, plus la qualité du rapport signal sur bruit augmente. La solution repose donc sur une émission longue, favorable au temps de cohérence (c'est-à-dire à l'interférométrie) et avec un encombrement spectral important. Ceci peut être atteint par la technique de la compression d'impulsion ou de filtrage adapté, qui permet d'émettre longtemps tout ayant une occupation importante de la bande.

Difficultés de l'interférométrie

Même si l'interférométrie sous-marine découle d'un principe optique assez simple, il n'en reste pas moins qu'un certain

nombre de phénomènes viennent compliquer son application pratique. Les trois grandes difficultés sont relatives à l'hypothèse d'un milieu non dispersif, au lever d'ambiguïté et au sens physique de $S_a S_b^*$ par rapport à $\langle E_1(t) E_2(t) \rangle_T$.

Retard absolu et interférométrie

L'interférométrie est donc basée sur une mesure de différence de phase $\Delta\varphi$ et cette mesure ou estimation ne permet d'accéder qu'à une valeur de $\Delta\varphi$ comprise dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$. Or en fonction de la taille δ de la baseline, cette excursion de 2π ne suffit pas à décrire la différence de phase géométrique $\Delta\Phi$, lorsque l'angle θ décrit l'intervalle $[0, \pi]$, comme le montre l'équation suivante :

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\theta + \psi) = \Delta\varphi + 2\pi n \quad (7)$$

$\Delta\varphi$ est donc qualifiée de **différence de phase ambiguë**, car pour connaître la différence de marche et l'angle θ , il est nécessaire de remonter **au retard absolu ou à la différence de phase non ambiguë** $\Delta\Phi$. La figure 7 (gauche) souligne ce phénomène pour un fond plat. Les sauts de phase qui apparaissent sur la différence de phase ambiguë (en rouge), correspondent donc à un passage de π à $-\pi$ ou de $-\pi$ à π de cette différence de phase.

Ces sauts de phase représentent la difficulté majeure de l'interférométrie. La variation de la valeur du facteur n qui intervient dans l'équation (7), est de ce fait indispensable pour remonter au retard absolu : cette opération revient à débiaiser $\Delta\varphi$ (*phase unwrapping*) et s'avère d'autant plus difficile que le signal de différence de phase est fortement bruité le long de la portée.

Pour identifier ce facteur n , il faut valider l'hypothèse d'un milieu non dispersif, c'est-à-dire que la vitesse de groupe est égale à la vitesse de phase. La vitesse de groupe représente la vitesse à laquelle se propage l'information et la vitesse de phase représente une notion abstraite liée à la porteuse ; en effet en électromagnétisme, la vitesse de phase dépasse parfois la vitesse de la lumière !

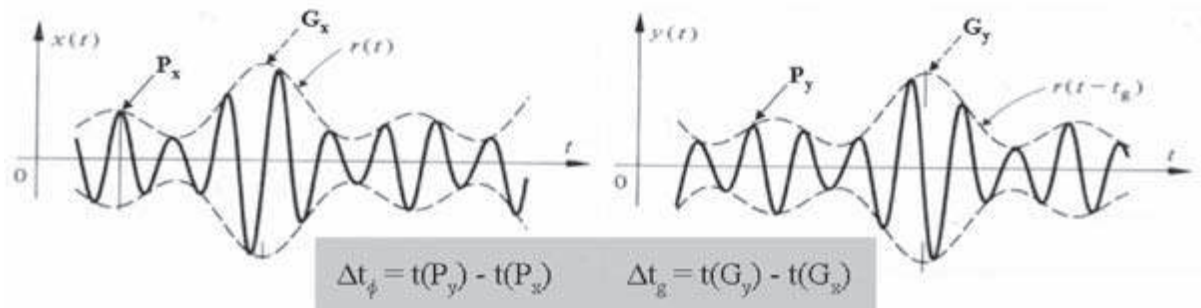


Fig. 8 : Différences entre vitesse de groupe & vitesse de phase

La figure 8 présente deux signaux dont l'un correspond au point d'émission et le deuxième au point de réception. Dans ce cas, les deux temps sont différents même à une période près : l'équation (8) n'est plus vérifiée.

$$t = t_\varphi + mT, m \in \mathbb{Z} \text{ et } v_g = \frac{d\omega}{dk} \text{ et } v_\varphi = \frac{\omega}{k} \quad (8)$$

Avec ω , pulsation et k , vecteur d'onde.

Physiquement, le facteur m représente une notion de retard en relation avec la vitesse de groupe v_g : il s'agit d'une mesure de différence de temps de propagation, entre deux capteurs, d'une onde modulée par le relief. En revanche, l'interférométrie utilise la phase du signal, phase qui est directement en relation avec la vitesse de phase v_φ . Si on ne peut pas utiliser la relation (8), c'est-à-dire si les deux vitesses diffèrent, il n'est plus possible de retrouver le retard non ambigu. En fait, ces vitesses diffèrent dès que l'indice du milieu dépend de la fréquence. Dans le milieu marin, en première approximation, ce n'est pas le cas, cet indice est essentiellement sensible à la pression, la température et la salinité. On note nT , le retard grossier et t_φ , le retard interférométrique ou retard fin.

Méthodes de lever d'ambiguïté [3]

Fondamentalement, les origines du facteur n et de la différence de phase $\Delta\varphi$ sont radicalement différentes et les méthodes d'estimation de ces deux quantités le sont aussi. Ainsi plusieurs méthodes existent pour remonter au facteur n : la méthode du Vernier, les méthodes haute résolution (comme Music), l'intercorrélation des signaux ou encore, la formation de voie et d'autres...

Interférogramme

À la différence de l'optique, l'effet interférométrique en sonar, provient d'un calcul et non d'un phénomène d'interférence. Cela présente à première vue des avantages car beaucoup de traitements sont envisageables, en particulier tirer profit de la flexibilité du calcul pour améliorer les qualités de l'interférogramme. Le terme $S_a S_b^*$ est un terme souvent très bruité (bruit de phase) et il est nécessaire d'avoir recours à une approche *multilook* pour améliorer la qualité de l'estimation de l'argument de ce dernier, c'est-à-dire utiliser plusieurs mesures, plusieurs échantillons et un estimateur du type maximum de vraisemblance ; celui-ci est donné par l'équation 0.

$$\bar{\Delta\varphi} = \arg \sum_N S_a(n) S_b^*(n) = \arg \sum_N S_a(0-n) S_b^*(n) \quad (9)$$

On voit sur cette équation que la quantité dont on extrait l'argument en « *multilook* » n'est autre que l'intercorrélation de deux signaux pour l'instant nul, et avec une fenêtre de troncature de N points ; pour le cas du « *monolook* », cette intercorrélation est réduite à un seul point. Concrètement, la qualité de l'estimation augmente avec la longueur de la fenêtre du *multilook*, or si les signaux utilisés sont à bande large et qu'une compression d'impulsion est appliquée, la résolution au sol est supérieure à celle d'un signal à bande étroite ; cela signifie que pour une résolution au sol identique, l'estimation de la phase interférométrique pour un signal bande étroite (*single-look*) est bien moins bonne que celle d'un signal bande large (*multilook*).

Notion de bruit [4] [5]

Le bruit interférométrique est l'élément dimensionnant pour l'exploitation de la phase interférométrique et le lever d'ambiguïté. Il existe deux types de bruit : le bruit extrinsèque lié à des erreurs de mesures, et le bruit intrinsèque lié aux phénomènes de décorrélation du signal. Ce dernier provient de plusieurs phénomènes : la décorrélation angulaire, la décorrélation spatiale, les trajets multiples et la présence de bruit ambiant. Ceux-ci dégradent le coefficient de corrélation.

Cette notion de coefficient de corrélation est fondamentale car la statistique de la phase interférométrique pour des signaux capteurs gaussiens (phase et quadrature) est définie par deux paramètres : la valeur moyenne $\langle \Delta\varphi \rangle$ de la phase interférométrique et le coefficient de corrélation μ , qui est bijectivement lié à la variance de la phase interférométrique, comme indiqué par l'équation (10).

$$p(\Delta\varphi) = \frac{(1-\mu^2)}{2\pi} \left(\frac{1}{1-Y^2} + \frac{Y}{(1-Y^2)^{3/2}} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin Y \right) \right) \quad (10)$$

avec $Y = \mu \cos(\Delta\varphi - \langle \Delta\varphi \rangle)$ et μ , le coefficient de corrélation.

Plus le coefficient de corrélation μ est proche de 1, plus la qualité du signal est importante.

La décorrélation angulaire [6] est un phénomène qui détruit cette qualité. Comme les deux capteurs de l'interféromètre sont distants, ils ne voient pas la cellule de résolution temporelle sous le même angle. Cette cellule se comporte comme un émetteur étendu avec une fonction de directivité très compliquée qui est liée à la répartition aléatoire des points brillants à l'intérieur de celle-ci. Cette cellule n'est pas vue par les deux capteurs sous le même angle et le signal perçu diffère, entraînant une dégradation de la corrélation. Ce phénomène pour les sonars, est peu pénalisant car la taille des baselines reste faible et ne provoque donc pas de grandes fluctuations. En revanche, pour les radars spatiaux qui ont de grandes baselines, c'est un phénomène primordial.

Le deuxième phénomène pénalisant est la décorrélation spatiale [7]. Celle-ci est directement liée à la durée d'interférence du signal. Le calcul direct de $S_a S_b$ correspond à une intercorrélation sur la durée d'un échantillon temporel. La durée effective se trouve réduite par la différence de marche entre les deux signaux : dans l'axe de l'interféromètre, les signaux sont en phase et la durée d'intercorrélation effective est maximale, pour d'autres angles de visée, cette durée est nécessairement inférieure. Ce phénomène est essentiel pour les sonars latéraux qui possèdent une grande ouverture et autorisent des dépointages importants par rapport à l'axe de l'interféromètre. Pour les sondeurs multifaisceaux, ce

phénomène est moins pénalisant car la formation de voie limite l'excursion angulaire du signal et permet de dépointer l'axe de l'interféromètre vers la direction d'intérêt. Ce défaut peut être compensé par une intercorrélation à retard variable différent de celui imposé par l'échantillonnage des signaux. L'interférométrie peut être directement dégradée par le phénomène de trajets multiples. Il s'agit de la superposition au front d'onde provenant de la direction d'intérêt, d'un autre front d'onde issue d'une autre direction comme par exemple, d'une réflexion sur la surface. L'analyse de la véritable direction d'intérêt est biaisée par le principe de superposition. Ce phénomène est particulièrement visible quand le rapport de puissance entre le front d'onde utile et celui parasite est proche de 1. Ceci se produit quand le niveau du signal utile est faible. C'est pourquoi dans le traitement des données, il est important de ne pas traiter les données quand leur niveau de réverbération est trop faible.

Les trois phénomènes précédents dégradent la corrélation du signal par rapport au niveau du bruit ambiant. La puissance du bruit ambiant est souvent constante sur la fauchée sonar pour peu que son origine soit thermique ou liée au porteur (hautes

$$\mu = \frac{\xi_{corr}}{\xi_{corr} + \xi_{non\ corr} + E(bruit?)} \quad (11)$$

avec ξ_{corr} , la puissance de la partie corrélée du signal

$\xi_{non\ corr}$, la puissance de la partie non corrélée du signal

et $E(bruit?)$, la puissance du bruit ambiant

Exemple de bathymétries interférométriques

Après avoir pris en compte les principes et les limitations de l'interférométrie appliquée aux sonars cartographiques, il est possible de traiter des données acquises sur une zone de fond marin (par exemple, où repose l'épave du pétrolier Erika) et de

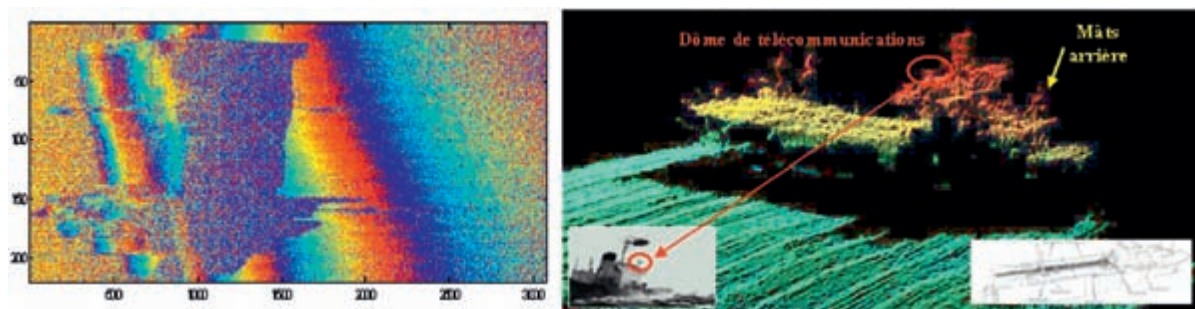


Fig. 9 : Interférogramme & bathymétrie associée (sonar latéral)

reconstruire la géométrie de cette zone observée. La figure 9 propose un tel exemple de reconstruction bathymétrique, à partir d'un interférogramme issu d'un sonar latéral.

Il est possible d'effectuer le même type de traitement à partir d'un sonar multifaisceaux. Traditionnellement, la résolution de la bathymétrie issue d'un sondeur multifaisceaux n'est pas temporelle (on ne récupère pas une sonde par échantillon temporel) mais est liée au nombre de voies formées. Néanmoins, il est aussi possible de travailler avec l'ensemble des échantillons présents dans le signal. Dans ce cas, on retrouve le même type de bathymétrie que pour le sonar latéral, comme le montre la figure 10. L'interférogramme présenté sur cette figure est un peu moins intuitif que dans le cas du sonar latéral : il s'agit de l'interférogramme calculé pour une ligne sonar seulement et non pour l'ensemble des pings consécutifs (formant une image). En effet, le signal reçu dans le cas d'un sondeur multifaisceaux n'est pas seulement paramétré par le temps (en ordonnée), mais aussi par la direction de visée liée à la formation de voie (en abscisse) : c'est donc un signal bidimensionnel.

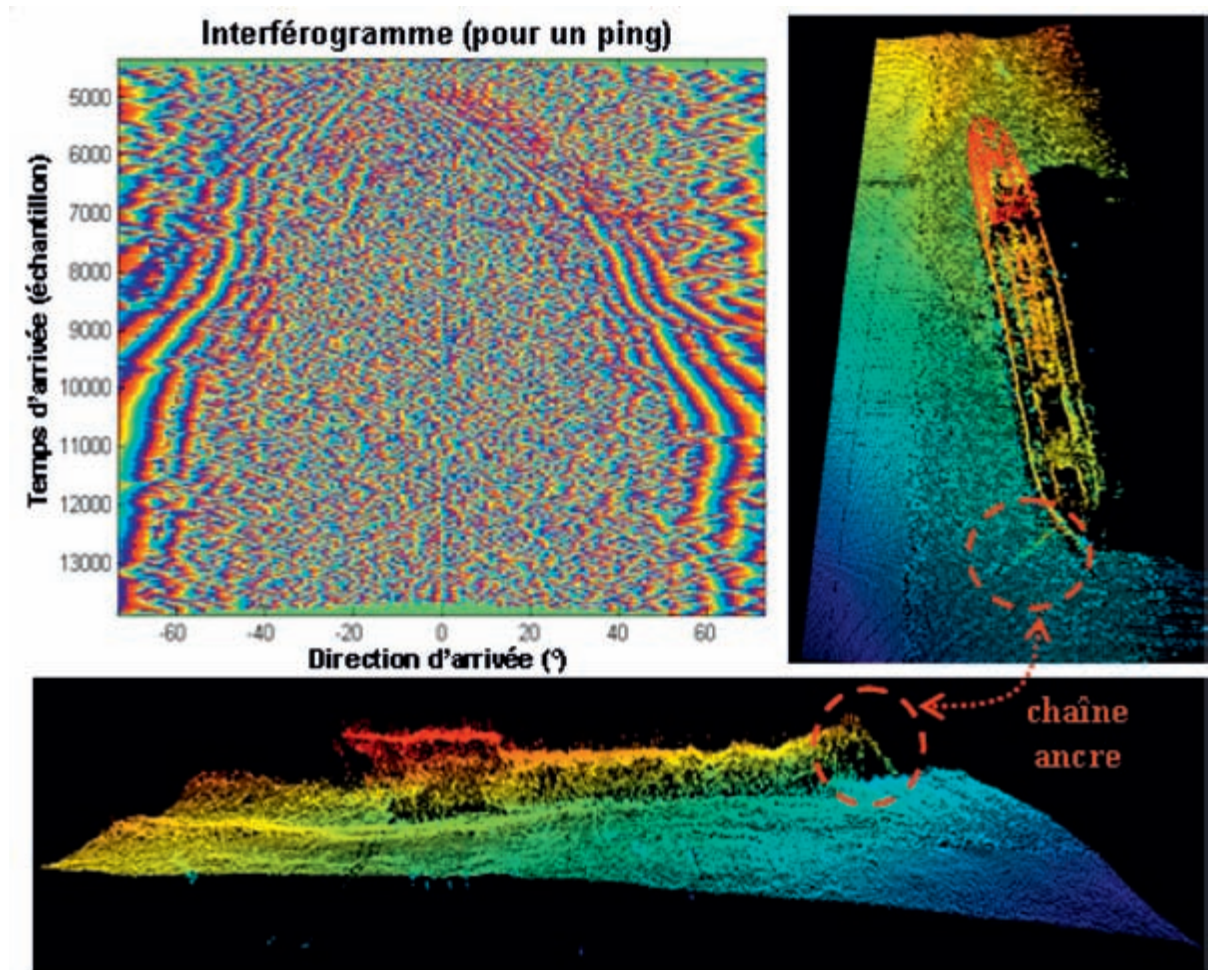


Fig. 10: Interférogramme multifaisceaux & image bathymétrique

Les deux résultats présentés (figures 9 & 10) proviennent de données acquises par un sonar latéral Klein 5400B (sonar latéral interférométrique avec une résolution d'imagerie de 20 cm par 3 cm et une porteuse à 455 kHz) et par un sondeur multifaisceaux Kongsberg EM3002 qui peut former des voies de 1,5° par 1,5°, avec une porteuse à 300 kHz. En définitive, l'interférométrie permet aux sonars et sondeurs d'être des outils d'investigation très précis et de rendre compte de la réalité du fond marin.

Conclusion

L'interférométrie est une technique au principe relativement simple et qui peut se transposer assez directement du domaine radar au domaine sonar. Néanmoins, étant prévue au départ pour mesurer de faibles variations de mouvement, elle est utilisée dans le cadre du sonar pour estimer des retards entre capteurs afin de déterminer la direction d'arrivée d'un front d'onde.

Dans le cadre du sonar latéral, elle permet d'offrir utilement une vision tridimensionnelle d'une scène en complément de l'imagerie sonar pure. Dans le cadre d'applications liées aux sondeurs multifaisceaux, elle permet d'abord de rendre exploitable les données acquises avec des angles rasants et même d'atteindre des résolutions proches de celles issues

d'un signal temporel. Cette technique est d'ailleurs devenue aujourd'hui indissociable de tout sonar cartographique, tout comme les applications classiques d'imagerie pour les sonars latéraux, ou la formation de voie pour les sondeurs multifaisceaux.

Références bibliographiques

- [1] J.W. Goodman, « Laser Speckle and Related Phenomena », in Statistical Properties of Laser Speckle Patterns, J.-C. Dainty, Ed. New York: Springer, 1985.
- [2] M. Masnadi, « Differential Phase Estimation with the SeaMarcII Bathymetric SideScan Sonar System », IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.17, n° 3, July 1992.
- [3] Philip N. Denbigh, « Swath Bathymetry: Principles of Operation and an Analysis of Errors », IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 14, n° 4, October 1989.
- [4] D Middleton, « An Introduction to Statistical Communication Theory », IEEE Press
- [5] D.C. Cooper and B.A. Wyndham, « Comparison of Monopulse Techniques for Direction Finding in the Presence », IEE, Savoy Place, London, Eng. IEE Conf. Publ. 105, pp.154-159, 1973.
- [6] G. Jin and D. Tang, « Uncertainties of Differential Phase Estimation Associated with Interferometric Sonars », IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 21, n° 1, January 1996.
- [7] Xavier Lurton, « Swath Bathymetry Using phase Difference: Theoretical Analysis of Acoustical Measurement Precision », IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.25, n° 3, July 2000.