



LES MÉTHODES ACOUSTIQUES D'EXPLORATION DE L'ESPACE SOUS-MARIN

par
Pierre SABATHÉ *

I. INTRODUCTION.

En détectant un but, nous affirmons sa présence dans une région ou un domaine de l'espace : nous le localisons, au moins grossièrement. Nous recevons de ce domaine un mélange de signal et de bruit et nous décidons de la présence du signal, donc de celle du but, lorsque, par exemple, le niveau sonore reçu dépasse une certaine valeur de référence. Cette référence est basée, soit, sur les informations antérieures (par exemple, le signal apparaît comme un accroissement du niveau moyen), soit, en observant simultanément plusieurs autres régions ; nous prenons comme référence la valeur moyenne sur l'ensemble de ces régions, ou plus souvent sur celles qui entourent le domaine considéré.

Le critère de détection est lié à la méthode utilisée pour l'exploration de l'espace.

Nous allons examiner celles qui sont le plus employées en sonar et voir quelles contraintes limitent les dimensions du volume de localisation.

Mais existe-t-il des dimensions optimales pour le volume de localisation ? Pour rendre maximal le rapport signal/bruit, il faut que le but soit tout entier dans le domaine observé (signal maximal) et que celui-ci soit le plus petit possible (bruit minimal). Ainsi, pour la détection ses dimensions optimales sont celles du but. Nous allons voir qu'en pratique, ce domaine est beaucoup plus grand : surtout en écoute passive où la distance du but est pratiquement inconnue, mais aussi en sonar actif où la dimension des antennes nécessaires, le coût des équipements donnent une limite inférieure à la précision angulaire.

II. LES APPAREILS PASSIFS.

Dans les appareils passifs, le signal reçu est le bruit rayonné par le but et, sur une plateforme d'écoute silencieuse, le bruit parasite le plus important est celui de la mer.

II.1. Hydrophones omnidirectionnels.

II.1.1. Un seul hydrophone.

L'appareil d'écoute le plus simple utilise un hydrophone non directif.

Le signal apparaît, dans le temps, comme une

augmentation du niveau sonore moyen. La perception est améliorée en divisant la bande d'écoute par filtrage aussi finement que possible ; le signal apparaît alors par son spectre différent de celui du bruit de fond.

L'apparition d'une seule raie spectrale suffit à signaler la présence d'un bruiteur, mais il en faut plusieurs pour reconnaître ce bruiteur et le classer dans une catégorie de buts recherchés. Ainsi, dans l'exploitation des appareils sonars, distingue-t-on les deux étapes : détection et classification. Nous nous limiterons ici aux seuls problèmes posés par la détection.

II.1.2. Plusieurs hydrophones.

Si nous écoutons sur un seul hydrophone, les dimensions du volume surveillé dépendant du niveau de bruit rayonné par le but sont très mal définies. Pour mieux localiser le but B (Fig. II.1.2), on écoute sur trois hydrophones H_1 , H_2 , H_3 . Ce

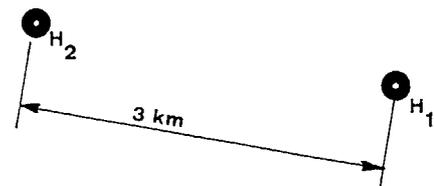
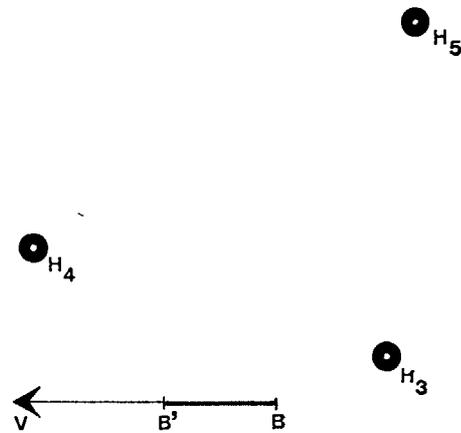


FIG. II.1.2. — Écoute sur plusieurs hydrophones.

(*) Directeur de l'Électronique appliquée, 98, rue Maurice-Arnoux — 92-Montrouge.

seront, par exemple, trois bouées sonores placées aux sommets d'un triangle équilatéral de trois kilomètres de côté. Le but est plus près de H_3 et le niveau sonore sur cet hydrophone est plus élevé que sur H_1 et H_2 . Pour suivre le but qui se déplace de B en B', à la vitesse V , l'avion place deux nouvelles bouées en H_4 et H_5 . Il conserve ainsi le contact avec le but, mais il ne le localise que grossièrement.

II.1.3. Corrélation des signaux reçus sur deux hydrophones.

Les bruits de fond reçus par deux hydrophones H_1 et H_2 assez éloignés (Fig. II.1.3) sont indépendants tandis que les bruits provenant du but dans la direc-

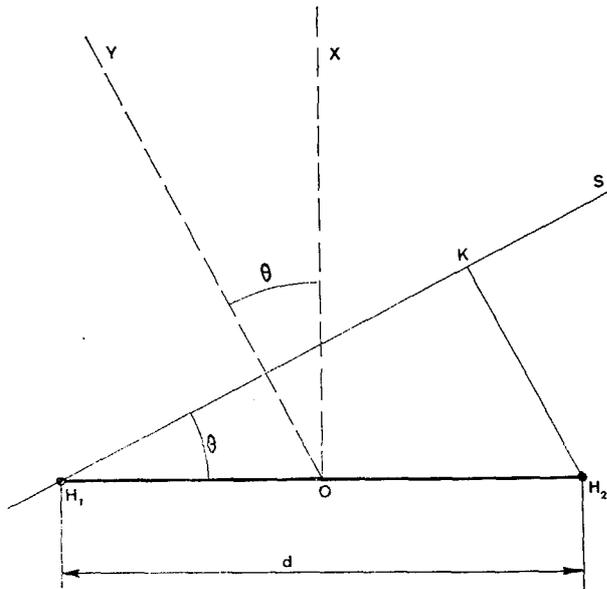


FIG. II.1.3. — Corrélation des signaux reçus sur deux hydrophones $C\tau = KH_2 = d \sin \theta$.

tion OY sont corrélés. Ainsi, la non-nullité pour un retard τ de la fonction d'intercorrélation des signaux reçus sur H_1 et H_2 permet d'affirmer la présence d'un bruiteur. De plus, on déduit de la valeur du retard τ la direction OY du but ; OY fait, avec la médiatrice OX de $H_1 H_2$, l'angle θ tel que : $C\theta = d \sin \theta$, (C étant la célérité du son).

II.2. Hydrophones directifs.

II.2.1. Hydrophone tournant ou lobe tournant.

Pour réaliser un hydrophone directif, on utilise un groupement de transducteurs de petites dimensions, donc non directifs, Ces transducteurs sont reliés électriquement, avec les retards convenables, dans les compensateurs pour former un lobe de directivité (comme celui de la figure II.2.1) caractérisé par son ouverture à 3 dB : $2 \theta_3$. L'axe acoustique X du lobe, est orienté dans l'azimut A, soit en faisant tourner le plan de l'hydrophone, soit en variant les retards des transducteurs élémentaires dans le compensateur.

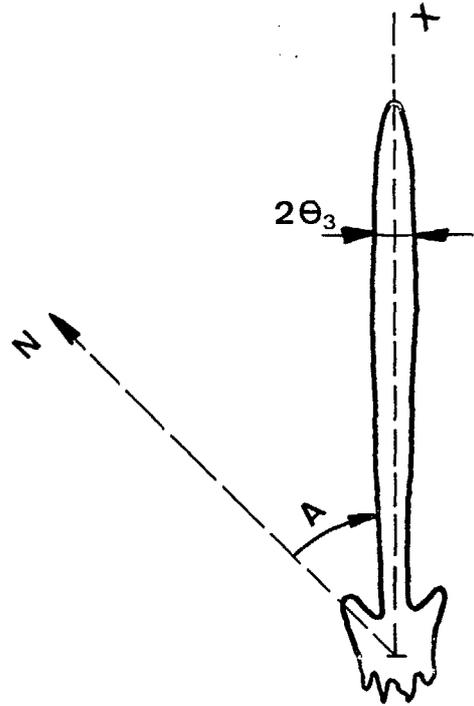


FIG. II.2.1. — Hydrophone tournant ou lobe-tournant.

Au moment de la détection, le but apparaît par une augmentation du bruit dans une direction. En dépointant l'hydrophone, le signal disparaît, et il est ainsi possible de comparer le bruit seul à l'ensemble signal + bruit.

II.2.2. Corrélation des signaux reçus par deux hydrophones directifs d'axes acoustiques parallèles.

Au paragraphe II.1.3, nous avons rappelé que la corrélation des signaux reçus par deux hydrophones non directifs permet de déterminer la direction du but. Si ces hydrophones sont directifs, un bruit fort dans une direction gênera moins la perception du but placé dans une autre direction. Généralement, on enregistre (Fig. II.2.2) la tension de sortie du corrélateur en fonction de l'azimut de l'axe des hydrophones et ainsi, à chaque tour d'horizon, les

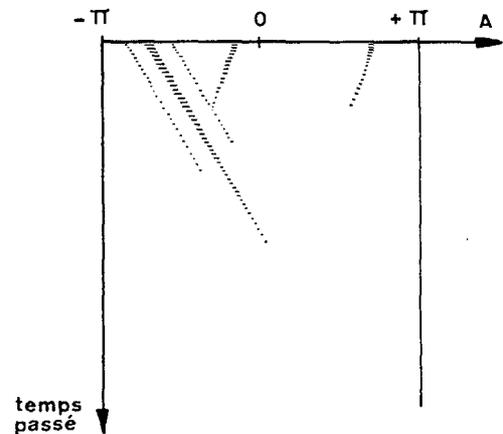


FIG. II.2.2. — Représentation sur un enregistreur des signaux à la sortie d'un corrélateur en fonction de l'azimut de l'axe des hydrophones.



bruiteurs marquent leur direction ; s'ils sont forts, la trace est triple car les maximums secondaires de la fonction d'intercorrélation apparaissent.

Rappelons qu'en l'absence de bruiteur, la corrélation délivre une tension nulle, aussi est-il facile de détecter rapidement la présence d'un bruiteur.

II.3. Estimation de la distance.

Dans les systèmes passifs que nous venons d'évoquer, le but est défini par sa direction et, si deux buts B_1 et B_2 sont dans une même direction, il n'est pas possible de les distinguer.

On obtient une estimation de la distance en mesurant la parallaxe entre deux systèmes directifs. Sur la figure II.3, les hydrophones H_1 et H_2 déter-

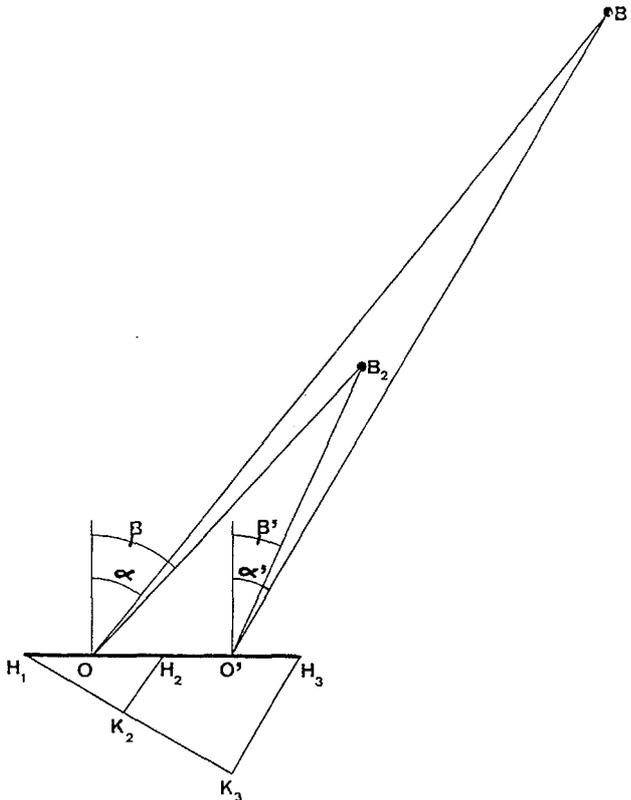


FIG. II.3. — Estimation de la distance avec trois hydrophones.

minent les directions α et β de B_1 et B_2 et les hydrophones H_3 et H_2 , les directions α' et β' . Si la mesure de la distance de B_1 peut se faire en présence de B_2 , on peut alors détecter B_1 derrière B_2 .

III. LES APPAREILS ACTIFS.

La détermination précise de la distance est toutefois du domaine des sonars actifs.

Après une brève période d'émission, on reçoit les échos mêlés au bruit propre et à la réverbération. L'écho E apparaît (Fig. III) comme un accident de la courbe donnant le niveau sonore en fonction du temps. Si le récepteur n'a pas de contrôle automatique de gain, nous détectons l'accident « écho » par l'expérience des balayages précédents. Le contrôle automatique de gain, dont les constantes

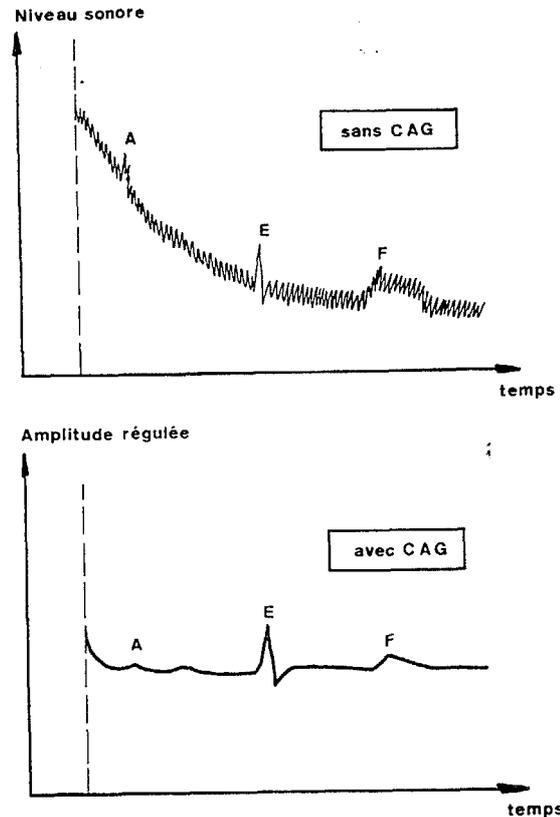


FIG. III. — Appareils actifs : apparition de l'écho E à la sortie d'un récepteur sans CAG et d'un récepteur avec CAG.

de temps sont proportionnelles à la durée de l'émission, donc sensiblement à celle de l'écho, maintient le niveau à peu près fixe en l'absence d'écho, et facilite la perception de l'écho. Il permet la détection automatique en déclarant « écho » tout dépassement d'un certain seuil.

III.1. Transducteurs fixes.

Si le milieu est très réverbérant et le but immobile, son écho apparaît au milieu d'une multitude d'autres, et l'objet n'est distinguable que par sa forme. Ainsi, on détecte un sous-marin posé sur le fond, grâce à un sondeur (Fig. III.1.a) ; mais la largeur explorée l est faible puisque les échos doivent parvenir au récepteur avant l'écho de fond. Pour augmenter l , on utilise les sonars à balayage latéral (side looking sonar).

Un poisson S (Fig. III.1.b), remorqué à la vitesse V , est équipé de transducteurs d'émission et de réception sur chaque bord. Il émet des impulsions brèves aux points E_1, E_2 , etc. Du point E_1 , sur son bord gauche, il « insonifie » sur le fond la zone limitée par l'ellipse (E_1). La ligne but B envoie un écho du point B_1 qui sera reçu en R_1 . Les points E_2, B_2 et R_2 correspondent à l'émission suivante :

Si t est la durée entre les deux émissions consécutives :

$$E_1E_2 = R_1R_2 = d = Vt.$$

Si l'hydrophone de réception est assez directif, $B_1B_2 = d$.

Ainsi, on « échantillonne » la ligne but B par des

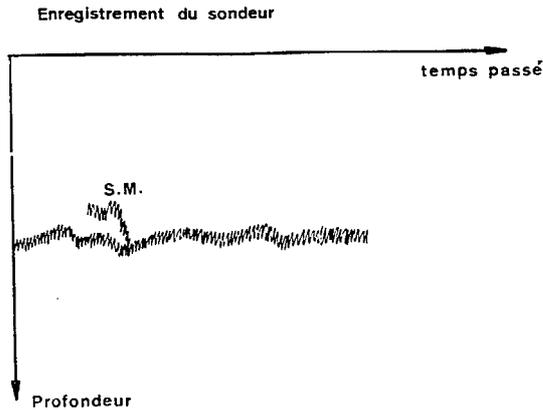
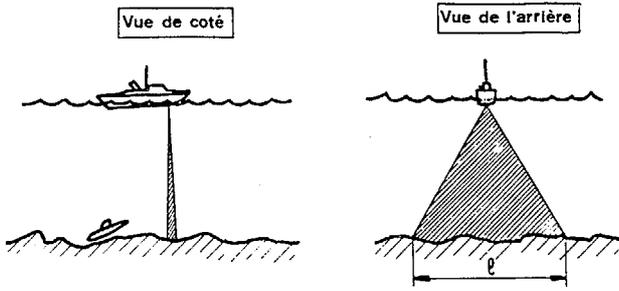


Fig. III.1a. — Détection d'un sous-marin posé sur le fond avec un sondeur.

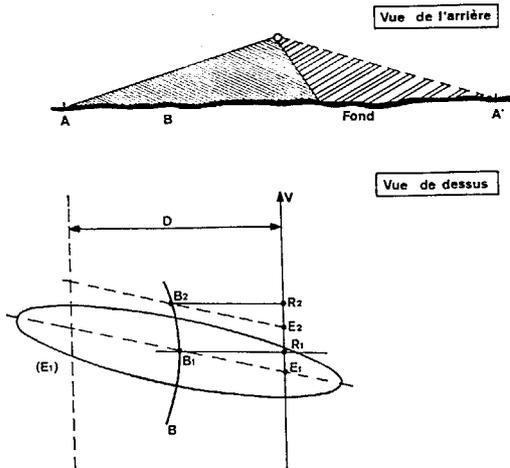


Fig. III.1b. — Sonar à balayage latéral (side-looking sonar).

points échos distants de d . Si les dimensions du but sont grandes devant d , il a une forme. De plus, il masque la réverbération du fond derrière lui, il a une « ombre ».

La longueur d est proportionnelle à la distance maximale, ou profondeur de sondage, D :

$$(1) \quad D = \frac{C}{2} t, \text{ d'où } \frac{d}{2V} = \frac{D}{C}$$

Par exemple si $D = 500$ m et $d = 1$ m,

$$V = \frac{C}{1000} = 1,5 \text{ m/s,}$$

soit 3 nœuds.

d/D fixe aussi l'ouverture $2\theta_3$ du lobe de directivité à la réception, dans notre exemple, $2\theta_3 = 6'$. Pour réaliser cette directivité à la fréquence de 75 kHz, optimale pour une portée de 500 m, nous devons avoir un groupement d'hydrophones de 10 m de long.

La surface explorée, par unité de temps est DV , or, d'après la formule (1) : $DV = Cd/2$. Elle est proportionnelle à la définition en distance et restera donc faible. Pour explorer une plus grande surface, il faut utiliser un transducteur orientable.

III.2. Transducteur orientable.

Si le milieu n'est pas réverbérant, ou si les obstacles réverbérants ont des dimensions très différentes de celles du but, on peut, comme en détection passive, considérer que ce dernier est ponctuel. En particulier, la détection des sous-marins par les sonars à grande portée se trouve dans ce cas.

III.2.1. Dans le plan horizontal.

La directivité à la réception ou la corrélation permettent de déterminer la direction du but en utilisant les mêmes méthodes qu'en passif (cf. § II.2.1 et II.2.2).

III.2.2. Dans le plan vertical.

Il n'en est pas de même à cause de la bathythermie. Sur la figure III.2.2a, nous avons représenté

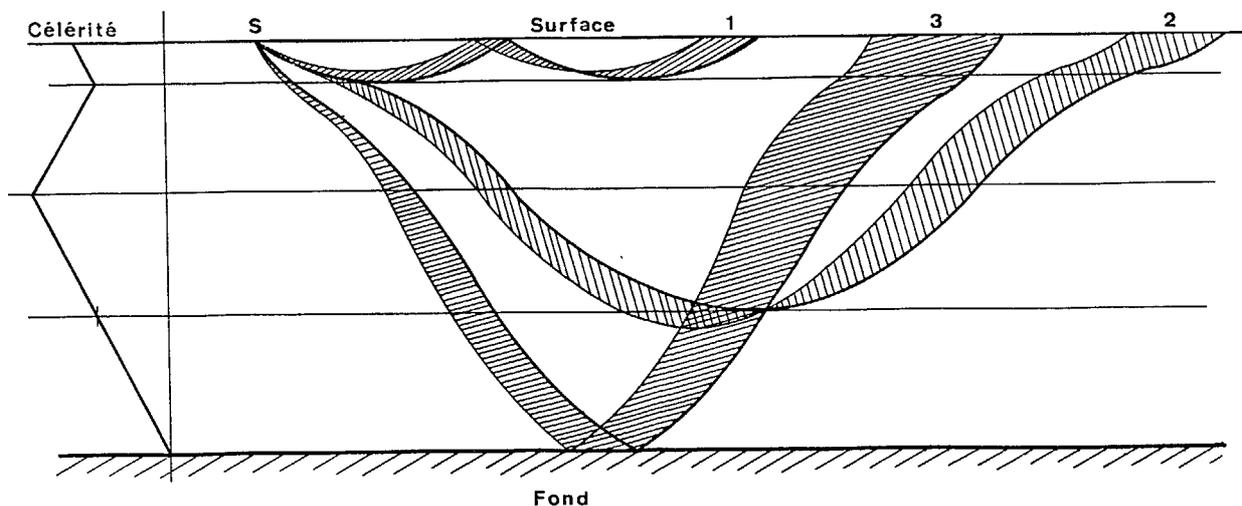


Fig. III.2.2a. — Rayons sonores dans un plan vertical.



un profil de célérité courant : deux couches isothermes, l'une en surface, l'autre profonde, sont séparées par une couche à gradient constant ; nous traçons trois faisceaux à des sites voisins, le premier se propage au voisinage de la surface, le second, après un long trajet dans les couches profondes, à sa résurgence à grande distance, enfin, le troisième, réfléchi sur le fond, revient à la surface à mi-distance. Nous voyons que la relation entre l'angle de site du faisceau et l'immersion du but, n'est ni simple, ni biunivoque.

Aussi utilise-t-on surtout la directivité dans le plan vertical pour éliminer les directions bruyantes.

Par exemple, pour détecter un sous-marin proche, le sonar du bâtiment de la figure III.2.2 b a un lobe de directivité incliné vers le bas (zone hachurée) avec un minimum dans le plan horizontal. Il évite ainsi la réverbération de surface.

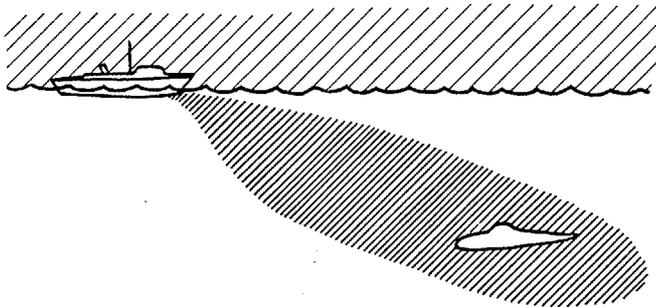


FIG. III.2.2b. — Élimination du diffus de surface.

Sur la figure III.2.2 c est représenté le cas d'un sonar S qui veille la zone B_1C_2 (hachures serrées) par réflexion sur le fond en R_1R_2 . Les trajets sonores SR_1B_1 et SB_1 d'une part, SR_2C_2 et SC_2 sont respectivement égaux. La réverbération en provenance du fond dans la zone $B'_1C'_2$ arrive en même temps que les échos de la zone B_1C_2 et, de plus, n'est pas atténuée par la double réflexion sur le fond. La directivité verticale du transducteur doit absolument éliminer le faisceau $SB'_1C'_2$.

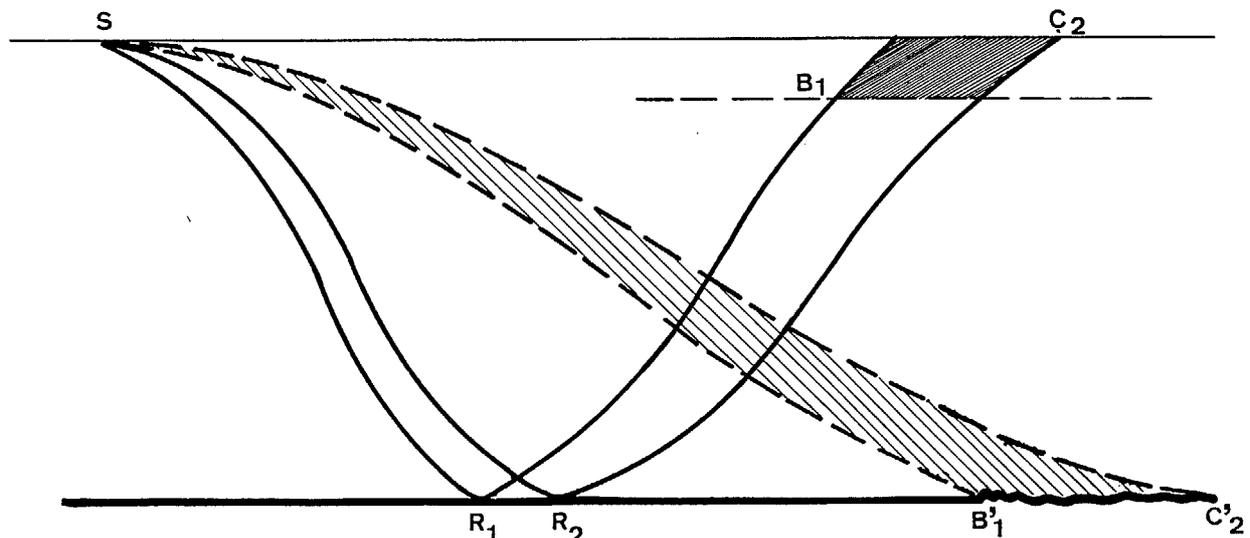


FIG. III.2.2c. — Réflexion sur le fond.

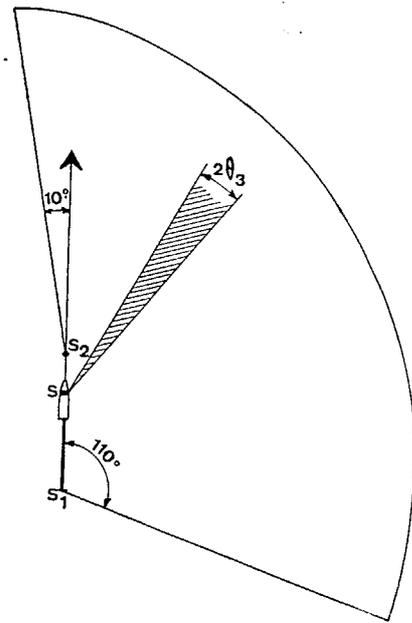


FIG. III.2.3. — Sonar directif. $2\theta_3 = 10^\circ$, longueur du bond : 5°, secteur : 120° , portée : 3000 m ; entre deux sondages dans une même direction : temps écoulé : 100 s, distance parcourue par le navire à 20 nœuds : 1000 m.

III.2.3. Sonar directif.

Pour surveiller un secteur de 120° , le sonar directif de la figure III.2.3 met 100 s, et, pendant cette période, le navire à 20 nœuds, parcourt 1000 m, c'est-à-dire le tiers de la portée. Il couvre, à chaque sondage, un secteur de 10° et, après chaque période de réception il déplace l'axe acoustique d'un bond de 5° . Avec ce mode de veille, les chances d'intercepter un sous-marin rapide restent faibles, aussi préfère-t-on utiliser les sonars panoramiques.

III.3. Sonars panoramiques.

Les premiers appareils panoramiques avaient un lobe orienté par des déphasages électriques et faisant deux tours pendant la durée d'une émission.



Sur l'indicateur PPI, le but est représenté par une banane dont la longueur dépend de la largeur du lobe. L'écho est détecté par sa brillance, c'est-à-dire par la différence de niveau sonore vis-à-vis des directions et des distances voisines. Après cette première détection, l'audio et, en particulier, le Döppler servent la classification.

Le sonar à voies préformées, à lobes fixes (Fig. III.3), généralement utilisé aujourd'hui, per-

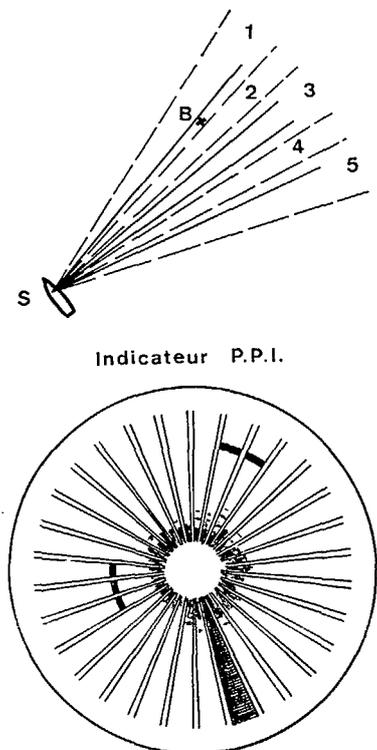


FIG. III.3.3. — Sonar à voies préformées. Exemple : 30 voies, $2\theta_3 = 16^\circ$, $\tau = 160$ ms, Σ à 10 km = 2800×120 m².

met la réception continue dans toutes les directions pendant la période de sondage. Le chevauchement des lobes fait qu'un but peut apparaître dans deux ou trois secteurs sur l'indicateur PPI où la discrimination en azimuth est faible et sensiblement égale à la largeur du lobe de directivité réception : par exemple, 16° pour un sonar à 30 voies. Ainsi pour une durée d'émission de 160 ms, la zone dans laquelle est localisé le sous-marin, distant de 10 km au moment de sa détection, couvre un tiers de kilomètre carré, soit 500 fois environ la surface du sous-marin en projection horizontale. Si l'on remarque, de plus, que le sous-marin a une hauteur moyenne inférieure à 10 m et qu'il peut atteindre des immersions supérieures à 500 m, on en déduit que le volume dans lequel on le localise, au moment de la détection, est égal à 25 millions de fois son volume propre.

III.4. Les systèmes bistatiques.

Pour être plus complets, nous devons citer les systèmes de détection dits bistatiques dans lesquels le lieu d'émission est distant du lieu de réception.

III.4.1. Bouée active et bouée passive.

Une bouée active H_a qui émet et reçoit, mesure sa distance au but B (Fig. III.4.1). La bouée passive H_p mesure la distance à H_a , à partir du temps écoulé entre l'instant d'émission t_0 et l'instant t_2 d'arrivée de l'émission sur H_p qui reçoit en t_3 l'écho de B . On en déduit la distance BH_p . Ainsi, la position de B est donnée par l'intersection de deux cercles avec une ambiguïté.

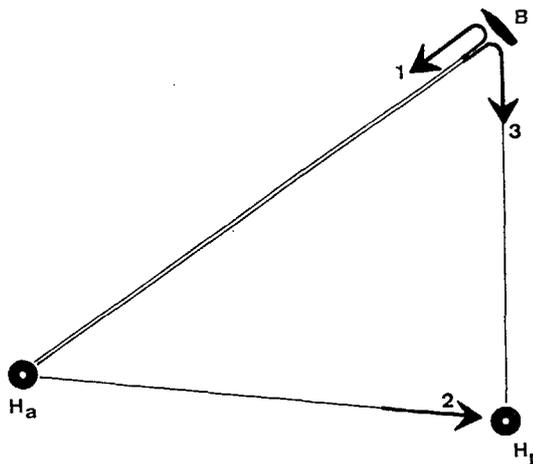


FIG. III.4.1. — Mesure de distance avec une bouée active et une passive : $\overline{H_a B} = \frac{C}{2} (t_1 - t_0)$; $\overline{H_a H_p} = C(t_2 - t_0)$; $\overline{H_a B} + \overline{B H_p} = C(t_3 - t_0)$.

III.4.2. Bouée satellite.

La bouée satellite, placée au-delà de la limite de portée d'un sonar, accroît la portée de celui-ci dans une certaine zone. Sur la figure III.4.2, on a indiqué, par un cercle de centre S , la limite de portée du sonar et, par une ellipse de foyers S et H , la limite de portée du système : sonar + bouée satellite. Le but B est ainsi localisé dans la zone hachurée.

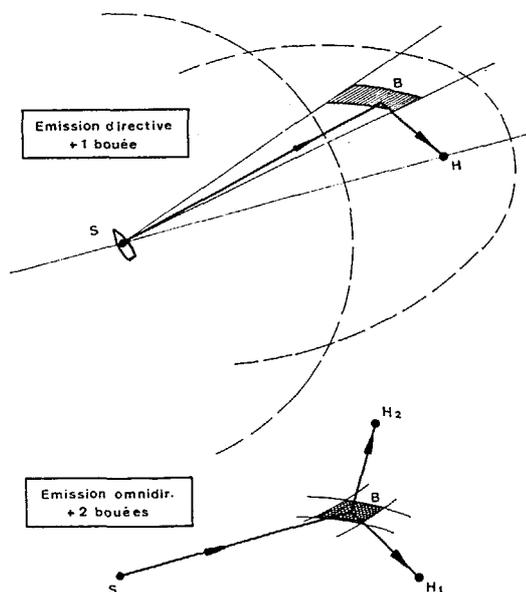


FIG. III.4.2. — Bouée satellite.



Si l'émission de S est directive, une seule bouée satellite suffit à bien localiser B ; au contraire, si l'émission est omnidirectionnelle, il faut placer deux bouées.

La distance de S à H_1 et H_2 est donnée avec une bonne précision par la réception sur H_1 et H_2 de l'émission de S, par contre, la distance H_1H_2 est mal connue et la zone dans laquelle B est localisée est aussi grande qu'avec un sonar panoramique.

III.5. La modulation de fréquence.

III.5.1. Émission continue.

Le sonar à modulation de fréquence est utilisé en modulation de fréquence pour les appareils à faible portée. La figure III.5.1 donne l'exemple d'un sonar pour aveugle, de portée maximale 20 m, sur lequel l'information distance n'est pas donnée par une durée Δt , mais par une fréquence audio Δf .

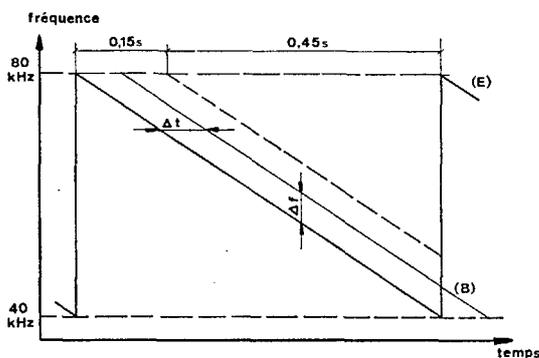


FIG. III.5.1. — Émission continue modulée en fréquence.

Exemple : Sonar pour aveugle
Fréquence ultra sonore : de 80 à 40 kHz (en 0,60 s)

Fréquence audio	500 Hz	2,5 kHz	10 kHz
Distance	1 m	5 m	20 m

III.5.2. Impulsion codée.

Dans les sonars à longue portée, les émissions modulées en fréquence permettent d'accroître la durée de l'information provenant d'un but tout en conservant une discrimination en distance, égale aux dimensions minimales du but. Ainsi, sur une seule coordonnée sphérique, la distance, on atteint la limite indiquée dans l'introduction, mais en azimut et en site, la précision requise n'est même pas approchée.

IV. LE TEMPS, QUATRIÈME COORDONNÉE.

Nous n'avons pas ci-dessus tenu compte des mouvements relatifs du sonar et du but, et dans les sonars actifs, nous avons utilisé le temps comme variable distance. Mais en localisation, le temps doit

être considéré comme la quatrième coordonnée. En effet, la vitesse des mobiles limite les durées d'observation et, en particulier, la largeur minimale des lobes de directivité.

IV.1. Sonar passif.

Sur la figure IV.1, nous donnons l'exemple d'un sonar passif qui veut détecter à 10 km un but de vitesse latérale totale 10 m/s. Si l'on intègre le signal reçu pendant 10 s, il faut que la largeur du lobe de directivité soit supérieure à un demi-degré.

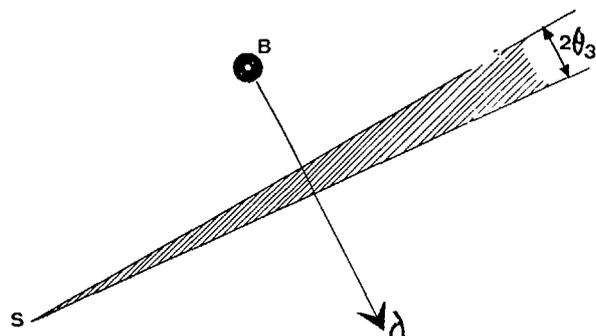


FIG. IV.1. — Sonar passif ; déplacement du but. $\overline{SB} = D = 10$ km, $\lambda = 10$ m/s, $\tau = 10$ s pour $2\theta_3 > 0,5^\circ$.

IV.2. Sonar actif.

En sonar actif, le problème est plus complexe. Sur la figure IV.2, nous avons représenté deux émissions consécutives de S se déplaçant à la vitesse V_T . A l'instant où il reçoit la première émission, le but est en B, animé de la vitesse V_B . La connaissance de la vitesse tireur et du Doppler-but permet de prévoir que B' sera dans la zone hachurée.

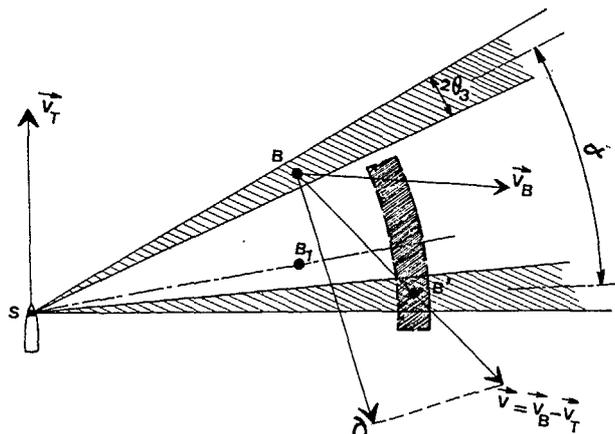


FIG. IV.2. — Sonar actif ; déplacement du tireur et du but. $\overline{SB} = D = 5$ km et $\lambda = 20$ m/s et $\tau = 1$ s, $\Rightarrow 2\theta_3 > 0,2^\circ$ portée : 15 km \Rightarrow cadence : 20 s $\Rightarrow \overline{BB'} = 500$ m et $\alpha = 2^\circ$.

L'exemple choisi montre que, pour une distance de 5 km, une vitesse latérale de 20 m/s et une durée d'intégration de 1 s, la largeur minimale du lobe est de $0,2^\circ$.



Si la portée est de 15 km, la cadence est d'une émission toutes les 20 s. La distance BB' est de 500 m et l'angle BSB' égal à 2°, soit 10 fois le faisceau minimal.

V. CONCLUSION.

Notre étude de la localisation en détection sonar aboutit aux trois conclusions pratiques suivantes :

— la discrimination optimale ne peut être obtenue que sur la coordonnée distance (*),

— la connaissance de l'immersion du but est difficile à atteindre,

— la vitesse des mobiles, souvent supérieure au centième de la célérité du son, peut rarement être négligée ; si elle améliore la détection par l'effet Döppler, elle limite aussi la discrimination en gisement et rend difficile la corrélation des échos successifs.

(*) La mesure précise de l'azimut demande un fort rapport signal-bruit et n'est utilisée que pour la conduite du tir.