



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

P. MAGUER

Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique DCAN-BREST-29240 BREST
Naval

avec la collaboration de H. CLAVELLOUX

Thomson C.S.F. - Division des Activités Sous-Marines 29283 BREST

RESUME L'imagerie très fine requiert des systèmes à grande résolution spatiale.

Les moyens électromagnétiques universellement utilisés en milieu aérien trouvent une limitation très rapide en milieu sous-marin par suite des très fortes absorptions et de la diffusion sur les particules en suspension. Les seuls systèmes pratiquement utilisables actuellement et qui assurent des portées acceptables font appel à des moyens acoustiques. La grande résolution requise oblige à mettre en oeuvre des ondes acoustiques à très haute fréquence, en impulsions brèves, qui permettent de réaliser des antennes de dimensions physiques acceptables et compatibles avec la définition demandée.

Après un bref rappel des critères imposés, on analyse les caractéristiques et les performances globales de quelques systèmes qui permettent d'obtenir des portées de plusieurs dizaines de mètres pour une résolution spatiale de l'ordre de quelques cms.

SUMMARY

Great resolution capabilities are necessary for underwater imaging systems.

Optical systems are seriously impaired by absorption, back scattering and forward scattering due to concentration of suspended matter in most waters.

This is not generally the case with acoustical imaging systems ; using high frequency waves, thin beam patterns can be obtained with both unfocused and focused transducers and adequate resolution and range can be achieved.

The limiting factors are discussed and experimental results presented.



IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

Voir sous la mer devient de nos jours un besoin de plus en plus vital aussi, bien sur le plan militaire que sur le plan civil, soit directement par l'oeil, soit indirectement par l'intermédiaire d'un dispositif monté sur un porteur habité ou non.

Grâce à de nombreux et constants développements technologiques survenus au cours des dix dernières années des progrès considérables ont été réalisés dans ce domaine et les moyens actuellement disponibles permettent de voir correctement jusqu'à des distances comprises entre quelques mètres et plusieurs dizaines de mètres suivant les performances désirées.

En fonction des conditions d'environnement, de la turbidité du milieu en particulier, des moyens optiques ou des moyens acoustiques peuvent concurremment être envisagés.

Le but de cet exposé est, en premier lieu d'expliciter les limitations propres à chacun des procédés puis de présenter quelques exemples de réalisations acoustiques et les résultats qu'ils ont permis d'obtenir.

I. - LES MOYENS OPTIQUES

Nul n'ignore la médiocrité relative des résultats obtenus par les dispositifs optiques pour l'examen détaillé à grande distance des structures ou objets dans l'eau de mer ; la turbidité de l'eau a été jusqu'à présent un obstacle infranchissable qui s'ajoute au fait que dans la mer le contraste propre des objets en luminance et en couleur est en général très atténué par rapport au contraste dans l'air. Il arrive couramment qu'un plongeur, par quelques mètres d'immersion seulement, dans les eaux côtières ou portuaires en particulier, soit incapable de distinguer sa main placée à quelques cm de son masque ; inutile d'ajouter que la photographie et la télévision, loin sans doute d'avoir atteint leur maximum, n'ont pas encore apporté les améliorations espérées.

.../...



1.1 - Propriétés optiques de l'eau de mer

L'eau pure atténue très fortement les rayonnements électromagnétiques mais la courbe d'absorption présente un minimum bien caractérisé dans le spectre visible aux alentours de 460 m μ cette atténuation est due en grande partie à l'absorption par les molécules et à un degré moindre à la diffusion par les grosses molécules.

L'éclairement résultant sur un objet placé à une distance r d'une source d'intensité I est la somme de deux termes principaux :

$$E = \frac{I_e e^{-\alpha r}}{r^2} + \frac{I_e K e^{-Kr}}{4\pi r}$$

- le premier terme représente l'éclairement direct
- le second terme représente l'éclairement multi-trajectoire après diffusion.

Le coefficient d'atténuation α compté en m $^{-1}$ est l'inverse de la longueur d'atténuation du milieu, qu'on utilise généralement pour caractériser celui-ci et contient :

- un terme d'absorption a
- un terme de diffusion K
- avec : $\alpha = a + K$

- K est le coefficient d'absorption par diffusion et est en général compris entre 0,2 α et 0,3 α dans le visible, c'est à dire non négligeable (voir figure 1) ; à 460 m μ , la longueur d'atténuation de l'eau pure est de l'ordre de 50 m.

.../...

IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

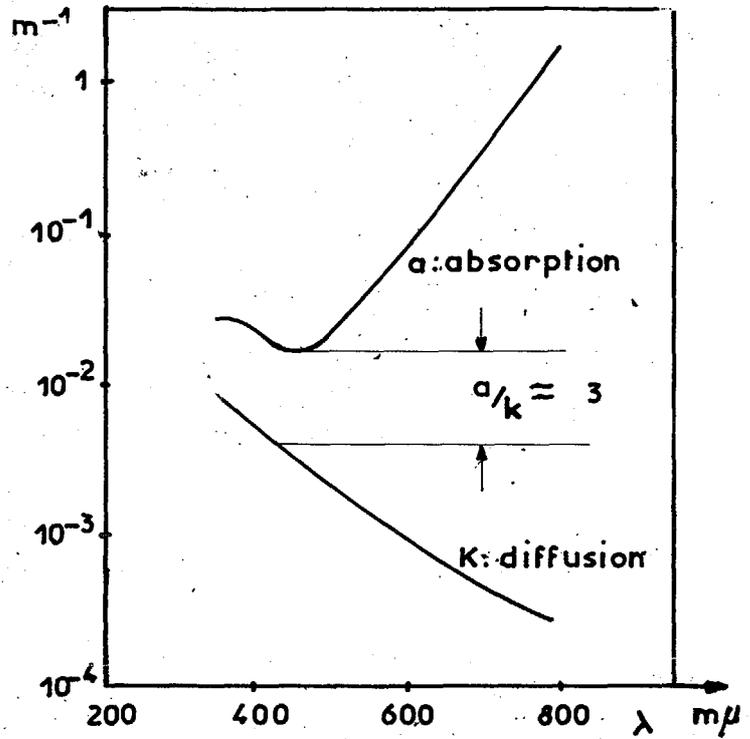


Fig. 1 Absorption et diffusion optiques dans l'eau pure, d'après NG - Jerlov

L'eau de mer contient en plus des particules en suspension d'origine organique ou non qui, en augmentant l'absorption, rendent l'eau de mer trouble ; les substances jaunes mélanoidines absorbent d'autre part de manière sélective les courtes longueurs d'onde ce qui a pour effet de déplacer la fenêtre de transparence de l'eau de mer vers 530 m μ . Leur concentration varie d'un lieu à un autre et est la cause en grande partie des différences de couleur entre les divers océans (d'après DUNTLEY).

.../...



IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

Les particules en suspension peuvent avoir des dimensions très variées mais les particules prédominantes vont de 50 à 500 μ environ, c'est à dire sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde optique.

L'absorption contribue à limiter à la fois l'éclairement de l'objet et l'intensité de la lumière que celui-ci renvoie jusqu'au récepteur. Par conséquent, dans un milieu absorbant et non diffusant, tel que l'atmosphère limpide et l'eau pure, la distance de visibilité dépend presque uniquement du niveau d'éclairement et de la sensibilité de réception ; une augmentation de l'un ou l'autre paramètre fera gagner en distance de perception.

La diffusion présente au point de vue de la formation de l'image deux inconvénients majeurs :

- Le premier est un phénomène de masque ; le volume d'eau situé entre l'objet et le récepteur reçoit de la lumière soit de la surface soit directement du dispositif d'éclairage naturel ou artificiel et la diffuse. Cette lumière rétrodiffusée s'ajoute à la lumière utile issue de l'objet sous la forme d'une composante continue qui dégrade le contraste d'ensemble de l'image, mais d'une manière complètement indépendante de la nature même de cet objet.

- le second est la perte de contraste de détail, qui détruit les fréquences spatiales les plus élevées, par diffusion des points brillants de l'objet sur les points plus sombres. Même en l'absence d'éclairage ambiant (cas hypothétique où l'objet est lumineux par lui-même ou si l'objet est localement éclairé) le milieu dégrade le contraste par diffusion vers l'avant. En effet, des relevés d'indicatrice de diffusion ont montré que 80 % de l'énergie lumineuse diffusée se trouve concentrée dans un angle vers l'avant qui fait moins de 10° avec la direction du rayonnement.

.../...

IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

Si on considère un point lumineux de dimensions très petites et de luminance très grande, l'image de ce point vu à travers une couche d'eau est étalée et sa luminance maximale diminuée. La fonction de transfert de modulation du milieu est définie, à une constante près, comme la transformée de Fourier de cette réponse percussionnelle.

Un objet lumineux peut être considéré comme une juxtaposition de sources ponctuelles de luminances différentes ; l'image de l'objet sera la convolution de l'objet avec la réponse percussionnelle du milieu de propagation.

Toutes les eaux, même les eaux les plus claires, sont de ce fait, des milieux plus ou moins troubles ; le manque de contraste constitue alors le facteur principal de limitation de la visibilité et le problème n'est plus exclusivement énergétique.

1.2 - Améliorations de la vision optique

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour éviter ou compenser la perte de contraste due aux anomalies de propagation.

Des règles élémentaires sont à respecter en ce qui concerne tout d'abord la géométrie du dispositif d'éclairage afin d'éviter d'éclairer la tranche d'eau située juste à l'avant du récepteur. Cela n'est malheureusement pas toujours possible sauf en ce qui concerne certaines installations fixes ou la vision de très près.

Des techniques plus évoluées ont été utilisées pour réduire la rétrodiffusion :

- utilisation de la lumière polarisée ; il y a lieu de disposer un polariseur à la fois devant la source lumineuse et le récepteur mais cette technique, valable dans certaines eaux, est forcément limitée aux circonstances où l'intensité de la lumière polarisée est beaucoup plus forte que celle de la lumière ambiante ; elle peut être alors efficace sans être onéreuse.

.../...



IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

- utilisation de la lumière pulsée ; elle présente une certaine analogie avec les sonars à impulsions ; le processus consiste à émettre des impulsions très brèves et très puissantes combinées avec un obturateur ultra-rapide à la réception afin de limiter le volume d'eau diffusant à une tranche très mince située de part et d'autre de l'objet. Cette technique tomographique a été expérimentée aux USA et devrait progresser au fur et à mesure des développements des lasers et des obturateurs rapides. A l'heure actuelle, le bilan coût efficacité d'une telle opération est très lourd et elle ne peut être réservée que pour certaines applications très particulières où, en particulier, les problèmes d'encombrement le permettent.

- balayage optique ; la discrimination spatiale est obtenue au moyen d'un pinceau lumineux qui balaye ligne par ligne ou mieux, point par point, le champ à observer ; le balayage à la réception se fait en synchronisme avec le précédent ce qui crée la difficulté du système ; d'autre part, la source et le récepteur doivent être excentrés. En contre partie, il autorise l'emploi d'une source continue susceptible de fournir des puissances moyennes énormes ce qui en fait le système théoriquement le plus avantageux.

L'utilisation des filtres colorés à bande étroite peut être envisagée en complément dans certains cas.

Enfin, un ensemble de traitements peuvent être étudiés pour améliorer le contraste des images reçues soit en temps différé par voie optique, soit en temps réel par voie électronique ; on peut attendre beaucoup des procédés de traitement qui utilisent des fonctions de transfert de modulation appropriées ; il s'agit alors de restituer le contraste perdu par diffusion vers l'avant en accentuant les fréquences spatiales les plus élevées, ce qui laisse supposer que la perte due à la rétrodiffusion a été compensée ou évitée par ailleurs par un autre artifice.

.../...

IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

En résumé, on peut penser que l'utilisation optimale de ces diverses techniques doit apporter une augmentation de la distance de visibilité, suivant la nature du milieu, comprise entre 2 et 4 fois la distance de visibilité normale, soit environ 10 fois la longueur d'atténuation. A titre d'exemple, signalons que dans les eaux côtières, aux environs de BREST en particulier, la longueur d'atténuation atteint au maximum 2 à 3 mètres dans les meilleures conditions ; elle est souvent de quelques cm seulement. Elle peut atteindre plusieurs mètres dans les eaux océaniques profondes.

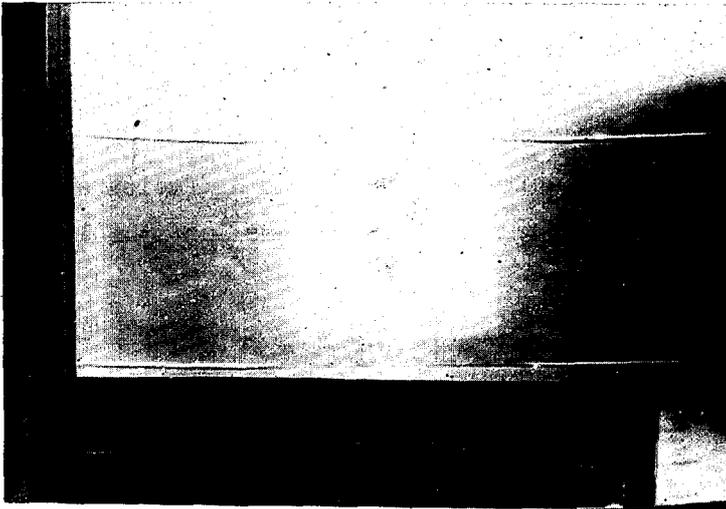
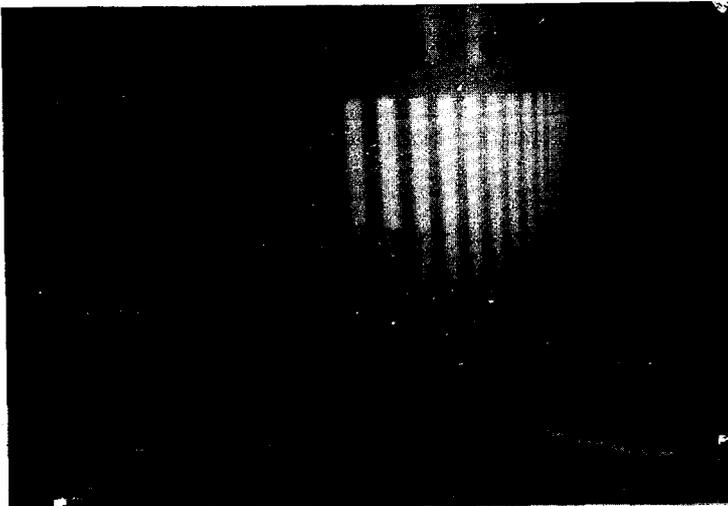
Clichés 11

Image T V - Miré sous-marine et oscillogramme d'une ligne



Même image après modification éclairage et traitement.



Ces quelques données suffisent à situer la diversité et la complexité des problèmes qui restent à résoudre et nous inclinent à penser que pour plusieurs années encore la vision correcte en eau trouble devra être assurée par d'autres procédés moins tributaires du milieu et plus perfectibles à court terme.

2. - LES MOYENS ACOUSTIQUES

Le comportement de l'eau de mer vis à vis des ondes ultra sonores est tout à fait différent de celui que nous venons de voir car la dimension des particules en suspension est en général très petite par rapport aux longueurs d'ondes envisageables du fait de l'absorption qui augmente comme le carré de la fréquence et qui limite en premier lieu la portée des ondes sonores susceptibles d'être utilisées pour l'imagerie sous-marine.

Quoiqu'il en soit le phénomène de diffusion existe toujours mais à un degré beaucoup moindre même dans les eaux les plus sales.

2.1 - Propriétés acoustiques de l'eau de mer

Le processus de la diffusion d'une onde ultra sonore est celui décrit par Lamb ; la fraction d'énergie incidente diffusée par une sphère rigide isolée est égale à : (1)

$$\frac{7}{9} (ka)^4$$

a : étant le rayon

k : le nombre d'ondes = $2\pi/\lambda$

Cela conduit à une réduction de l'intensité sonore en fonction de la distance r, compte tenu des pertes par divergence géométrique, de la forme :

$$I = I_0 \frac{e^{-\alpha r}}{r^2}$$

$$\text{avec } \alpha = 4,5 \cdot 10^2 a^3 \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} \text{ m}^{-1}$$

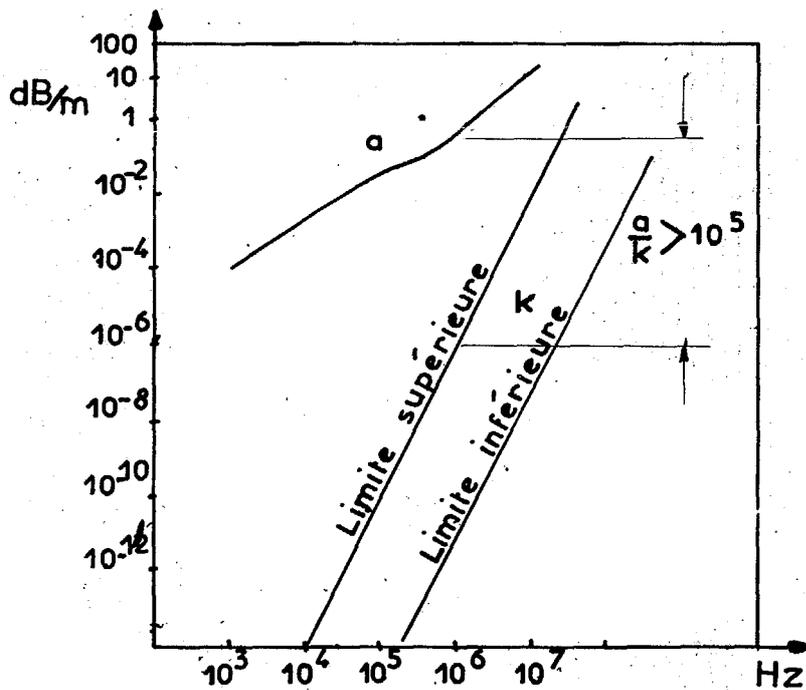
ρ est la densité volumétrique des particules en suspension.

- (1) Ce calcul fait abstraction de la diffusion par les particules molles organiques.

.../...

IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

En utilisant cette relation théorique on obtient les deux courbes K de la figure 2, selon la dimension des particules et leur concentration (eaux océaniques ou eaux portuaires). Dans la gamme de fréquences comprise entre 200 KHz et 1 MHz l'atténuation due à la diffusion dans les eaux les plus troubles est au moins 10^5 fois plus faible que celle due à l'absorption et elle ne joue donc pas un rôle capital.

Fig 2

Absorption et diffusion acoustique dans l'eau de mer

a - Absorption mesurée

K - Diffusion calculée



Par contre, la réverbération de volume qu'elle apporte peut affecter la portée d'un système sonar à grande résolution de la même manière que la rétrodiffusion en optique, c'est-à-dire par une réduction du contraste.

Le niveau de réverbération de volume peut être calculé par la relation :

$$R_V = 10 \log \frac{7}{9} (ka)^4 \pi a^2 N/4\pi$$

où N est le nombre de particules par m³

La figure 3 représente cette réverbération en fonction de la fréquence dans les deux cas mentionnés ci-dessus. Les valeurs expérimentales portées sur la même figure sont nettement plus élevées que les valeurs théoriques. A cela deux raisons :

- le calcul ne tient pas compte de la diffusion par les particules organiques, dont les dimensions peuvent être très grandes.
- les mesures à 300 KHz ont été effectuées en eau peu profonde (d ≈ 30 m) en période de grande marée.

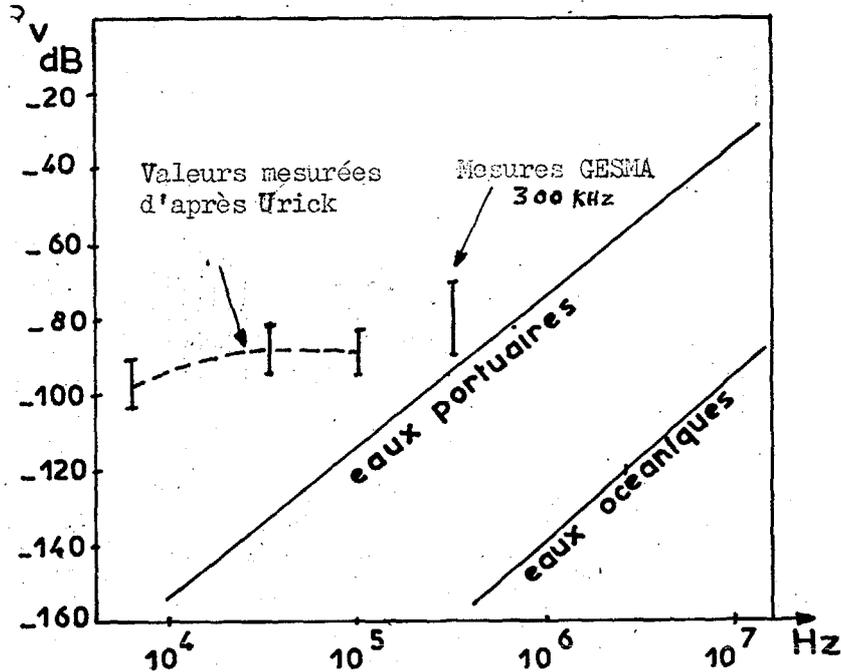


Fig 3: Réverbération de volume en fonction de la fréquence.



La figure 1 montre que cette réverbération est susceptible de limiter la portée des sonars haute fréquence et qu'il y a lieu d'en tenir compte lors de la définition des paramètres d'un système.

Par contre, on est moins catégorique en ce qui concerne l'influence que peut avoir la turbidité du milieu sur la résolution d'une image sonar. On a pu noter, lors de mesures faites en bassin ou en mer dans des conditions tout à fait normales, des distorsions très importantes sur les lobes acoustiques, rendant parfois même toute mesure impossible, pendant des périodes plus ou moins longues; faute de moyens expérimentaux, il n'a pas été possible d'établir une corrélation certaine entre ces distorsions et les caractéristiques du milieu, mais on peut néanmoins affirmer que c'est bien celui-ci qui est en cause. La couche aérée de surface, les nuages de sable ou de vase près du fond, la pression atmosphérique, la saison, entre autres, sont des éléments plus ou moins influents. Il arrive que d'un jour à l'autre ou d'un lieu à un autre, les images sonar semblent moins bonnes ou meilleures, mais les différences sont souvent purement subjectives et, de toute façon, elles sont sans commune mesure avec ce qu'on observe en imagerie optique.

En fait, le grand avantage qu'offre l'acoustique par rapport à l'optique est son adaptativité, grâce en particulier au choix possible de la fréquence d'utilisation, selon la distance de vision et la résolution désirées, compte tenu des caractéristiques du milieu. Il suffit alors de concevoir le système sonar suivant les possibilités technologiques dont on dispose.

2.2 - Les critères d'imagerie en acoustique

Les considérations précédentes ont permis de voir que la vision sous la mer par des moyens optiques mêmes les plus sophistiqués rencontrent des obstacles pratiquement insurmontables dans certaines conditions de turbidité propres aux eaux côtières et aux eaux polluées. Un grand avantage restera cependant toujours à l'optique dans un grand nombre de cas par exemple quand la vision de près est nécessaire (manipulation d'objets par exemple) à cause de la notion physiologique même de l'image.



La notion d'imagerie en acoustique implique l'adoption d'autres critères qui permettront la reconnaissance et la classification des objets vus sous une forme nouvelle et leur présentation à l'observateur sous un aspect aussi conventionnel que possible.

Les propriétés physiques des ondes mises en jeu dans chacun des cas sont en effet si différentes qu'on ne peut pas envisager une imagerie au sens optique du terme ; en premier lieu, il faudrait pouvoir disposer d'une source acoustique incohérente temporelle et spatiale comme la lumière et d'une finesse d'analyse du même ordre.

Les critères utilisés à l'heure actuelle reposent sur les données géométriques suivantes :

- forme des échos donnés par l'objet ; si l'analyse spatiale est suffisamment fine, cet écho peut représenter la silhouette de l'objet et donner une allure de son contour.

- ombre projetée par les objets ; les sonars destinés à la cartographie des fonds reposent sur ce principe ; le fond est insonifié sous une incidence rasante et grâce à l'analyse temporelle l'observateur voit le fond à la verticale.

- la structure de l'écho de l'objet ; au moyen d'impulsions courtes on arrive à séparer les différents points brillants de l'objet et à mesurer quelques grandeurs caractéristiques tels que le diamètre, l'épaisseur de paroi etc ...

Cette énumération n'est pas exhaustive, on pourrait en particulier mentionner également les possibilités offertes par l'holographie acoustique et l'intérêt que pourrait présenter une "caméra" ultra sonore à très haute fréquence pour la vision de près. (< 10 m); la difficulté majeure sera peut être dans ce cas "l'éclairage" du champ.

Avant de donner un aperçu de quelques résultats pratiques obtenus sivant les deux premiers critères retenus, il est nécessaire de définir la réponse du fond et des objets à un signal ultra sonore ; en effet, ces objets sont identifiés par le contraste vis à vis du fond sur lequel ils reposent, la notion de contraste ayant ici la même signification qu'en optique.

.../...

Dans certains cas la présence et la représentation fine de la réverbération du fond est nécessaire, dans d'autres cas, au contraire, elle pourra être néfaste.

2.3 - Réponse du fond à une onde sonore = réverbération

Le fond de la mer est constitué d'un grand nombre de points réverbérants élémentaires dont la réponse dépend de la nature du terrain, des dimensions de chacun de ces points et enfin des caractéristiques de l'onde incidente.

Le calcul du coefficient de réverbération d'un fond donné à partir du théorème d'Helmutz (références 1 - 2 - 4 - 5) met en évidence un certain nombre de propriétés caractéristiques.

On trouve en effet :

$$\sigma = \frac{kh^2}{L} \sin^4 \varphi$$

$$2\pi \left[\frac{k^2 h^4}{L^2} \sin^4 \varphi + 4 \cos^2 \varphi \right]^{3/2}$$

Soit pour les petits angles :

$$\sigma = \frac{kh^2}{16\pi L} \sin \varphi \operatorname{tg}^3 \varphi$$

Cette formule donne le coefficient de réverbération du fond σ dans la direction incidente et :

φ est l'angle que fait le faisceau incident avec le fond ; c'est l'angle de rasance, en anglais "grazing angle".

h^2 est la valeur quadratique moyenne du relief suivant la normale au fond

L est la distance de cohérence de la loi de répartition des points brillants du fond.

k est un coefficient qui est proportionnel à la fréquence de l'onde incidente ($k = 2\pi/\lambda$)

.../...



Les propriétés essentielles mises en lumière par cette relation sont donc :

- la décroissance très rapide de σ lorsque φ diminue (variation en φ^4)
- la proportionnalité à h^2
- la proportionnalité à la fréquence

Les mesures effectuées "in situ" (référence 3) sont résumées ci-après dans les figures 4, 5 et 6. Elles confirment le sens des variations de σ avec la rasanse et la fréquence sans vérifier parfaitement la loi théorique.

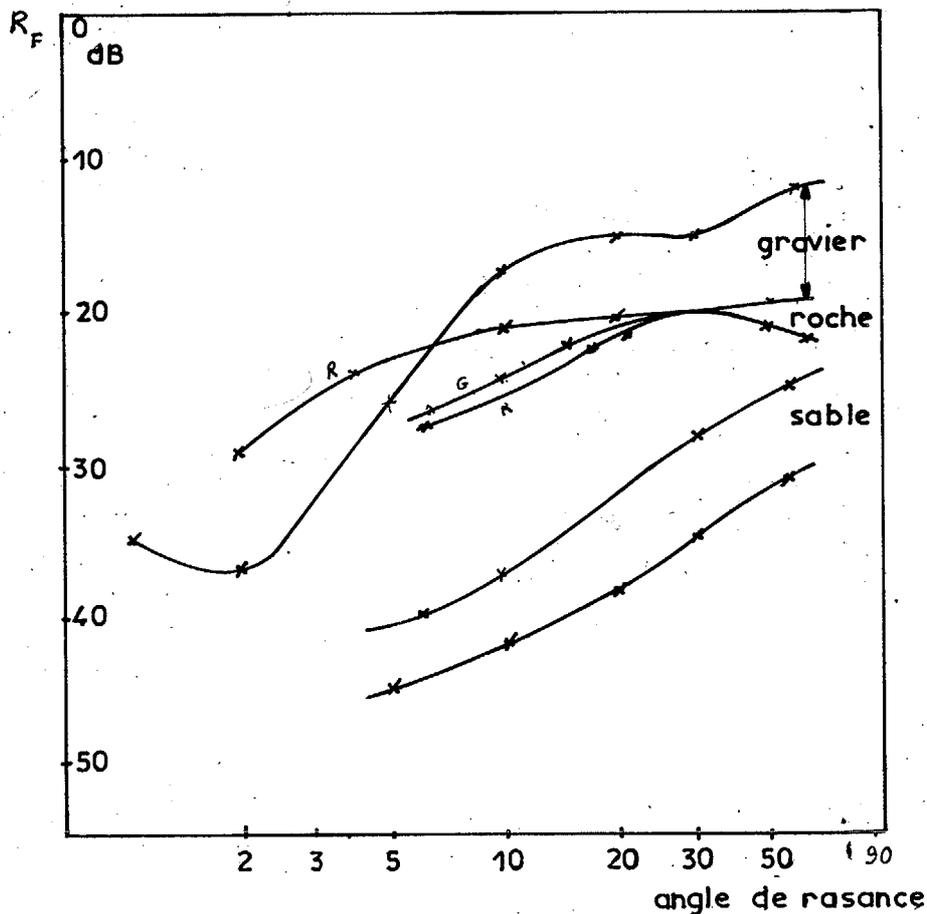


Fig 4: Coefficient de réverbération du fond à 100 KHz.
Mc Kinney - JASA



IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

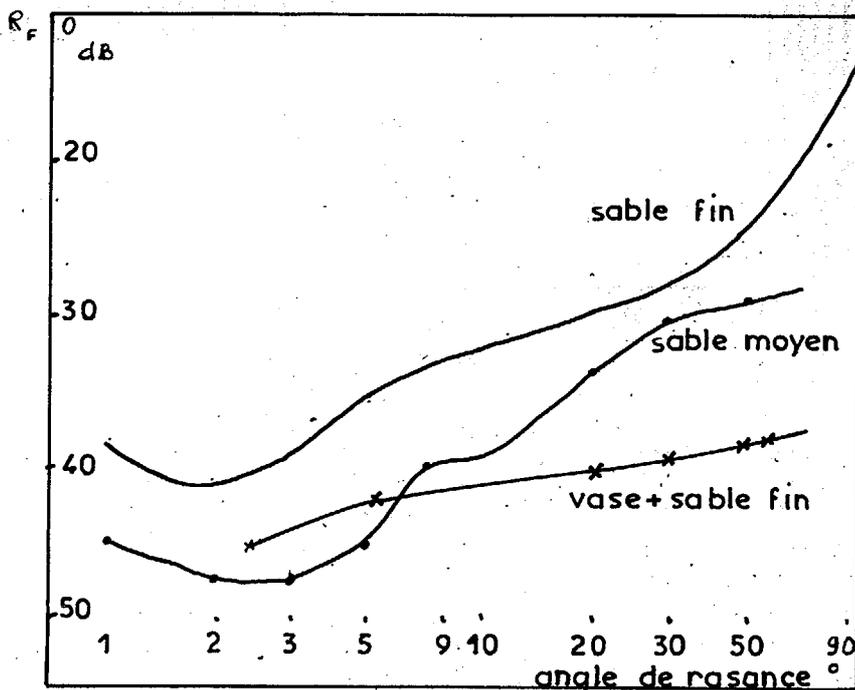


Fig 5 : Coefficient de réverbération du fond à 100 KHz.
Mc Kinney - JASA

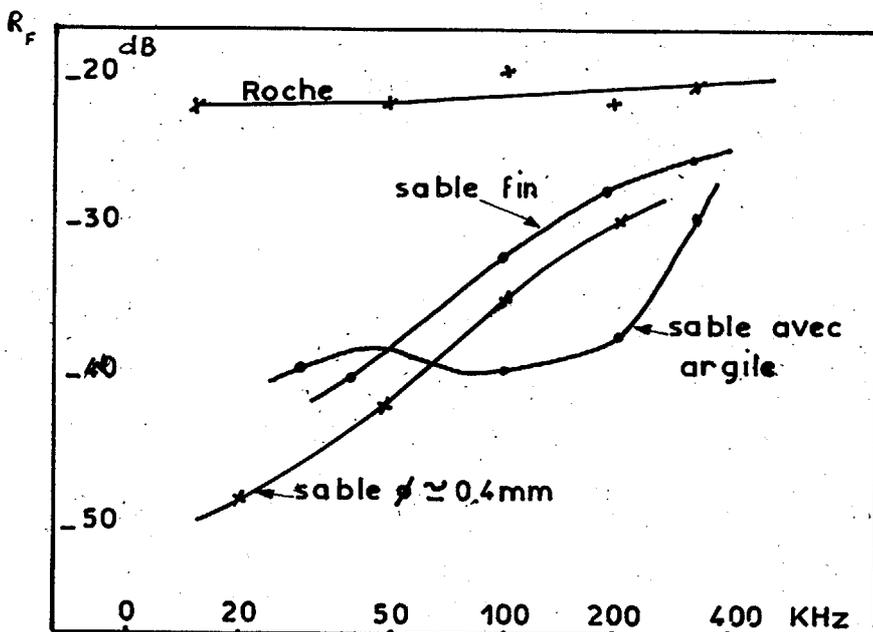


Fig 6 : Coefficient de réverbération du fond en fonction de la fréquence
Mc Kinney - JASA



La cartographie des fonds ou l'identification d'objets posés sur le fond nous amène à rechercher dans la réverbération soit la présence d'un écho, soit la présence d'une ombre. Cela nous oblige à considérer à la fois les propriétés du signal réverbéré en valeur moyenne et en variance.

Si nous faisons les hypothèses suivantes :

- l'aire réverbérante fonction de l'ouverture du faisceau d'analyse, de la distance à l'émetteur, de la durée d'impulsion comprend n points brillants
- tous les points brillants ont même amplitude, seule la phase est aléatoire et de densité de probabilité constante dans l'intervalle $-\pi$ à $+\pi$
- n est grand et les variables aléatoires parties réelles et imaginaires suivent la loi normale, la densité de probabilité du module du signal réverbéré suit la loi de Rayleigh:

$$W(r) = \frac{2}{n} e^{-\frac{r^2}{n}}$$

La puissance de la réverbération (variance) varie donc linéairement avec n c'est à dire avec la surface de la cellule d'analyse du fond.

2.4- Réponse d'un objet à une onde sonore

La réponse d'un objet à une onde sonore est fonction des dimensions de celui-ci par rapport à la cellule d'analyse. A la distance r de la source et pour un pinceau d'ouverture $2\theta_3$ la largeur de la cellule d'analyse sur le fond est $2\theta_3 r$. La profondeur de la cellule est $\frac{c\tau}{2}$ (où c est la vitesse de propagation et τ la durée d'impulsion).

.../...

IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

Si l'objet est petit par rapport au pinceau d'analyse il sera caractérisé par un écho. Si au contraire le pinceau d'analyse est plus fin que la dimension de l'objet le signal reçu en fonction du temps en incidence rasante comprend la réverbération, l'écho, une absence de signal qui correspond à l'ombre et à nouveau la réverbération (fig. 7).

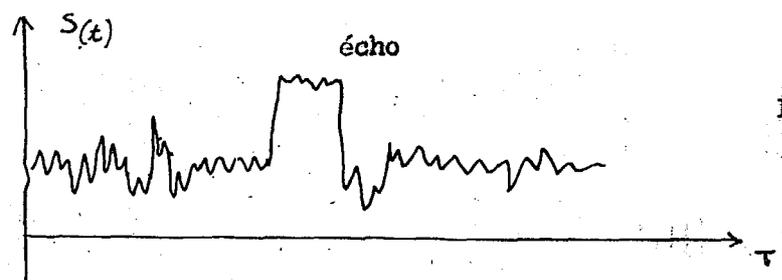


Fig. 7 a

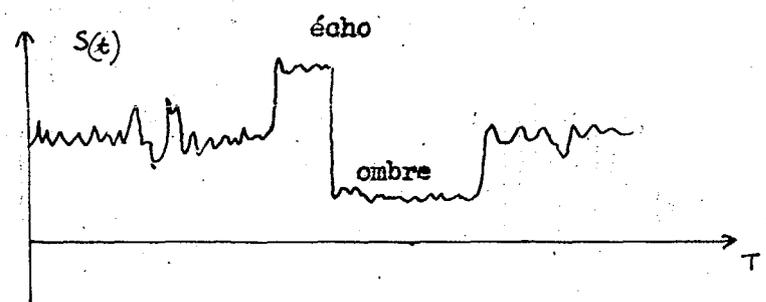


Fig. 7 b

Le contraste écho/réverbération dépend de la nature du fond, de l'index de réflexion du corps et des caractéristiques du signal émis (durée d'impulsion, bande passante).

L'index de réflexion du corps est la mesure du rapport de l'intensité sonore réfléchie (mesurée à 1 m) à l'intensité sonore incidente. Il dépend de la forme et des dimensions de ce corps.

Une sphère de rayon "a" a pour index de réflexion :

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{a^2}{4}$$

Un cylindre d'axe perpendiculaire à la direction de propagation de rayon a et de longueur L a pour index :

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{aL^2}{2\lambda}$$

(On suppose: $a \gg \lambda$)



Il faut ajouter les remarques suivantes :

1 - La réponse de l'objet sera variable selon que celui-ci sera insonifié par un signal à bande étroite ou à bande large (phénomène de scintillation)

2 - La structure de l'écho sera différente selon que le pouvoir séparateur en distance permettra ou non de séparer les points brillants.

3 - Le contraste réverbération/ombre sera limité par les lobes secondaires du pinceau d'analyse et les bruits reçus pendant l'ombre. Aux fréquences utilisées les bruits thermiques des étages de réception prédominent sur les bruits de mer.

4 - La variance de la réverbération est d'autant plus faible que la bande de fréquence émise est plus grande.

Une bonne restitution des formes exige également une analyse fine dans la direction orthogonale à la direction de propagation, c'est à dire en gisement. (figure 8)

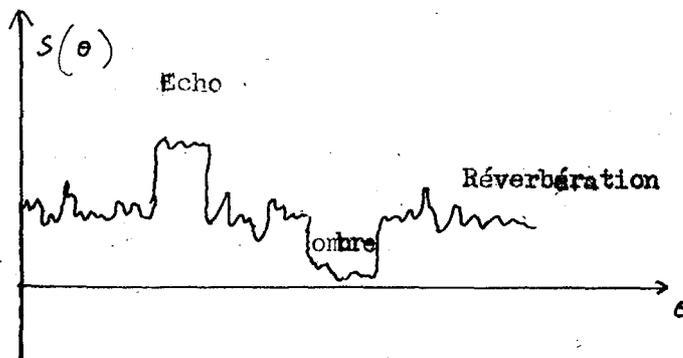


Fig. 8

Supposons pour simplifier que la largeur des plus petits détails à analyser soit θ_c

Le spectre des fréquences spatiales du signal $S(\theta)$ reçu du fond comprend :

- le spectre de la réverbération (valeur moyenne et variance)
- le spectre des objets à représenter qui est de la forme :

$$S(\omega) = \frac{\sin \pi \theta_c f}{\pi \theta_c f} \dots/\dots$$

IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

Le signal d'entrée du récepteur placé derrière l'antenne est donc :

$$v(\alpha) = \int_{(\theta)} s(\theta) r(\theta - \alpha) d\theta$$

C'est la convolution du fond par le diagramme de réception et le spectre de fréquence spatiale de v est celui de s filtré par l'antenne.

Si $r(\theta)$ est de la forme $r(\theta) = \frac{\sin \frac{\pi \theta}{2 \theta_3}}{\frac{\pi \theta}{2 \theta_3}}$

$R(\omega)$ transformée de $R(\theta)$ est uniforme pour $-\frac{\pi}{2 \theta_3} < \omega < +\frac{\pi}{2 \theta_3}$ et nul à l'extérieur de cet intervalle.

On pourra donc, après passage dans l'antenne, reproduire le fond à condition que l'ouverture à mi-puissance de la voie réception soit telle que :

$$2 \theta_3 \leq \frac{\theta_c}{2}$$

- D'autre part, le sonar doit échantillonner le fond à une cadence compatible avec la taille minimale des objets à visualiser.

Cet échantillonnage peut être réalisé de diverses façons :

- par un sonar à voies préformées dans le secteur angulaire d'exploration
- par rotation mécanique d'une ou plusieurs voies préformées ou non
- par déplacement de l'antenne (sonar latéral)

On doit faire en sorte, pour respecter le théorème de Shannon que :

$$\frac{1}{\theta_E} \geq \frac{2}{\theta_c} \quad \theta_E \text{ étant le pas d'échantillonnage} \quad \dots/\dots$$



Pour que le filtre d'interpolation, après échantillonnage, soit réalisable on prendra :

$$\theta_{\frac{c}{5}} = \frac{\theta c}{2,5}$$

Cela signifie :

- que pour un sonar à voies préformées le pas entre voies doit être inférieur ou égal à 0,8 fois l'ouverture à mi-puissance.

- que pour un sonar monovoie à rotation d'antenne la vitesse angulaire de celle-ci est limitée à $\frac{c \theta c}{5 d_{\max}}$
(où d_{\max} est la portée maximale)

- que pour un sonar latéral monovoie le déplacement entre deux impulsions doit être inférieur à $\frac{\theta c}{2,5}$

- En conclusion, les considérations précédentes démontrent clairement que les paramètres physiques d'un sonar à haute résolution destinée à la représentation des ombres sont liées très directement à la dimension des objets que l'on veut traiter ainsi qu'à la distance.

- la fréquence détermine en premier lieu la distance maximale, à cause de l'absorption

- la durée des impulsions, c'est à dire la bande passante du système, donne le pouvoir de résolution en distance

- la largeur du pinceau acoustique donne le pouvoir de résolution en gisement

- enfin, le nombre de voies en gisement ou la vitesse d'analyse est donné par l'échantillonnage spatial souhaité.

De la fréquence et de la résolution en gisement dépend d'autre part, la dimension du transducteur. Celle-ci est limitée par des considérations technologiques (précision d'usinage, coût) et très souvent par des problèmes d'encombrement et de masse. Un compromis entre ces différents paramètres s'avère généralement nécessaire pour chaque application ; nous nous limiterons à l'examen des solutions envisageables en ce qui concerne le Principe du transducteur, faisant abstraction de toute autre considération telle que : durée d'impulsion, largeur de bande etc ...



Etant donné la résolution angulaire recherchée, la longueur du transducteur est toujours grande et comme on est conduit généralement à travailler à des distances relativement courtes, on se trouve à l'intérieur de la zone de Fresnel.

2.5 - Les transducteurs : examen de différentes solutions

2.5.1 - Réseau plan

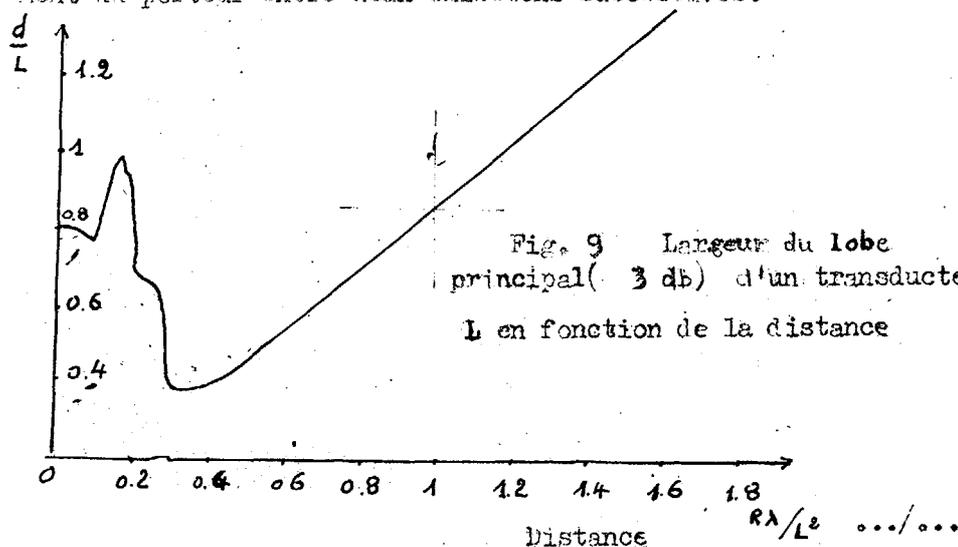
Supposons un réseau plan de longueur L .

La figure 9 donne l'ouverture à 3 db du diagramme de directivité en fonction de la distance au transducteur ; la figure 10 représente le niveau du premier secondaire par rapport au principal dans les mêmes conditions.

En champ très proche et à la distance correspondant à la zone de Fresnel (L^2/λ) la résolution est au mieux égale à la longueur du transducteur, dans la zone intermédiaire, on arrive à des résolutions meilleures mais au détriment du niveau des lobes secondaires (figure 11)

Une manière de pallier cet inconvénient et d'augmenter la résolution en champ très proche dans le cas d'un sonar latéral ou d'un sonar à faisceau tournant est de décaler soit angulairement soit linéairement le transducteur E par rapport au transducteur R.

Les figures 12 et 13 montrent des exemples de résultats obtenus au moyen d'un décalage linéaire qui tient compte du déplacement du porteur entre deux émissions successives.



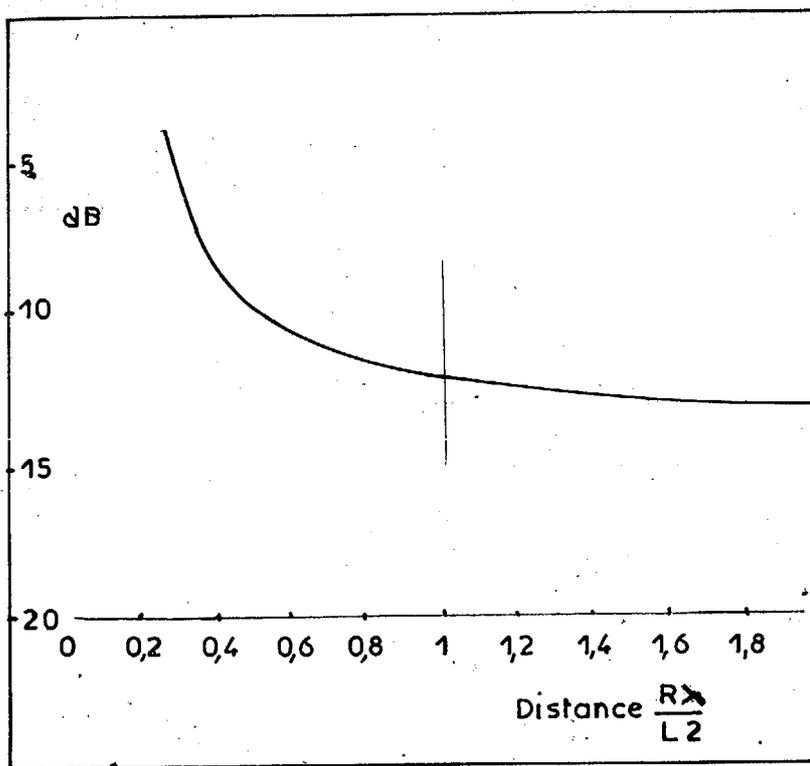


Fig 10: Niveau du 1er secondaire en fonction de la distance

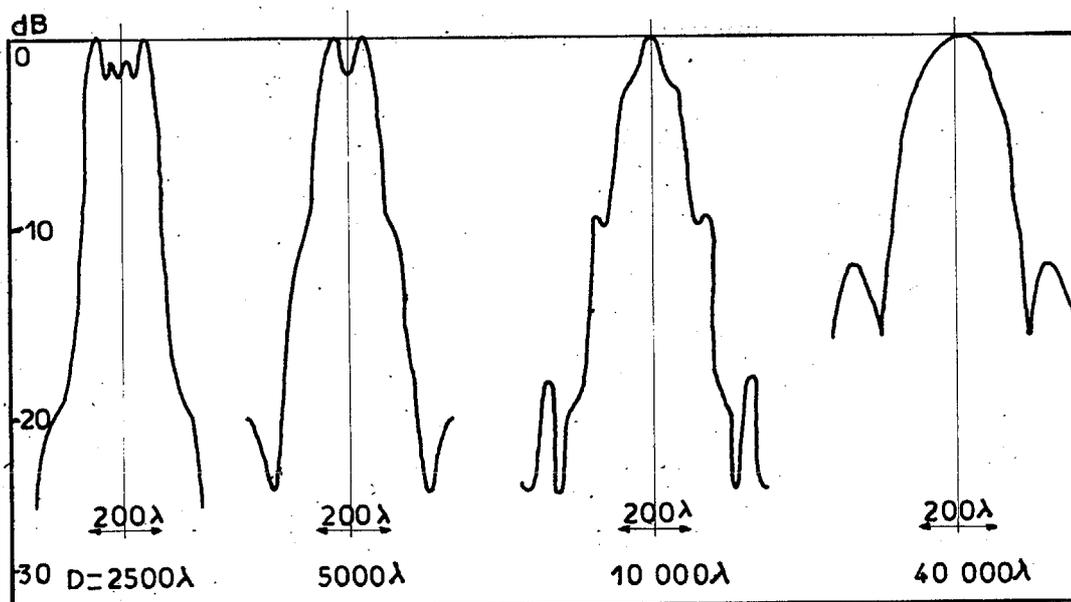


Fig 11: Quelques exemples de diagrammes de directivité en fonction de la distance. $L = 200\lambda$

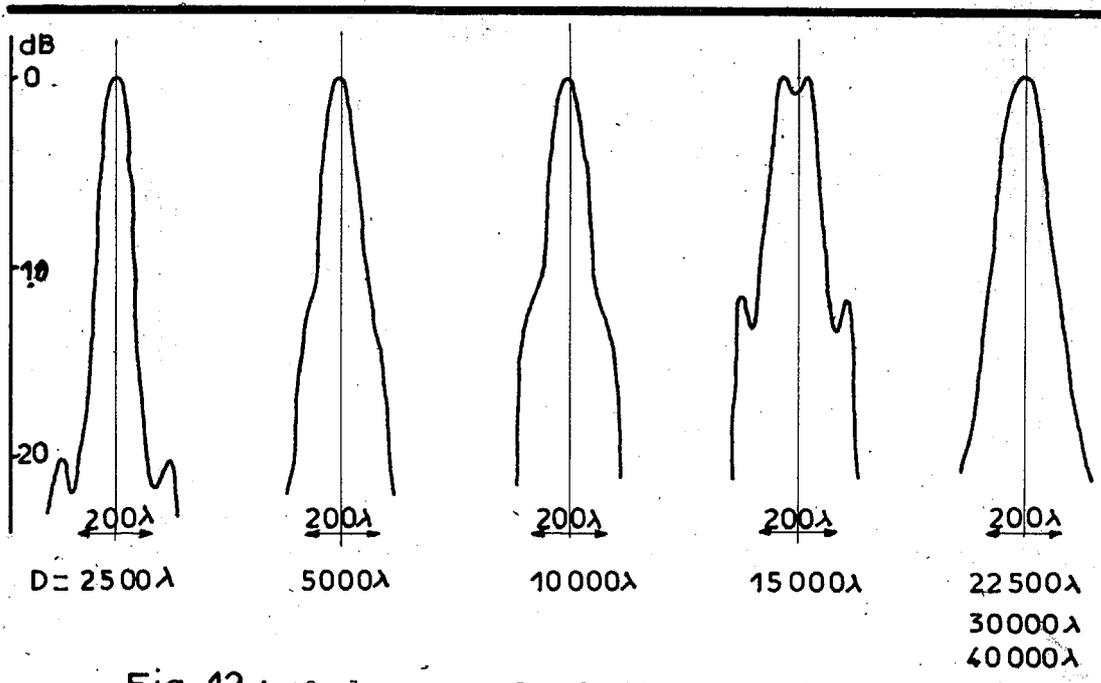


Fig 12 : Quelques exemples de diagrammes obtenus par décalage des transducteurs. $L = 200\lambda$
 $\Delta = 130\lambda$ $v = 5$ noeuds

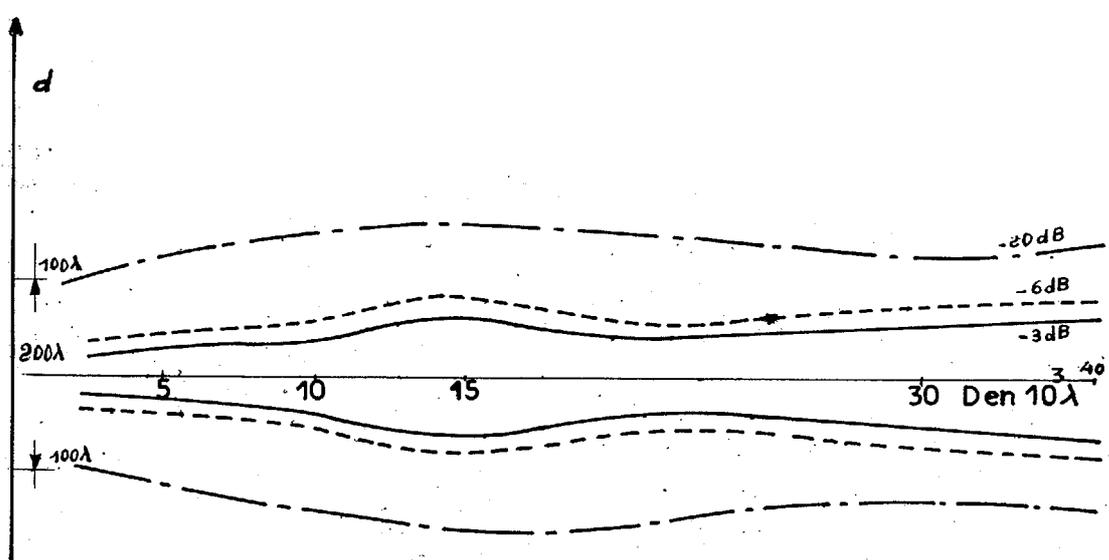


Fig 13: Découpe sur le fond

TRANSDUCTEURS DRÔITS
 $L = 200\lambda$
 DECALAGE LINEAIRE $\Delta = 130\lambda$
 VITESSE PORTEUR 5 NOEUDS.



2.5.2 - Niveau focalisé

Si on désire une résolution encore meilleure il est nécessaire de focaliser

- La focalisation peut se faire mécaniquement (courbure de l'antenne) ou électriquement.

Un transducteur de longueur L focalisé à une distance D à une profondeur de champ :

$$D = 4 \lambda \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2$$

Ce calcul est fait dans l'hypothèse d'une différence de longueur de marche maximum de $\lambda/4$ entre les rayons marginaux et le rayon central.

Un exemple de réalisation est donné à la figure 14 ; la résolution au point de focalisation est de l'ordre de L/5.

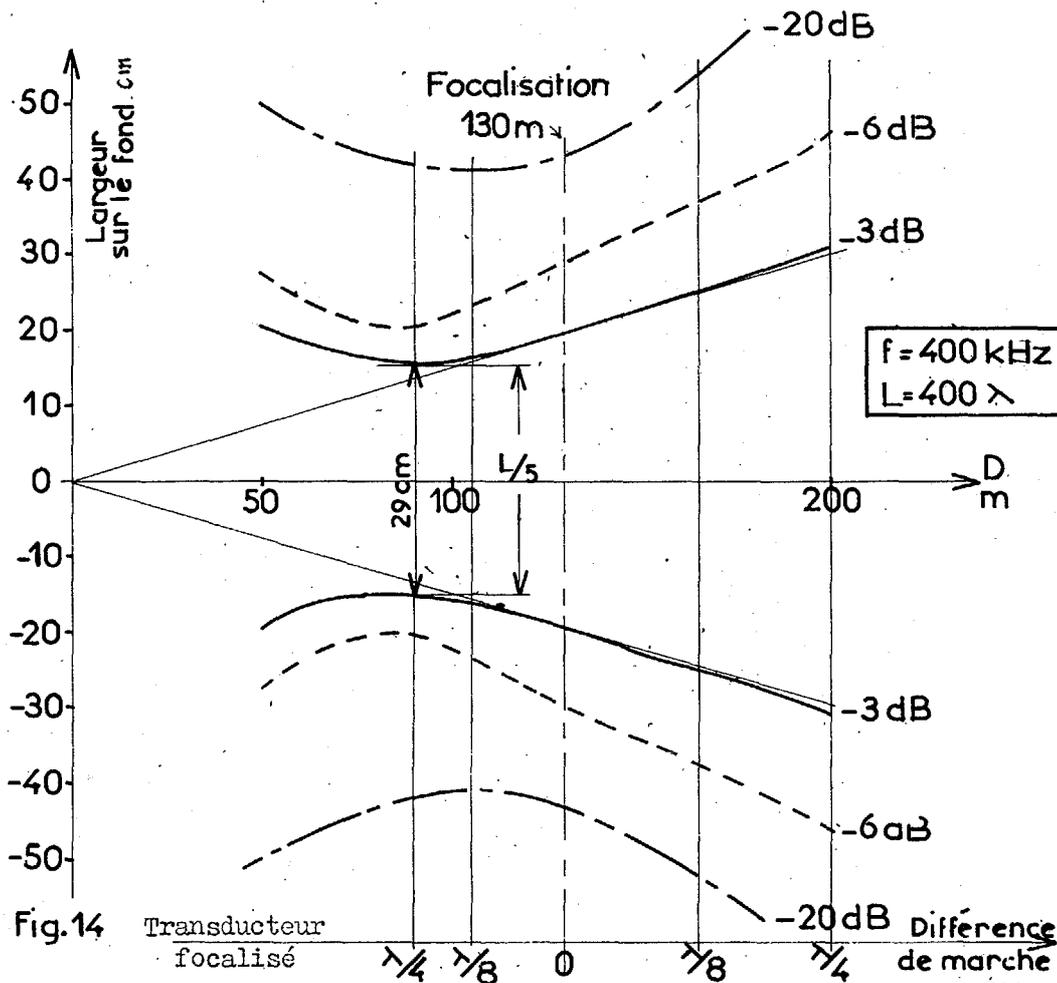
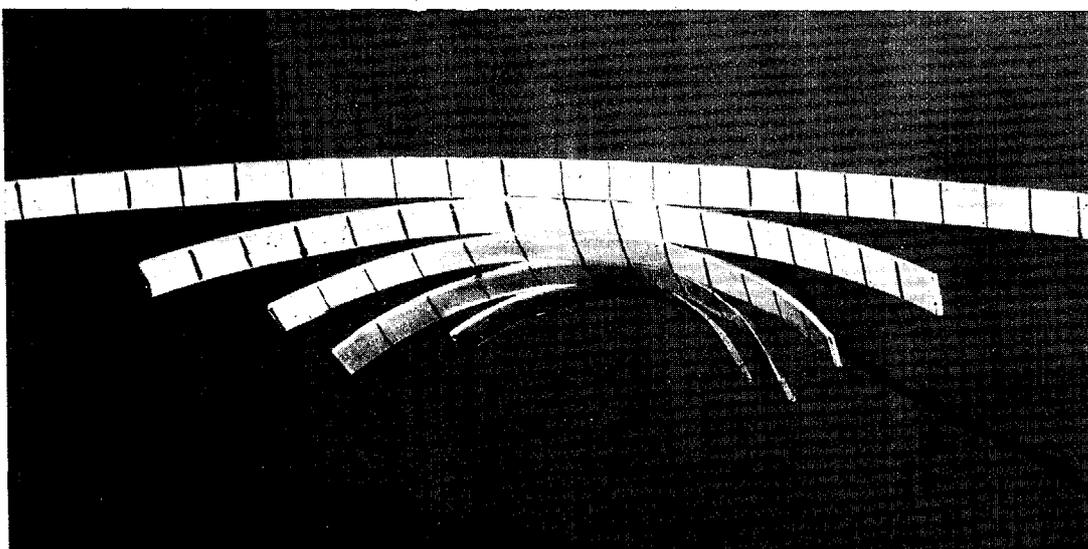


Fig.14 Transducteur focalisé



Si la profondeur de champ est trop faible on a la possibilité de réaliser un transducteur à focalisation variable en distance soit :

- par l'utilisation de plusieurs alignements de courbures différentes décalées en site ; le cliché 2 montre un exemple de réalisation constitué de 5 alignements prismatiques de plaquettes de céramiques collées à l'arrière d'un bloc de plexiglass à double courbure ; les longueurs des génératrices décroissent en fonction du site afin que le pouvoir de résolution transversal reste constant le long de l'axe d'exploration.



Cliché 2 - Transducteur à plusieurs alignements focalisés.

- en changeant la loi de focalisation dans le temps si celle-ci est obtenue par voie électronique.

Dans l'application au sonar latéral une autre solution peut être envisagée ; le transducteur est alors constitué d'un alignement disposé sur un arc de cercle dont le rayon est égal à l'altitude h sur le fond et l'énergie acoustique est focalisée en tous points d'une ligne du plan focal situé sur le fond de la mer, comme le montre la figure 15.

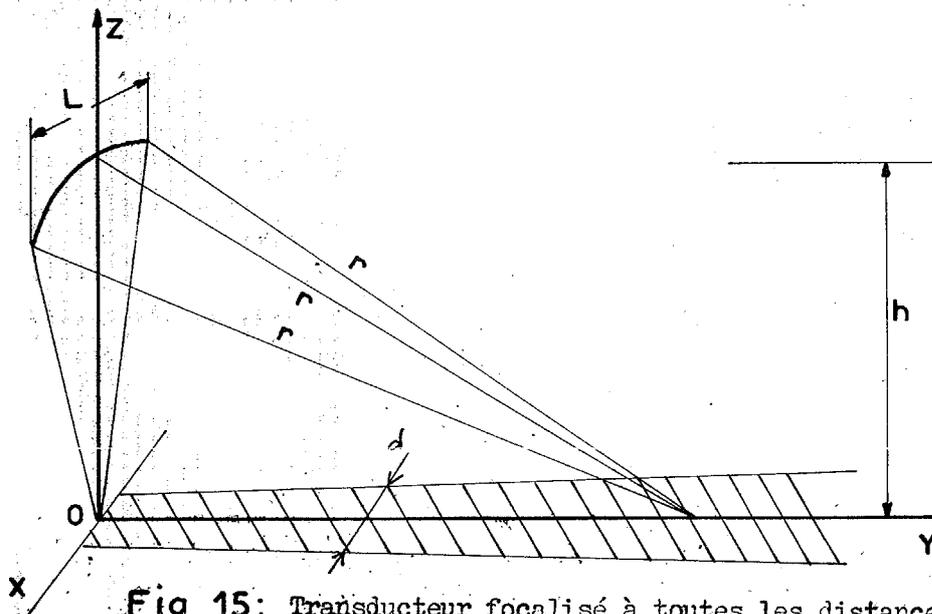


Fig 15: Transducteur focalisé à toutes les distances

La figure 16 donne un exemple de diagramme obtenu par ce procédé à une distance horizontale de 10 m ; la largeur du faisceau sur le fond à -3 db est de l'ordre de 2,5 cm ; la longueur du transducteur est de 400λ , la fréquence de 750 KHz et la portée maximale supérieure à 50 m ; à cette distance la résolution est encore de l'ordre de 12 cm. La hauteur de l'alignement est suffisamment petite pour avoir une grande ouverture en site.

Les griefs que l'on peut formuler à l'encontre de ce dispositif concernent la profondeur de champ qui augmente en fonction de la distance et limite de ce fait les erreurs tolérables sur l'altitude du transducteur par rapport au fond. Un exemple de diagramme relevé à la verticale du transducteur est donné à la figure 17 ; il montre la distorsion sur le diagramme résultant d'une variation de 0,5 m de l'altitude nominale par rapport au fond ($h = 6,5$ m).

La différence est très sensible mais la résolution est encore très acceptable.

.../...

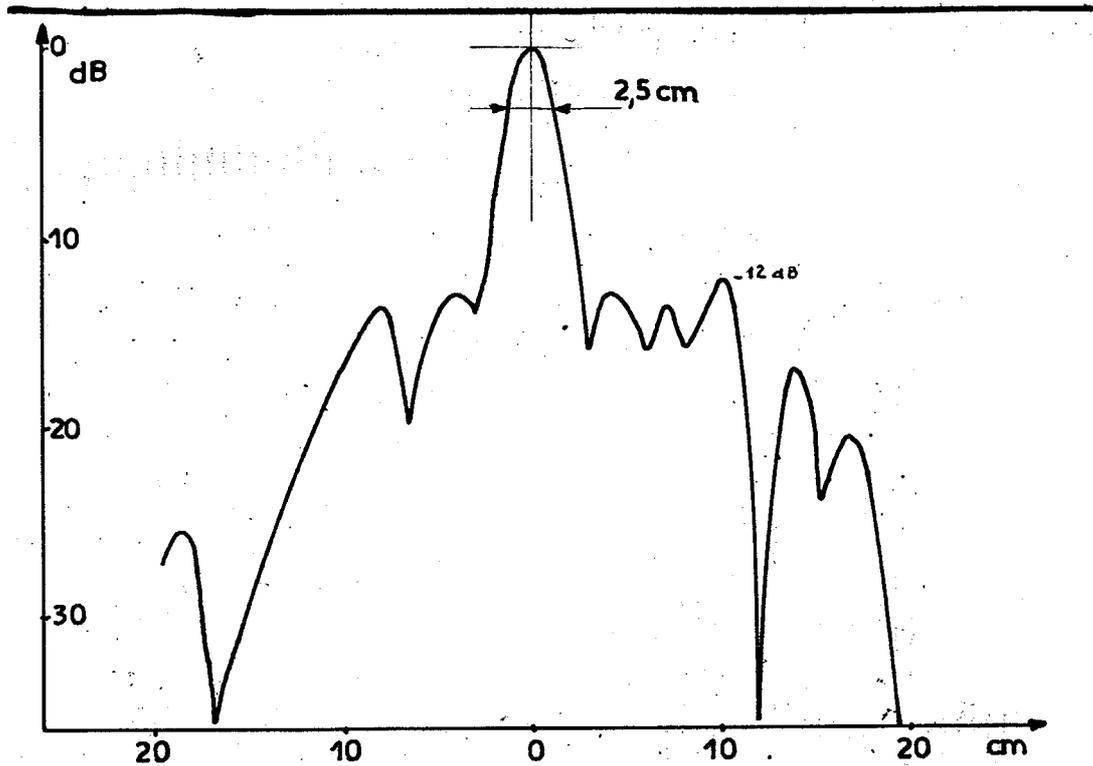


Fig 16: Transducteur focalisé
 $L = 400 \lambda$ • $\lambda = 2 \text{ mm}$
 coupe pour $D = 10 \text{ m}$

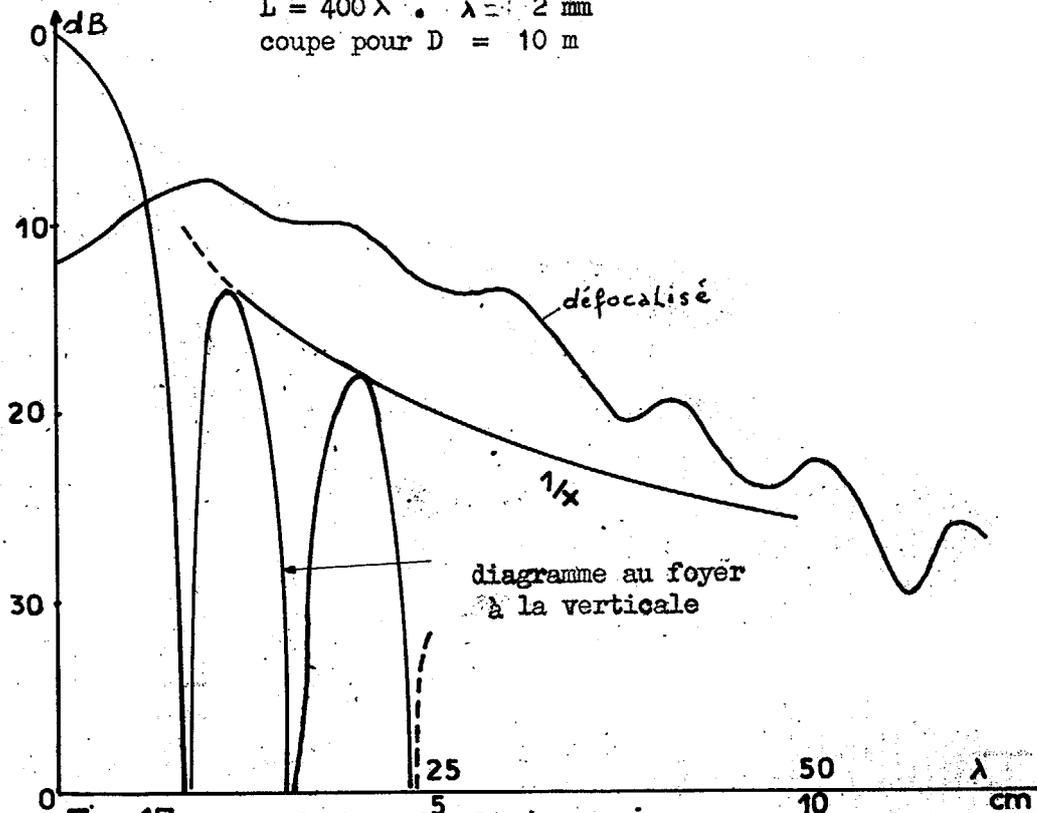


Fig 17: Transducteur focalisé
 Influence d'une variation de h , $\Delta h = 0,5 \text{ m}$ $h_0 = 6,5 \text{ m}$



2.5.3 - Antenne synthétique

Quelques exemples d'applications d'antennes synthétiques en radar ont été décrits dans la littérature mais jusqu'à présent nous n'avons pas connaissance de réalisations équivalentes dans le domaine sonar. Cela tient principalement au fait que le rapport c/v en radar est environ 10.000 fois plus grand qu'en sonar et que les diagrammes de rayonnement synthétisés risquent d'être perturbés par les mouvements aléatoires du centre de phase de l'antenne "physique" pendant le temps de sommation des signaux si la navigation du porteur n'est pas suffisamment bonne.

Théoriquement, on peut obtenir par un traitement de ce genre une compression de faisceau très importante.

2.6 - Quelques résultats d'imagerie acoustique sur écho et sur ombre

Les résultats obtenus sont relatifs à un certain nombre de matériels qui diffèrent essentiellement entre eux par leur mode d'exploitation et par les performances globales visées.

Les clichés ci-dessous représentent un échantillonnage d'images du fond obtenues à partir de trois systèmes :

- un sonar latéral à 2 voies comprenant un véhicule remorqué et une console destinée au traitement du signal et à la représentation (en temps réel sur tube à entretien d'image et enregistrement sur bande de papier électro-sensible.

Ce sonar fonctionne à 750 KHz et sa résolution spatiale est meilleure que 10 cm. Il permet de voir depuis la verticale du véhicule jusqu'à une distance maximale de 50 m. L'intercept d'un véhicule est donc de 100 m et sa vitesse de 5 nœuds.

C'est le genre de système particulièrement adapté à la cartographie précise des fonds.

- un sonar mono-voie à faisceau tournant avec représentation panoramique sur tube à mémoire.

.../...



L'ensemble immergé comprend une tête acoustique suspendue par un câble sous l'embarcation. L'exploration du fond est assurée par la rotation mécanique du faisceau ultra sonore asservi en azimut. Le système peut fonctionner à point fixe ou avec une vitesse de remorquage limitée à 2 noeuds.

Trois gammes de portées sont possibles

40

80

120 m

Les résolutions en gisement sont de l'ordre de 20 cm. L'avantage de ce système est que sa hauteur par rapport au fond est réglable à volonté et que la tête peut-être descendue sans risque sur les terrains les plus accidentés. D'autre part, la même portion de terrain peut être examinée autant de fois que le désire l'opérateur.

- un sonar à voies préformées limitées à un secteur de 10° orientable sur tout l'horizon. L'ensemble du matériel étant placé à bord du bâtiment les dimensions du transducteur peuvent être plus grandes que dans les cas précédents ; de ce fait la fréquence de travail a pu être abaissée pour augmenter la portée. (420 KHz)

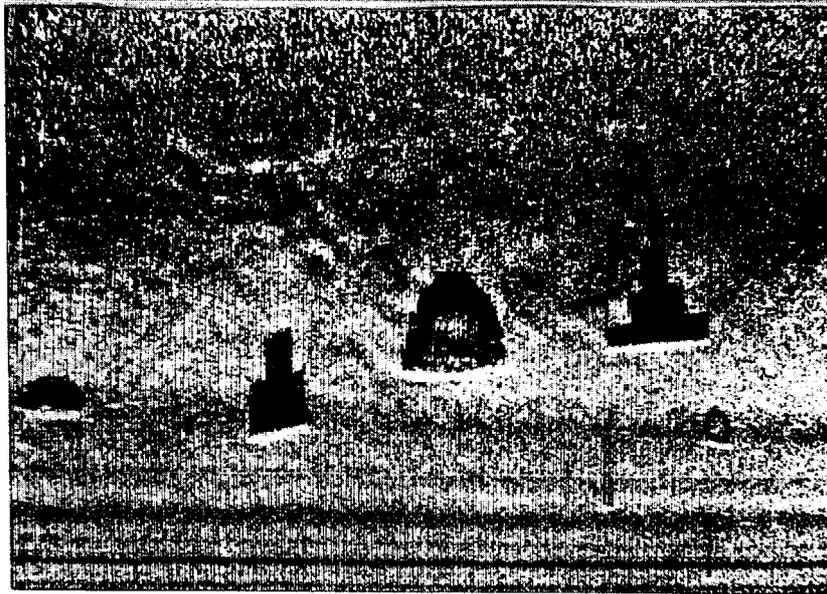
Le sonar permet de voir entre 50 et 200 m avec une résolution de l'ordre de 40 cm en gisement. La durée d'impulsion est de 250 ps.

La console d'exploitation comporte un dispositif d'extraction qui permet de mettre l'image en mémoire et de visualiser une fraction agrandie du champ.

BIBLIOGRAPHIE

1. - The scattering of **electromagnetic** waves from rough surfaces
P. Beckmann and A. Spizzichino - Pergamon Press London 1963
2. - Theoretical studies on the scattering of acoustic waves from a rough surface C.W. Horton and T.G. Muir - J.A.S.A. Vol 41 n° 3 1967

Model studies on the scattering of acoustic waves from a rough surface. C.W. Horton, S.K. Mitchell, G.R. Bernard - J.A.S.A. Vol 41 n° 3 - 1967
3. - Measurements of backscattering of sound from the ocean bottom
C.M. McKinney and C.D. Anderson - J.A.S.A. Vol 36 n° 1 - 1964
4. - Analysis of acoustic wave scattering by a composite rough surface - James C. Huang - J.A.S.A. Vol 49 n° 5 - 1971
5. - The backscattering of sound from a harbour bottom
R.J. Urlick - J.A.S.A. Vol 26 n° 2 1954
6. - Use of F.M. pulses to measure acoustic backscatter from rough plane surfaces - J.L. Markson, R. Stern - J.A.S.A. Vol 49 n° 5 1971
7. - JERLOV - Optical oceanography - 1968
8. - S.Q. Duntley - Light in the sea
JOSA - Février 63
9. - BK - Gazey - University of Birmingham
Ocean technology - Sept 70
10. - Lamb H - The dynamical theory of Sound - Dover 1960



Cliché 3 - Images d'objets divers posés sur le fond

F = 1 500 KHz



Cliché 4 - Silhouette d'un plongeur

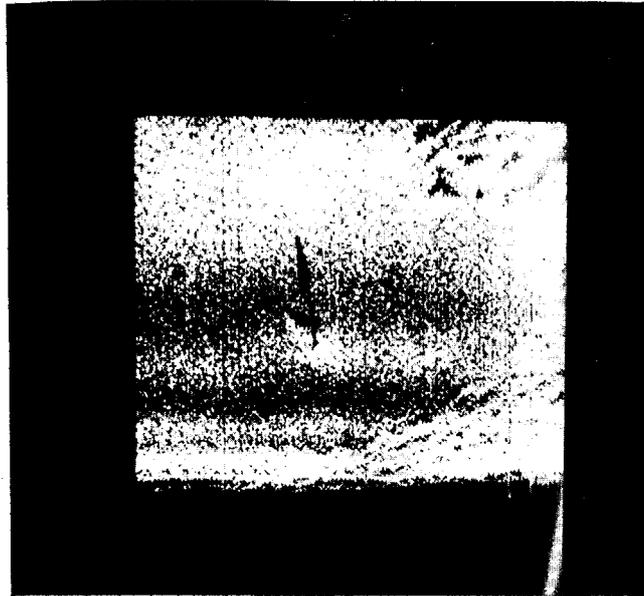
F = 1500 KHz



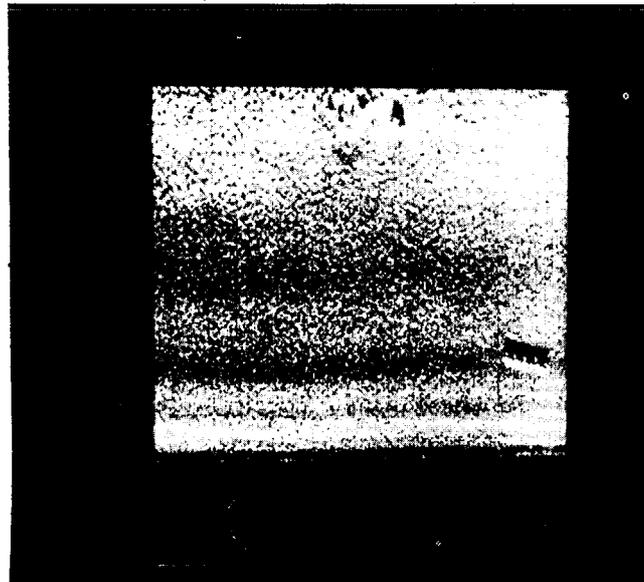
Cliché 5 - Sonar panoramique mono voie 750 KHz



Cliché 6 - Balayage limité à un secteur de 30°



Cliché 7 - Sonar latéral 750 KHz - ombre projetée d'un ancre.



Cliché 8 - Sonar latéral 750 KHz - Image d'un objet cylindrique rempli d'eau. La présence des échos dans l'ombre provient de la réflexion de l'onde sur la paroi arrière à travers des trous de 8 cm de diamètre.



IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS

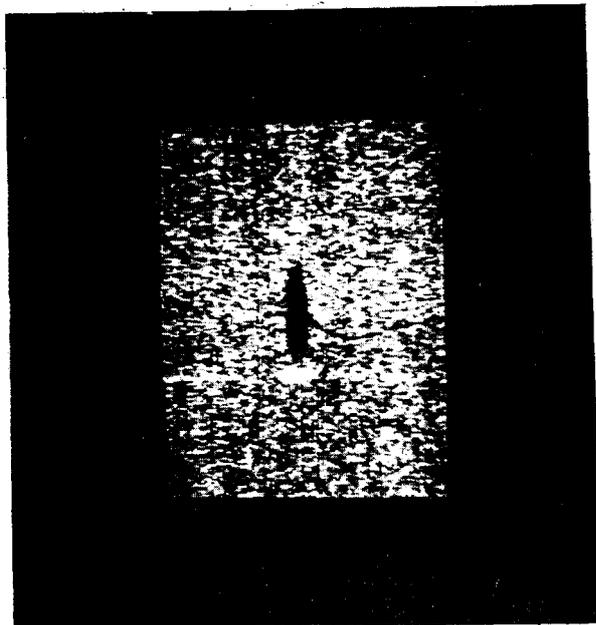
Cliché 9 - Image d'un fond de rides sur un sonar à voies préformées



Cliché 10 - Exemple de variations de profil du terrain.



IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS



Cliché 11 - Corps sphérique posé sur un fond de sable; on discerne
l'ombre de l'orin fixé sur l'objet

D = 150 m

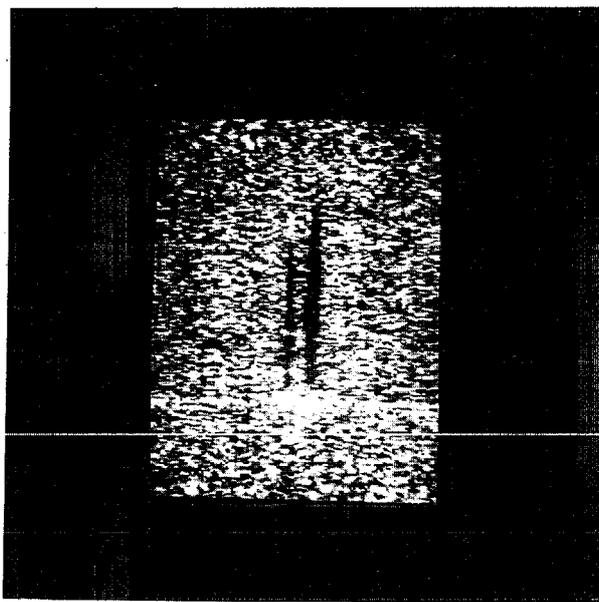


Cliché 12 - Echo et ombre d'une ancre ancienne

D = 160 m



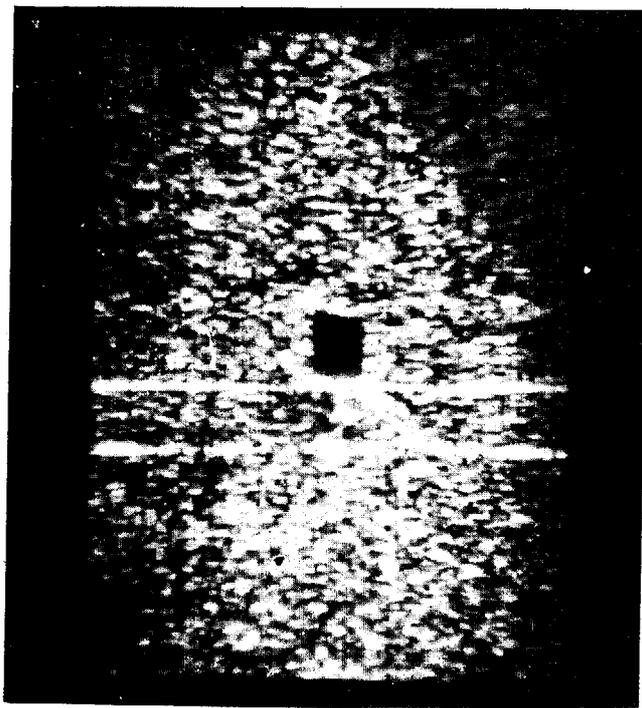
IMAGERIE DES FONDS SOUS-MARINS



- Cliché 13 - Image de 2 objets écartés de 50 cm $D = 150$ m
Cette image donne une idée du pouvoir séparateur du sonar.



- Cliché 14 - Image d'un corps cylindrique sur un fond de sable mou ;
les lignes de niveau sont provoquées par le courant.



- Cliché 15 - Corps cylindrique - 150 m



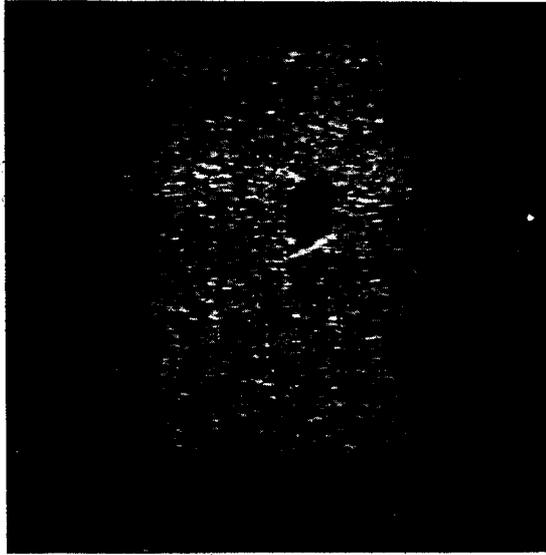
- Cliché 16 - Corps de profil supérieur sphérique.



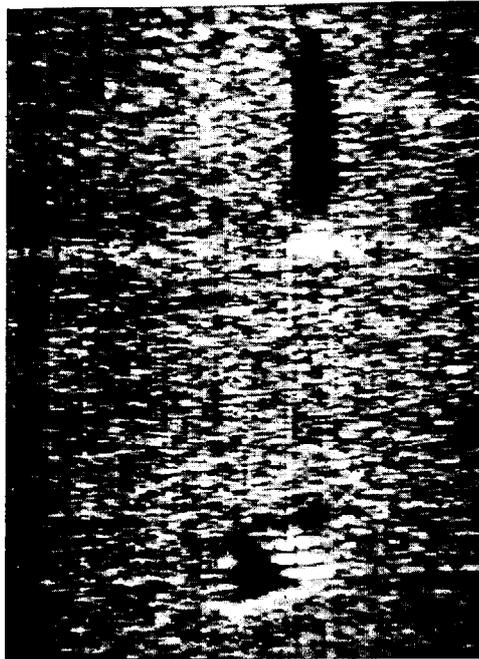
Cliché 17 - Exemple de fond cahotique



Cliché 18 - Image d'un gros rocher



Cliché 19 - Objet cylindrique sur un fond de sable fin
D = 170 m



Cliché 20 - Objet cylindrique rempli d'eau (en bas) et percé de trous.
Ces trous ne sont visibles que sous certaines incidences.