

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE
D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

MM. R. PHILIPPART^{*} & G. RICCARDI^{**}

* GESMA/DCAN BREST 29240 BREST NAVAL

** CIT/ALCATEL 1, AVENUE ARISTIDE BRIAND 94110 ARCUEIL

RESUME

En application directe des principes physiques, on étudie la faisabilité d'une formation d'image par transformation de Fourier numérique à deux dimensions des signaux reçus sur une matrice de capteurs. On analyse la possibilité d'utiliser une base lacunaire et les contraintes de travail en champ proche.

L'étude théorique est suivie de la présentation d'une maquette probatoire et des essais effectués en milieu marin, avec l'assistance technique du GESMA.

Sur cible ponctuelle, les résultats obtenus sont conformes à la théorie. Sur objets réels, ils s'avèrent plus complexes et d'interprétation délicate ; il semble nécessaire d'envisager un accroissement des performances (donc du volume de l'équipement).

L'ensemble des travaux a été soutenu par contrat DRME.

SUMMARY

In direct application of physical principles, the feasibility of acoustic imaging using the two-dimensional numerical Fourier transform of signals received on planar hydrophone array is studied.

The possibility to use an array with randomly spaced elements and the constraints of near-field work, are analyzed.

After theoretical study, the experimental equipment is described and sea trials are presented.

With a punctual target, the results agree with the theory. However with real objects, they are more complex and their interpretation is delicate. It seems necessary to increase the performances, and consequently the volume of equipment.

This work was supported technically by the GESMA under contract with DRME.

ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

INTRODUCTION

Les performances des dispositifs optiques sont très limitées dans le milieu marin en raison des fortes atténuations et diffusions des ondes lumineuses. Ces limitations ont amené à développer des sonars à haute définition (fonctionnant en HF) pour explorer finement ce milieu.

Pour l'essentiel, ces dispositifs {1} exploitent le phénomène d'ombre accompagnant les objets posés sur le fond et utilisent des voies préformées par déphasages ou par retards.

Nous présentons un dispositif d'imagerie bidimensionnelle appliquant directement la propriété générale des antennes planes selon laquelle le diagramme de directivité dans l'espace est la transformée de Fourier à deux dimensions de la loi d'illumination de la base, à un instant donné.

Après avoir exposé les principes et la constitution du système, nous analysons les résultats obtenus pour différents objets, avec une maquette probatoire.

1. PRINCIPES GENERAUX

1.1 - Définition d'une antenne (voir figure 1)

Le diagramme de directivité d'une base linéaire (de longueur D), formée de N éléments discrets espacés de

d, suit une loi en $\frac{\sin(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta}$ répétée tous les

$\theta = \text{Arc sin } \lambda/d$. Le domaine utile est délimité par $\pm \theta_{\text{max}}$ ($\theta_{\text{max}} = \text{Arc sin } \lambda/2d$).

Pour éliminer les lobes images, on utilise des éléments dont la directivité propre affaiblit les ondes de dépointage supérieur à $\pm \theta_{\text{max}}$.

Toutes les propriétés précédentes sont transposables aux bases planes. Notons que l'on doit considérer la loi d'illumination complexe de la base pour lever l'ambiguïté de signe sur le dépointage. La finesse de l'image est déterminée par l'ouverture du lobe principal à 3 dB, soit $2\theta_3 = \text{Arc sin } \frac{\lambda}{D}$.

Une antenne est alors définie à partir de :

- l'ouverture du champ utile θ_{max}
 - la finesse de l'image $2\theta_3$
- par :
- l'espacement des éléments : $d = \lambda/2 \sin \theta_{\text{max}}$
 - la longueur de l'antenne : $D = \lambda/\sin 2\theta_3$
 - le nombre d'éléments : $N = \frac{D}{d}$

{1} P. MAGUER - Imagerie des fonds sous-marins
GRETSI : 3e colloque sur le Traitement du signal
et ses applications - Nice 1973

1.2 - Propriétés des bases lacunaires

Pratiquement, les relations ci-dessus conduisent très rapidement à un nombre élevé d'éléments, si l'on veut à la fois, un grand champ et une bonne résolution angulaire. On peut alors envisager l'utilisation d'une base lacunaire, c'est-à-dire d'une base où tous les emplacements disponibles ne sont pas équipés d'hydrophones.

La théorie des bases lacunaires, nous apprend que :

1. Le nombre de directions séparables est égal au nombre d'emplacements (comme pour la base pleine).
2. Le gain d'antenne ou gain en rapport S/B n'est plus l'index de directivité de la base pleine mais $10 \log N$ (N : nombre total d'hydrophones câblés).
3. Le niveau quadratique moyen des lobes secondaires par rapport au principal est de : $- 10 \log N$.
4. Le niveau maximum probable des lobes secondaires est égal à : $- 10 \log N/4$.
5. En présence d'une image composée de P points d'amplitude u_i le niveau relatif des lobes secondaires remonte de

$$10 \log \frac{\sum_{i=1}^P u_i^2}{u_{\text{max}}^2}$$

6. La répartition des hydrophones doit assurer un lobe principal étroit et des niveaux de lobes secondaires identiques d'une voie à l'autre. Une distribution de DOLPH satisfait ces conditions.

Ces résultats ont été vérifiés par simulations numériques sur des antennes carrées de 64 x 64 et de 16 x 16 emplacements équipées de 400 et de 50 ou 100 éléments actifs.

Ces propriétés reposent sur une étude probabiliste et sont d'autant plus vraies que le nombre d'éléments est grand.

1.4 - Travail en champ proche

1.3.1 - Définition de la distance de FRESNEL

C'est la distance D_F pour laquelle l'écart de phase des extrémités de l'antenne par rapport au centre est égal à 45°. Dans cette hypothèse,

$$D_F = \frac{D^2}{\lambda}$$

1.3.2 - Correction de sphéricité

Pratiquement, les distances considérées nous obligent à travailler en champ proche (en deçà de D_F). Pour supprimer les inconvénients liés à ces conditions de fonctionnement (augmentation des lobes secondaires, élargissement du lobe principal, baisse du gain d'antenne), on est conduit à compenser les déphasages.

La correction à apporter s'écrit :

$$\tau = \frac{X \sin \theta}{c} + \frac{X^2 \cos^2 \theta}{2rc}$$



ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

Avec x : distance de l'hydrophone au centre de la base

θ : angle de dépointage

c : vitesse du son

r : distance de l'objet à la base.

1.3.3 - Profondeur de champ

Elle est définie comme étant l'écart de distance Δr autour de la distance corrigée à partir duquel les défauts cités précédemment, réapparaissent.

En première approximation, Δr vaut :

$$\Delta r = \frac{4}{\pi} \frac{r^2}{D_F} \Delta \phi, \text{ où } \Delta \phi \text{ est l'écart de phase toléré.}$$

Avec $\Delta \phi = 45^\circ$, $\Delta r = \frac{r^2}{D_F}$

1.4 - Formation des voies par Transformation de Fourier

La formation des voies dans deux dimensions est obtenue par transformation de Fourier des échantillons complexes, prélevés à un instant donné sur les éléments de la base. Cette transformation est réalisable numériquement par application d'un algorithme de FFT (COOLEY-TUCKEY).

2. DEFINITION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE

2.1 - Choix de la fréquence de travail

Ce choix dépend de la portée maximale recherchée et définit les dimensions de l'antenne.

La courbe de la figure 2 montre, pour un niveau d'émission de 100 dB, la variation de la portée en fonction de la fréquence. Le choix d'une fréquence de 400 kHz permet une portée de 200 m et des dimensions d'antenne raisonnables.

2.2 - Paramètres acoustiques

2.2.1 - Emission

L'émission est réalisée à l'aide d'un hydrophone placé sous la base de réception. Le signal émis est un créneau de sinusoïde pure, de durée variable.

2.2.2 - Réception

Elle est effectuée sur une base carrée lacunaire à 256 hydrophones dont seulement 100 sont câblés.

L'espacement entre deux hydrophones est de 15λ ; les dimensions de la base étant de $240 \lambda \times 240 \lambda$. Ce qui donne un champ utile $\theta_{\max} = \pm 1^\circ 9'$ et un angle d'inter-voie de $0^\circ 24'$.

Avec une telle base de réception, le niveau quadratique moyen des lobes secondaires est de -20 dB; le niveau maximal montant à -14 dB, dans le cas d'une cible ponctuelle. La profondeur de champ est indiquée sur la courbe de la figure 3.

2.3 - Traitement des signaux (figure 4)

2.3.1 - Canaux hydrophoniques

Les signaux hydrophoniques subissent un traitement analogique qui consiste en une préamplification, un filtrage à 400 kHz, un contrôle automatique de gain, un changement de fréquence à 20 kHz permettant un traitement plus aisé en multipliant les temps dans le rapport 20.

2.3.2 - Numérisation des signaux

L'échantillonnage des signaux est étalé dans le temps de façon à réaliser une correction de sphéricité ; les instants de prélèvement étant fonction de la distance base-cible. La valeur complexe du signal est obtenue en échantillonnant à T et à $T + T/4$. Une mise en mémoire analogique permet un codage digital à 8 bits en multiplexé. Il est éventuellement possible pour l'expérimentation de diminuer la finesse de quantification des signaux en supprimant les bits de faible poids.

2.3.3 - Traitement

Les sorties numérisées sont rangées dans la mémoire d'un mini-calculateur T2000. Cet organe de calcul effectue une transformation de Fourier complexe, bidimensionnelle.

2.4 - Commande et sortie de résultats

2.4.1 - Organe de commande

Les commandes se font au clavier de la télécrite du mini-calculateur.

Les paramètres de réglage sont les suivants :

- durée d'émission (0,1 - 0,3 - 1 - 3 ou 10 ms)
- distance de la cible (de 50 à 200 m)
- distance à corriger (de 50 à 200 m)
- nombre d'hydrophones utilisés (100 ou 50)
- nombre de bits de quantification du signal (de 1 à 8)

A partir de ces paramètres, le calculateur détermine la date à laquelle il faudra prélever les échantillons de signal et fixe la loi de prélèvement.

2.4.2 - Visualisation

Les modules normalisés par rapport au maximum sont imprimés sous forme d'une matrice carrée 16×16 .

3. EXPERIMENTATION DE LA MAQUETTE EN MILIEU MARIN

La maquette a été expérimentée à Brest dans un bassin de grandes dimensions et en rade, sur buts ponctuels puis sur cibles complexes. Pour une interprétation rapide des images nous adoptons dans ce document une représentation synthétique utilisant le codage défini à la figure 6.

Précisons, par ailleurs que, sauf indication contraire, les résultats présentés ont été obtenus avec une quan-



ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

tification à 8 bits et 100 canaux hydrophoniques (N = 100).

3.1 - Essais sur cibles ponctuelles

La cible ponctuelle est un petit transducteur alimenté par l'émetteur de la maquette et placé à une certaine distance face à la base de réception. Les résultats confirment le bon fonctionnement global du matériel et la validité des principes utilisés.

Pour un bien pointé rigoureux d'une voie sur la cible le niveau des lobes secondaires est inférieur à 14 dB et le "lobe principal" est ponctuel. Ces performances sont valables dans tout le champ pour une correction de sphéricité adaptée, avec un nombre de bits de quantification supérieur à 4 et pour 100 hydrophones.

Une correction de sphéricité non adaptée provoque une baisse du lobe principal, une remontée des lobes secondaires et, si on s'éloigne trop de la bonne valeur, un élargissement du lobe principal (cf. figure 5). Pratiquement il est souhaitable que l'erreur de phase aux extrémités de la base ne dépasse pas 20° ce qui conduit à une profondeur de champ de 12 m à 50 m et de 200 m autour de 200 m.

Le fonctionnement sur signaux échantillonnés apporte une perte sur le gain (rapport entre le module maximum et l'écart type des lobes secondaires) inférieure à 1 dB. Cet échantillonnage très intéressant du point de vue technologique pourrait être envisagé pour la définition d'un matériel ultérieur.

La dégradation apportée lorsqu'on n'utilise que 50 hydrophones est supérieure à 3 dB ce qui semble montrer que les prévisions (10 log N) ne sont rigoureusement valables que pour un nombre d'hydrophones élevé.

Le fonctionnement sur 2 cibles ponctuelles est conforme à la théorie, en particulier pour le niveau des lobes secondaires (remontée de 3 dB) et l'influence de l'échantillonnage (affaiblissement du point le plus faible par rapport au plus fort) ; notons que ce dernier effet s'atténue lorsque le nombre de points augmente.

3.2 - Essais sur cibles complexes

Nous commentons ci-dessous quelques images de cibles sphériques ou cylindriques suspendues entre deux eaux ou posées sur le fond.

3.2.1 - Sphère de 1 mètre de diamètre entre deux eaux

3.2.1.1 - Cas d'une durée d'émission courte (0,3 ms)

Cette durée d'émission assure une résolution en distance de 22,5 cm, donc inférieure au rayon de la sphère. La figure 7a donne l'image d'une tranche d'espace englobant la calotte avant de la sphère qui apparaît comme un "point brillant". La figure 7b montre l'image d'une tranche située en arrière de la précédente et proche du diamètre de la sphère. Cette section située

à 53,4 m est vue sous un angle de 1,1 degré et devrait sur l'image donner lieu à une "couronne" de 5 points de diamètre. Cette couronne est à peu près visible mais l'image est notablement dégradée par la remontée de nombreux "lobes secondaires" (remontée théorique en $10 \log \sum_i^P \frac{u_i^2}{u_{\max}^2}$ pour P points d'amplitude u_i)

Cet exemple montre que la "dynamique" actuelle du système est insuffisante pour former correctement l'image d'une cible étendue. L'image considérée serait vraisemblablement exploitable si le niveau des secondaires restait inférieur à -10 dB. Pour obtenir ce résultat il faudrait gagner 5 ou 6 dB sur la dynamique et pour cela utiliser 4 fois plus d'hydrophones (N = 400) en gardant la même définition angulaire (ce qui impliquerait un élargissement souhaitable du champ de l'antenne).

Un système ayant ces performances permettrait d'obtenir des "coupes successives de la cible". On peut s'interroger sur la manière de visualiser ces coupes pour donner une vision globale de l'objet.

3.2.1.2 - Cas d'une durée d'émission longue (1 ms)

Dans ce cas, la résolution en distance (75 cm) est telle qu'on peut former l'image d'une tranche spatiale englobant toute la partie visible de la sphère. En fait sur la figure 6, on distingue essentiellement le point brillant avant qui permet de "détecter" l'objet sans en "voir" la forme. Ceci est lié au fait que la dynamique de l'image est inférieure à la "dynamique propre de la cible". Cette dernière est mal connue. Si nous la supposons égale à 20 dB, il faudrait une dynamique d'image proche de 25 dB pour "voir" la cible ce qui conduirait à N = 1250 dans les conditions de l'expérience.

3.3 - Image d'un cylindre vu par le travers (fig.8)

Le cylindre de 2,2 m de long est, à 63 m, vu sous un angle d'environ 2° et devrait apparaître sous la forme d'une ligne de 9 points. Compte tenu des limitations de la maquette, l'image obtenue est à peu près conforme au résultat attendu. Ici encore il faudrait accroître la dynamique pour obtenir une image plus nette.

3.4 - Image d'une sphère posée sur le fond

Nous examinons ci-dessous la possibilité de voir la "silhouette" des objets en exploitant la réverbération du fond.

Le fond sur lequel l'essai a été effectué était peu réverbérant. Dans ces conditions, il aurait fallu une dynamique très grande pour voir simultanément (cas de la figure 9) le point brillant et les points du fond qui sont à un niveau très inférieur. En fait l'écho



ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

est ici très peu perturbé par la présence du fond. Dans l'exemple de la figure 10, seul le fond renvoie des ondes vers le sonar et on devrait voir apparaître la portion insonifiée délimitant la silhouette de l'objet.

Le résultat est loin d'être net sur l'image observée et ce à cause du nombre et du niveau trop élevés des lobes secondaires liés à la présence de nombreux "points significatifs".

Il faut noter qu'avec une base lacunaire une telle image n'est possible que dans la mesure où la portion visible (P voies) est faible par rapport au nombre N d'hydrophones câblés et a fortiori par rapport au nombre total de voies compte tenu de la lacunarité. Si par exemple, on voulait un contraste moyen de 12 dB et minimum de 6 dB sur fond uniforme, il faut

$$P < \frac{N}{16} .$$

D'une façon générale on peut dire que le choix d'une base lacunaire implique qu'on ne regarde que des objets peu étendus, c'est-à-dire donnant lieu à une faible proportion de points significatifs dans l'image si on veut obtenir un contraste satisfaisant.

5. CONCLUSION

Les essais ont montré la faisabilité d'une formation d'image par FFT et la possibilité pratique d'appliquer une correction permettant un travail en champ proche. Sur cible ponctuelle, l'expérimentation de la base lacunaire a confirmé la validité de cette conception pour les grandes antennes.

Les résultats obtenus sur cibles complexes ont clairement montré que la dynamique permise par la maquette était insuffisante pour obtenir des images exploitables. Pour améliorer les performances, il faudrait trouver, en fonction de la taille et de la dynamique des objets, le meilleur compromis entre la lacunarité et la résolution spatiale.

Il n'est pas évident qu'il faille accroître le nombre de voies en profitant au maximum de la lacunarité plutôt que réaliser un ensemble de voies restreint mais avec un fort taux de remplissage de la base.

De toute façon, il s'avère nécessaire d'augmenter les performances, au prix d'un accroissement de volume. Il serait par ailleurs intéressant de faire une comparaison paramétrique de ce type de système avec les dispositifs d'imagerie sur ombre, évoqués dans [1], ou un ensemble utilisant une lentille acoustique.



ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE
D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

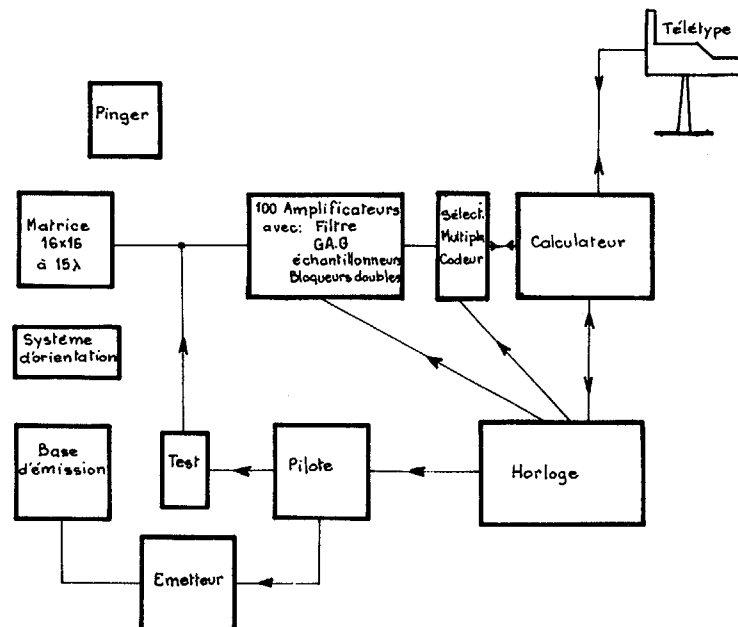
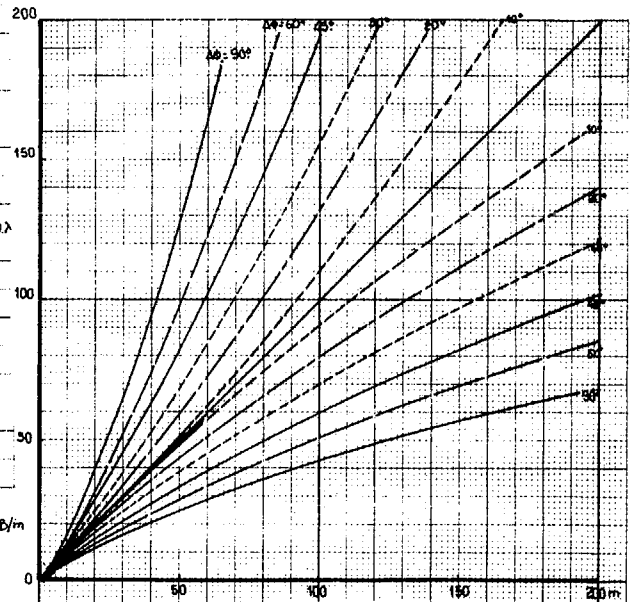
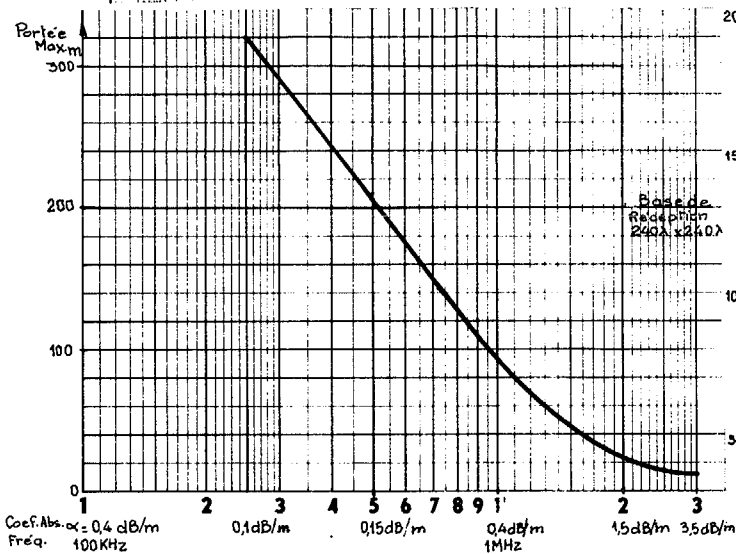
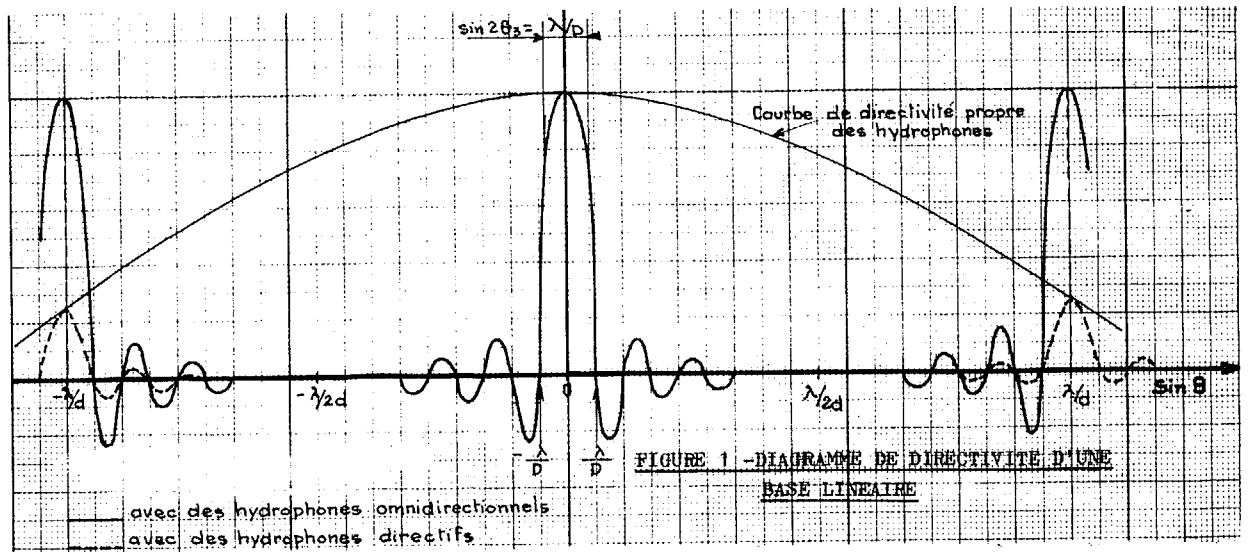


FIGURE 4 - BLOC DIAGRAMME DE LA MAQUETTE PROBATOIRE



ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE
D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

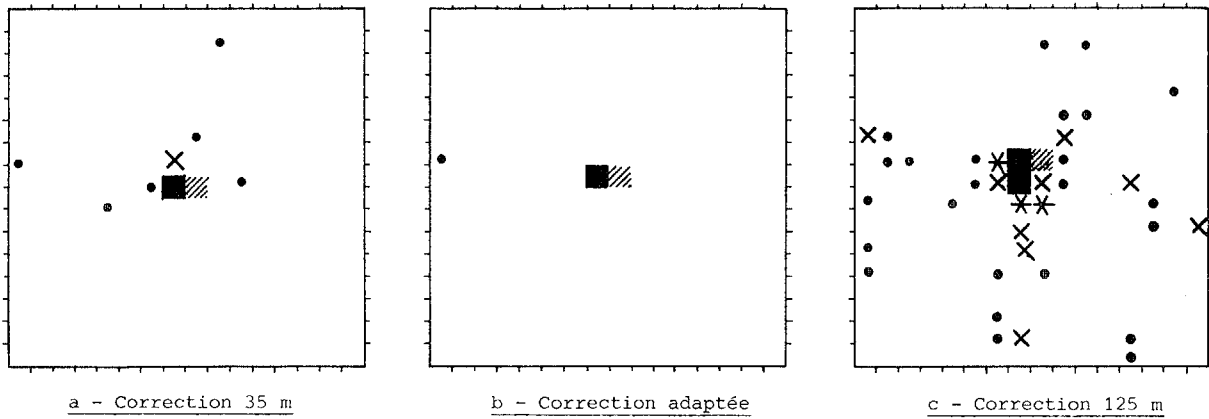


FIGURE 5 : INFLUENCE DE LA CORRECTION DE SPHERICITE
SUR BUT PONCTUEL A 60 METRES

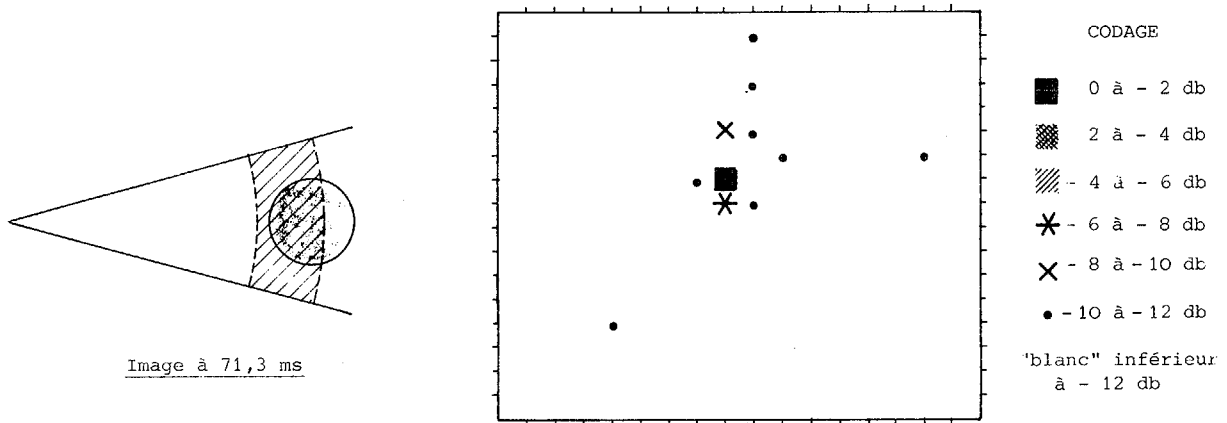


FIGURE 6 - IMAGE DE LA SPHERE DE 1 METRE
DUREE D'EMISSION 1 MS

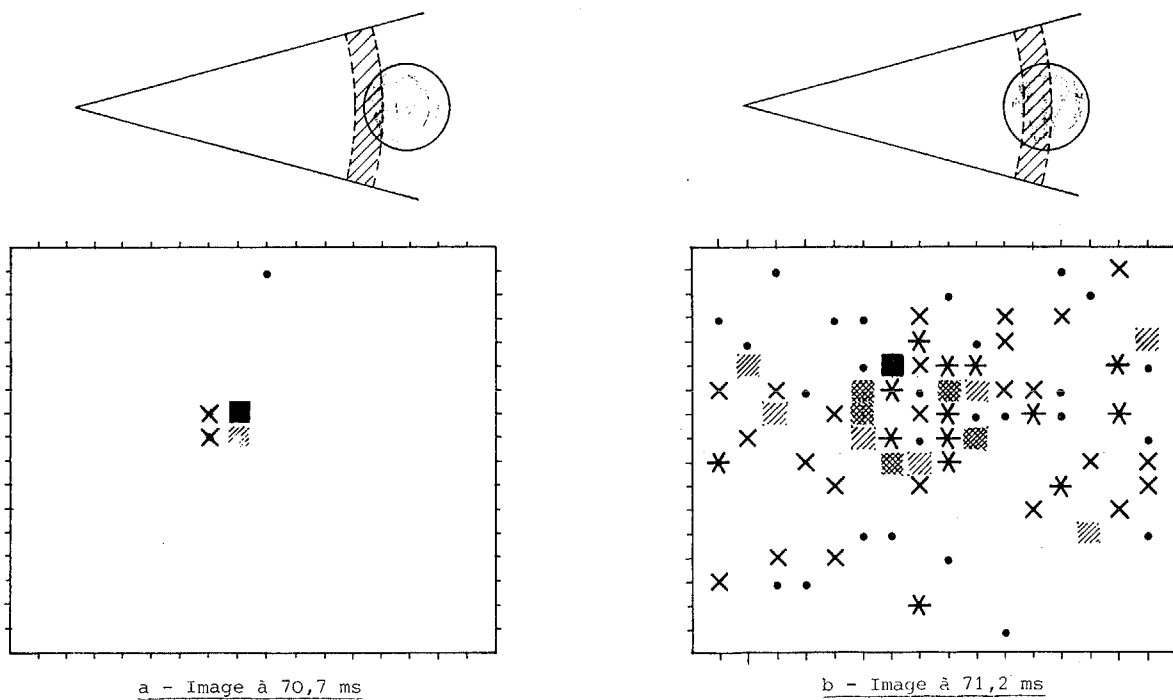


FIGURE 7 - IMAGE D'UNE SPHERE DE 1 METRE A 53,5 METRES ($2d = 71,3$ ms)
DUREE D'EMISSION 0,3 ms

ETUDE ET EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE PROBATOIRE
D'IMAGERIE ACOUSTIQUE

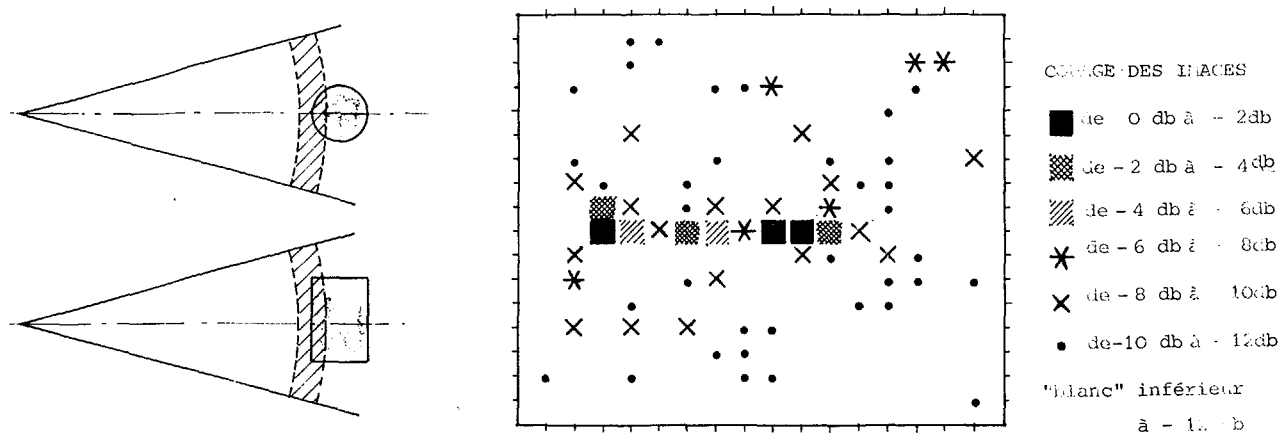


FIGURE 8 - IMAGE D'UN CYLINDRE $\phi = 0,5 - L = 2$ M
VU PAR LE TRAVERS A 63 METRES (Durée d'émission 0,3 ms)

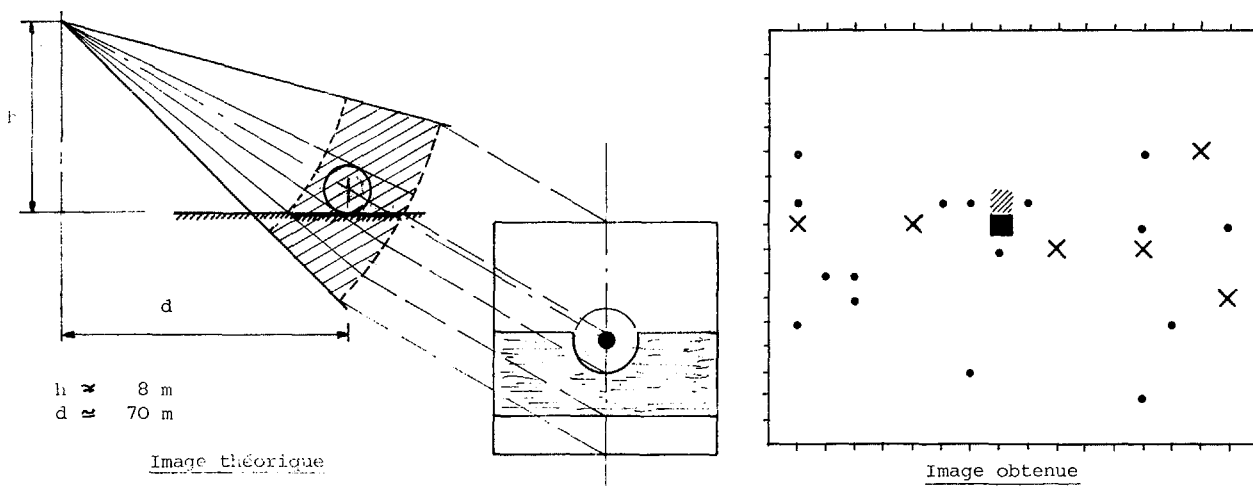


FIGURE 9 - IMAGE D'UNE SPHERE DE 1 M POSEE SUR LE FOND
(Image d'une tranche englobant la sphère - Durée d'émission 10 ms)

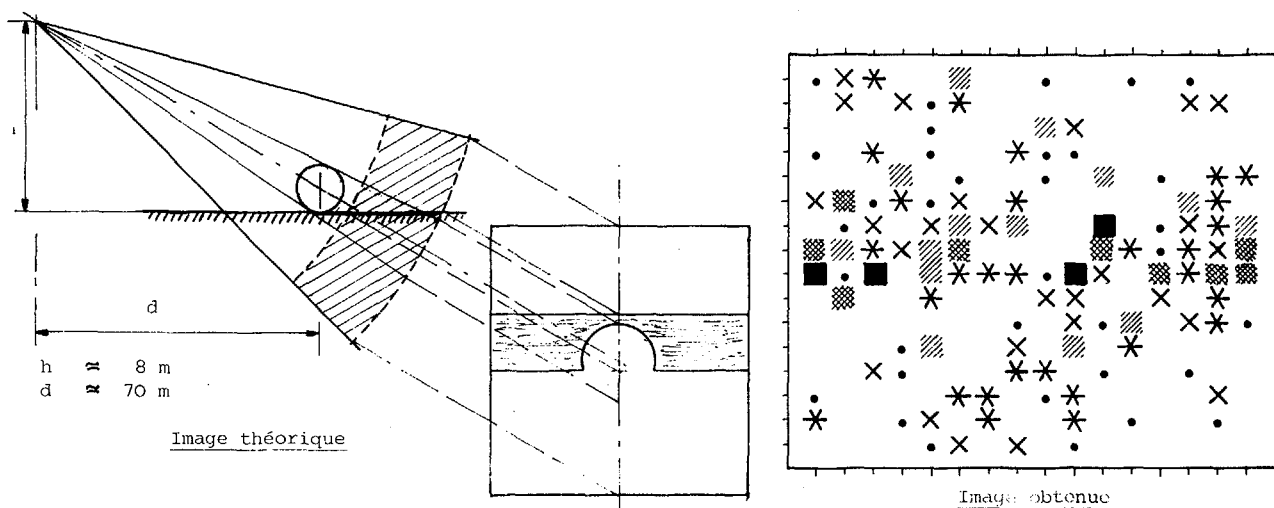


FIGURE 10 - IMAGE D'UNE SPHERE DE 1 M POSEE SUR LE FOND
(Image d'une tranche derrière la sphère - Durée d'émission 10 ms)