

SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

107/1



NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

MESURES DE PERFORMANCES DE DIRECTIVITE DES SONARS
A PARTIR DU CHAMP PROCHE

JM HENNION

CIT/ALCATEL Division Marine 1, Av. Aristide Briand 94110 ARCUEIL

RESUME

SUMMARY

La mesure des performances de directivité des grandes bases sonar effectuée en champ lointain est une opération délicate.

Elle demande un espace d'autant plus grand que les dimensions des bases sont importantes et que les fréquences sont basses.

De plus, il n'est pas possible d'effectuer la mesure sur des bases installées à bord.

Ces raisons conduisent à tenter de mesurer le champ proche et d'en déduire le champ lointain.

L'adaptation de la méthode de W.M LEACH Jr à l'acoustique sous-marine permet d'apporter une réponse à ce problème, et de connaître en plus, la directivité dans l'espace à partir du champ proche.

Les travaux ont été soutenus par la DRET.

Directivity performance measurements on large sonar antennas is a delicate operation when performed in the far field.

It requires more space as the antenna dimensions grow and the frequency goes low.

Besides on board a ship, measurements are not possible.

All these reasons bring us to measure performances in the near field and then deduce from them far field performances.

This was done by adapting to underwater acoustics W.M LEACH Jr. method, originally developed for electromagnetism.

On thus, has a complete far field spatial directivity knowledge from near field measurements.

This work was supported by DRET.



MESURES DE PERFORMANCES DE DIRECTIVITE DES SONARS
A PARTIR DU CHAMP PROCHE

1. OBJECTIF DE LA RECHERCHE

Actuellement, la directivité des bases sonars en émission ou en réception est mesurée à l'aide d'un hydrophone de mesure placé au-delà de la zone de FRESNEL (D^2/λ) où D représente la plus grande dimension de la base testée et λ la longueur d'onde.

Or les dimensions des sonars augmentent pour plusieurs raisons :

- la puissance acoustique nécessaire augmente,
- on effectue de plus en plus souvent un traitement spectral des signaux reçus, ceci afin d'identifier les bruiteurs. Or, les signaux émis par les machines tournantes des bâtiments ont un spectre riche en basses fréquences. Les longueurs d'ondes analysées augmentent donc, ainsi que la dimension des bases. Il faudrait donc utiliser des cuves de mesures de plus en plus grandes ou effectuer les mesures sur un lac. Mais le positionnement de la sonde par rapport à la base est difficile à réaliser.

On voit donc que la mesure en champ proche et le passage en champ lointain par le calcul réduit les difficultés d'expérimentation.

D'autre part, les directivités obtenues par la méthode de champ lointain ne concernent que le site 0° . Les méthodes de calcul à partir du champ proche nous fournissent la directivité dans l'espace.

2. HISTORIQUE DES ETUDES ANTERIEURES

De nombreux travaux ont abordé l'aspect théorique avec parfois des applications.

1961 : Méthode DRL (Defense Research Laboratory) HORTON et INNIS exposent (1) deux calculs possibles de l'intégrale d'HELMOLTZ

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S (p(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P,Q) + G(P,Q) \frac{\partial}{\partial n} p(Q)) ds$$

ou $G(P,Q)$ est la fonction de GREEN solution de l'équation $\Delta G(P,Q) + k^2 G(P,Q) = -4\pi\delta(P,Q)$

qui peut être choisie nulle sur la sphère infinie ou sur la surface entourant la source.

1962 : La première option a donné lieu à une étude ultérieure (2) menée par DD BAKER.

L'intégrale à calculer est de la forme :

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S (p(Q) \frac{\partial}{\partial n} (\frac{e^{ikr}}{r}) - (\frac{e^{ikr}}{r}) \frac{\partial}{\partial n} p(Q)) ds$$

On approxime la dérivée normale du champ de pression à ikr . La validité de cette approximation est discutée dans l'article de BAKER.

La surface de mesure est un cylindre entourant la source. BAKER a obtenu des résultats expérimentaux satisfaisants, mais toutes ses approximations sont difficilement contrôlables.

1964 : Méthode des tableaux d'hydrophones de TROTT. James TROTT propose une méthode de calcul de directivité à l'aide d'un tableau d'hydrophones convenablement pondérés en amplitude et en phase (3).

1973-1974 : L. VAN BUREN, collaborateur de TROTT, formalise la méthode et présente des résultats expérimentaux (4) (5).

On peut calculer la directivité en temps réel, mais le calcul des coefficients reste difficile en dehors des cas présentant des symétries particulières et si l'on se limite à la directivité dans un plan.

1975 : DM KERNS adapte à l'acoustique sous-marine une méthode mise au point pour les antennes électromagnétiques (6).

On décompose le champ acoustique en ondes planes et la directivité de l'antenne est reliée de façon simple aux coefficients de la décomposition.

L'intérêt de cette méthode réside en l'utilisation de l'algorithme FFT et la prise en compte des imperfections de l'hydrophone de mesure.

1972 : Publication d'un article donnant un aperçu de toutes les méthodes de calcul en champ proche dans le domaine électromagnétique (7). La méthode de W.LEACH Jr comporte une décomposition du champ en ondes cylindriques (8).

Cette méthode procède de la même démarche que celle des matrices de diffusion. La surface de mesure est cylindrique.

3. METHODE DE LEACH APPLIQUEE A L'ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

On résout l'équation d'HELMOLTZ en coordonnées cylindriques, puis on décompose le champ en une somme double d'ondes cylindriques.

$$\psi(r, \phi, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} a_n(h) H_n^{(2)}(\lambda r) e^{jn\phi} e^{-jkz} dz \right)$$

$a_n(h)$ = coefficient de la décomposition

$H_n^{(2)}(\lambda r)$ = expression asymptotique des fonctions de HANKEL de deuxième espèce.

Si on fixe $r = r_0$, on peut inverser la formule :

$$a_n(h) H_n^{(2)}(\lambda r_0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} \psi(r_0, \phi, z) e^{-jn\phi} e^{ikz} d\phi dz,$$

ce qui permet de calculer les coefficients $a_n(h)$ à partir du champ mesuré sur un cylindre de rayon r_0 et englobant toutes les sources.

On relie, à l'aide de transformées de FOURIER, les valeurs de la directivité dans tout l'espace aux coefficients de la décomposition. On obtient la directivité :

$$D(\phi, \theta) = 2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^{n+1} e^{jn\phi} a_n(k \cos \theta)$$

$$h = k \cos \theta$$

3.1 - Echantillonnage sur le cylindre de mesure

Le champ proche est mesuré sur un cylindre entourant la base à tester.

Nous échantillonnons ce cylindre en ϕ et en z défini par :

$$(r_0, n\Delta\phi, m\Delta z) \text{ avec } 0 < n < N-1 \quad 0 < m < M-1$$

avec les conditions :

$$\cdot \psi(r_0, \phi, z) = 0 \text{ si } z < 0 \text{ et } z > (M-1) \Delta z$$

$$\cdot \phi \text{ n'ait pas d'harmonique de rang supérieur à } \pi/\Delta\phi \text{ et ait un nombre d'ondes limité à } \pi/\Delta z$$

La première condition n'est pas toujours réalisable théoriquement. Mais, dans la plupart des cas, les antennes ne rayonnent pas trop dans la direction z . En choisissant M assez grand, on peut obtenir une bonne approximation.

La deuxième condition est réalisée si l'on choisit les "périodes" d'échantillonnage calculées par LEACH :

$$\Delta\phi = \pi/N \quad \Delta z = \lambda/2$$

ou N est le plus petit entier supérieur à ka , a étant le rayon du plus petit cylindre englobant la base.

On peut alors, grâce à un algorithme FFT à deux dimensions, calculer les $a_n(h)$ échantillonnés de la forme :

$$a_n(m\Delta h) \text{ avec } -M/2 \leq m \leq M/2 - 1 \text{ et } -N/2 \leq n \leq N/2 - 1$$

où $\Delta h = 2\pi/M\Delta z$

$$\text{Or } h = k \cos \theta$$

$$\text{Si } h = m\Delta h, \text{ on aura } \theta_m = \text{Arc cos } (m\lambda/M\Delta z)$$

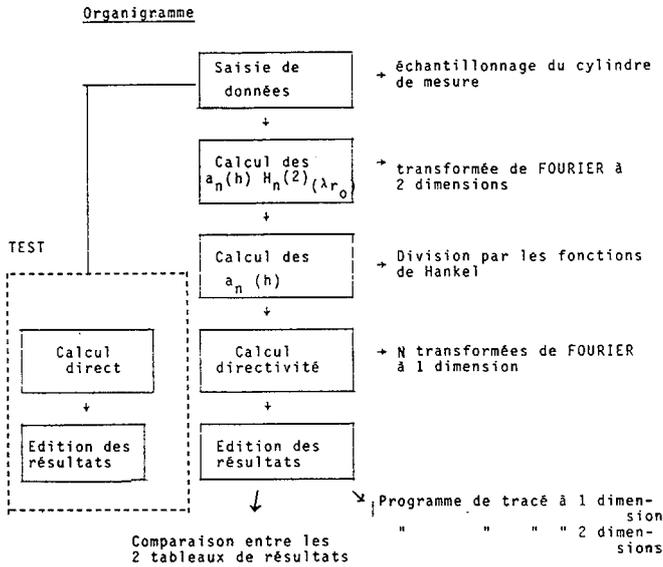
$$\text{Si } \Delta z = \lambda/2 \rightarrow \theta_m = \text{Arc cos } 2m/M \text{ et en site, on a :}$$

$$\theta_S = \pi/2 - \theta_m = \pi/2 - \text{Arc cos } (2m/M)$$

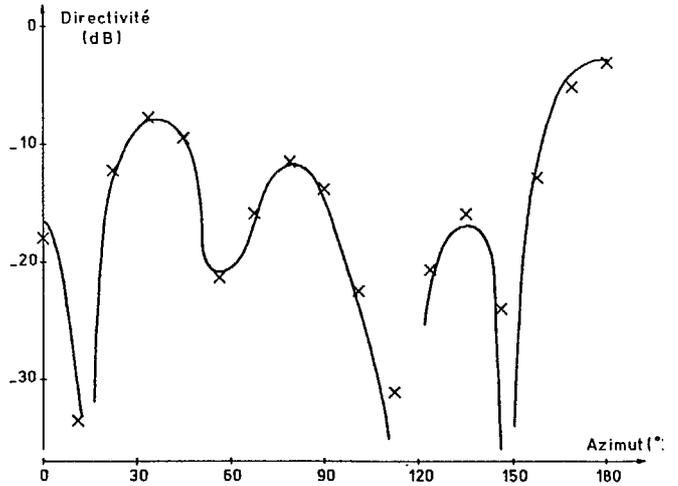


MESURES DE PERFORMANCES DE DIRECTIVITE DES SONARS
A PARTIR DU CHAMP PROCHE

4. PROGRAMME DE CALCUL



θ site = 48,6°



L'écart entre les résultats obtenus par la méthode traditionnelle et ceux calculés par la méthode du champ proche reste inférieur au dB sur les sommets des lobes secondaires dans tous les cas de figure envisagés.

Il faut noter que l'on observe des écarts plus importants pour des sites supérieurs à 60°. Ce phénomène est dû à l'échantillonnage en $\lambda/2$ en z et à la limitation, vers le haut et vers le bas, de la hauteur du cylindre de mesure. (La théorie suppose que la source n'émet pas d'énergie à partir d'un certain site ; or, la base simulée est un anneau qui ne présente pas une directivité très marquée en site et en azimut).

Lors des expérimentations, d'autres erreurs viendront s'ajouter aux erreurs de principe et de calcul :

- mauvais positionnement de la sonde (3 dimensions),
- erreur de mesure sur l'amplitude et la phase,
- quantification des mesures.

5. SIMULATIONS

Nous avons validé les formules utilisées en comparant le champ lointain théorique et celui calculé à partir du champ proche. L'antenne simulée est un anneau de rayon 0,1 m comportant 10 hydrophones régulièrement espacés et omnidirectionnels. La fréquence est de 7500 Hz.

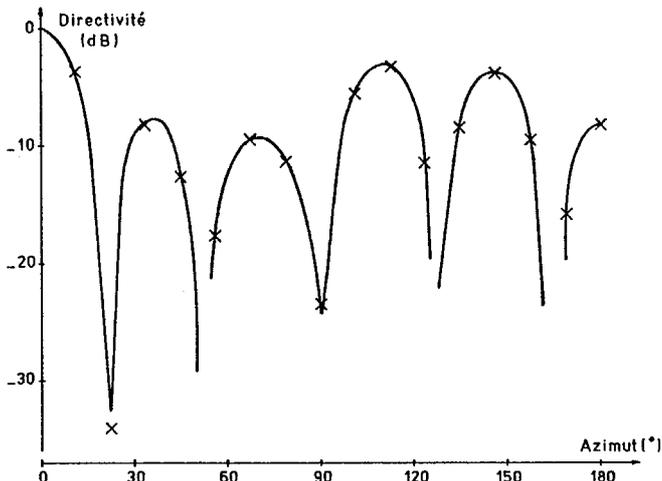
Le cylindre de mesure a un rayon de 0,3 m ; sa hauteur est égale à 1,6 m. Il comporte 32 points de mesure en azimut et 16 points en site. Les points de mesure en site sont espacés de $\lambda/2$.

On forme une onde dans l'azimut 0°, et dans le site 0°
Le centre de symétrie de l'anneau et du cylindre de mesure coïncident.

Les courbes en trait continu représentent les directivités réelles calculées par la méthode classique. Les croix correspondent aux calculs effectués à partir du champ proche. Les résultats sont normés par rapport à la valeur D (azimut 0°, site 0°).

Exemples :

θ site = 0°



6. EXPERIMENTATION

L'objectif fixé est une erreur de 2 dB sur les sommets des lobes secondaires.

6.1 - Relevé du champ lointain (en cuve)

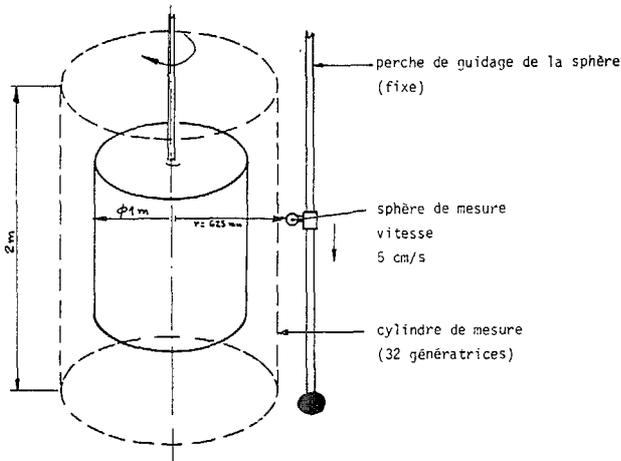
On émet avec la base sinusoïde et on recueille sur une sonde fixe placée au-delà de la zone de FRESNEL (D^2/λ). En faisant tourner la base de 360°, on obtient la directivité en azimut.

6.2 - Relevé en champ proche

Le système de mesure est constitué par une colonne d'acier maintenue verticale par une gueuse de plomb fixée à son extrémité. Le système d'entraînement comprend un moteur pas à pas démultiplié entraînant deux roues dentées placées respectivement à chacune des extrémités de la colonne et reliées par une chaîne. L'hydrophone de mesure (sphère) est omnidirectionnel. Il est fixé à un chariot capable de coulisser sur la colonne. On peut faire déplacer le système de -1 m à +1 m par rapport au centre de symétrie de la base. La distance d, rayon du cylindre de mesure, est la distance mesurée entre l'axe de symétrie de la base et le centre de la sphère. Nous avons fait varier la distance d. La base, de par son poids, reste verticale. La gueuse de plomb fixée à l'extrémité du cylindre d'acier assure la verticalité de l'ensemble de mesure. En faisant tourner la base autour de son axe de symétrie, on peut simuler le cylindre de mesure. Les informations recueillies sur le cylindre de mesure sont envoyées sur un ordinateur.



MESURES DE PERFORMANCES DE DIRECTIVITE DES SONARS
A PARTIR DU CHAMP PROCHE



Le cylindre de mesure est échantillonné sur 32 points en azimut et sur 16 points en site ($\lambda/2$).

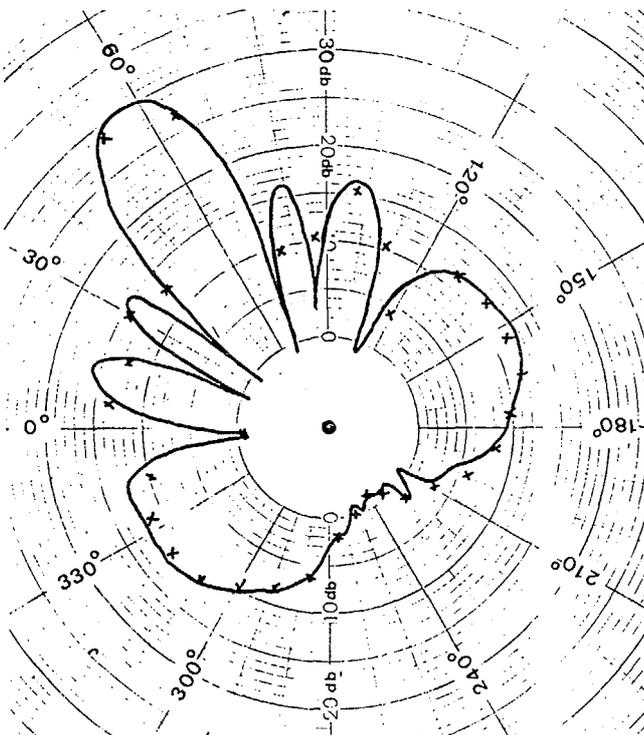
Le système d'acquisition possède une particularité intéressante : on peut choisir la période sur laquelle on effectue la mesure d'amplitude et phase, ce qui permet de se placer après la période transitoire et avant la réverbération.

6.3 - Présentation des résultats

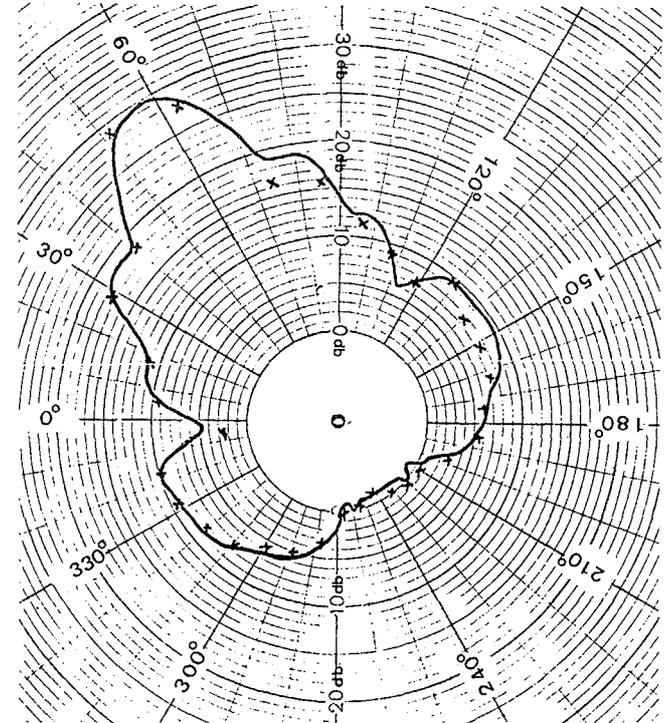
6.3.1 - Comparaison des résultats avec les directivités en champ lointain

Nous avons représenté le champ lointain en trait plein. Les croix correspondent aux résultats de calcul en champ proche.

Premier exemple :
F = 5268 Hz, avec pondération
r = 0,825 m (rayon du cylindre de mesure).



Deuxième exemple :
F = 5268 Hz, sans pondération
r = 0,825 m (rayon du cylindre de mesure).



Les résultats confirment les conclusions des simulations : les écarts restent faibles (inférieurs à 2 dB sur le sommet des lobes secondaires).

6.3.2 - Directivités dans l'espace

Afin de mieux restituer les variations d'atténuation en site, nous avons procédé à une interpolation des résultats du tableau de directivité dans un rapport 3.

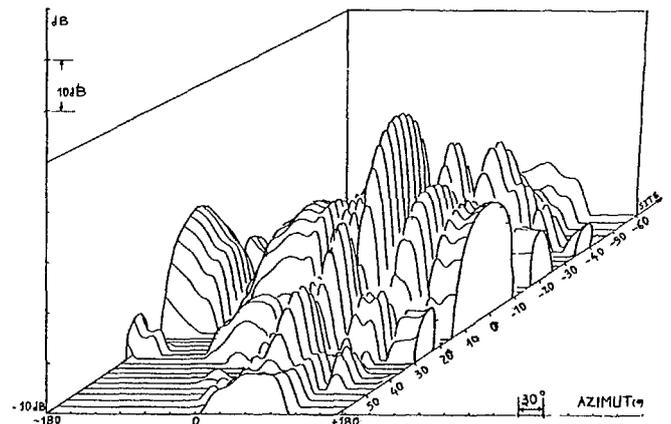
En azimut, le taux d'interpolation est égal à 5. L'ensemble des résultats a été visualisé selon trois modes :

1. graphique à 3 dimensions (amplitude, azimut, site),
2. graphique utilisant une échelle de contraste,
3. courbes de niveau.

Référence : 0 dB = niveau du lobe principal pour le site 0°.

Premier exemple :
F = 5268 Hz
r = 0,625 m (rayon du cylindre de mesure).

Représentation à 3 dimensions :





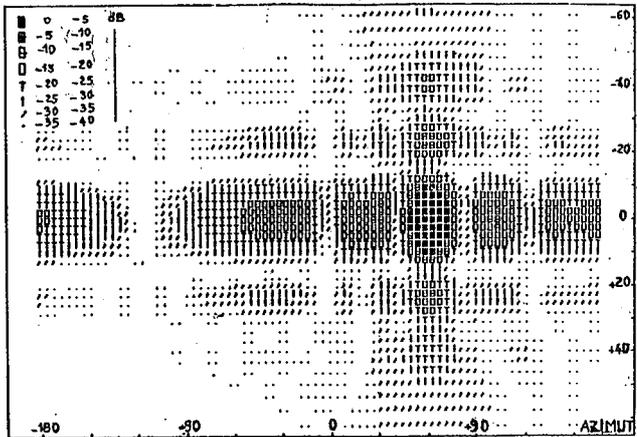
MESURES DE PERFORMANCES DE DIRECTIVITE DES SONARS A PARTIR DU CHAMP PROCHE

Deuxième exemple :

$F = 5268 \text{ Hz}$

$r = 0,625 \text{ m}$

Echelle de contraste :

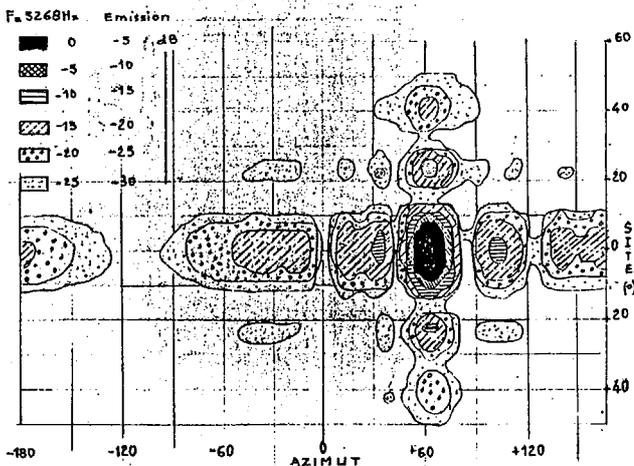


Troisième exemple :

$F = 5268 \text{ Hz}$

$r = 0,625 \text{ m}$

Courbes de niveau :



6.3.3 - Détermination du nombre de points nécessaires

6.3.3.1 - Azimut

La reconstitution des diagrammes de directivité en azimut ne peut s'effectuer à l'aide des fonctions d'interpolations polynomiales usuelles (par exemple la fonction spline cubique naturelle). Il n'est pas nécessaire de porter à 64 points la quantité d'informations nécessaires en azimut. Il suffit de trouver une fonction qui s'adapte bien à notre problème (périodique, de la forme $(\sin nx)/\sin x$ par exemple). On remarquera cependant que l'échantillonnage et la fonction d'interpolation choisis lors de notre expérimentation nous ont permis de déterminer la largeur du lobe principal et le niveau approximatif des lobes secondaires ; cependant, la reconstitution de la courbe par interpolation ne nous a pas permis de déterminer exactement l'allure du lobe principal et de celui des lobes secondaires, l'existence des "zéros" de transmission, le positionnement angulaire des lobes secondaires, etc.

Le nombre de points d'échantillonnage est essentiellement lié à la largeur du lobe principal.

6.3.3.2 - Site

Le problème posé par le choix du nombre de points en site reste fondamentalement différent. En effet, lors du dépouillement, nous avons remarqué que la majeure partie de l'énergie était rayonnée entre -30 et $+30^\circ$ site. Nous avons réduit petit à petit la fenêtre d'échantillonnage en gardant la symétrie par rapport au site 0° .

Nous pouvons remarquer, que dans ce cas, en ne conservant que la moitié des points en site, le diagramme ne subit pas de modifications profondes.

Au-delà de ces chiffres, des lobes parasites apparaissent pour des valeurs de site supérieures à 40° et le niveau des lobes secondaires site augmente sensiblement (au voisinage de $\pm 25^\circ$ et $\pm 45^\circ$).

Nous pouvons dire que la quantité d'informations nécessaires à l'élaboration d'un diagramme de directivité dans l'espace peut être réduite considérablement en fonction du type d'antenne et des renseignements que l'on désire obtenir de la mesure.

L'objectif fixé était de deux fois le nombre d'éléments de la base, soit 384 points.

Le nombre de points nécessaires peut être ramené à $32 \times 8 = 256$ points, sans altérer, dans ce dernier cas, le niveau maximum des lobes secondaires et la largeur du lobe principal.

NB. La diminution du nombre de points (site) ne concerne que l'acquisition des données. Les calculs s'effectuent avec le nombre de points initial (32×16). Les valeurs du tableau que nous n'aurons pas mesurées seront nulles.

7. APPLICATIONS

7.1 - Matériel

On peut envisager deux types d'appareillage :

a) La première application concerne la mesure en cuve de la directivité de n'importe quelle base.

On peut, en effet, se contenter d'une cuve de petite dimension.

Il sera possible de mesurer la directivité d'une base sans se soucier de la distance de FRESNEL. Lorsqu'on effectue la mesure traditionnelle de la directivité en champ lointain, il est quelquefois difficile de trouver une zone stable entre la période transitoire du signal émis et la réverbération. L'amplitude du signal reçu fluctue.

En champ proche, le problème de mesure d'amplitude et de phase est simplifié par hypothèse, car on reçoit le signal très tôt après l'émission puisqu'on se place à faible distance de la source.

On dispose donc d'un signal stable sur une grande plage : on peut choisir aisément la période dont on mesurera l'amplitude et la phase.

Le système de saisie sera étudié de telle sorte qu'il puisse s'adapter à n'importe quelle base. Il pourra effectuer l'échantillonnage du champ acoustique très rapidement : on utilisera deux moteurs afin d'automatiser et d'accélérer la procédure d'acquisition et d'obtenir une précision acceptable du positionnement angulaire de la base. On pourra saisir les informations à la fois pendant la descente et pendant la remontée de l'hydrophone de mesure, ou bien acquérir simultanément toutes les informations d'une génératrice (M hydrophones de mesure).

b) Appareillage adapté aux bâtiments de surface et aux sous-marins.

La deuxième application du calcul de directivité à partir du champ proche concerne les bases installées sur des bâtiments.



MESURES DE PERFORMANCES DE DIRECTIVITE DES SONARS
A PARTIR DU CHAMP PROCHE

On peut envisager :

1) un équipement de mesure placé à l'extérieur du dôme et fixé au bâtiment afin d'effectuer une mesure en bassin qui permettra d'évaluer les modifications apportées au diagramme de directivité imputables à l'adjonction du dôme, du liquide de remplissage et à l'environnement du bâtiment. Il sera intéressant de connaître l'influence de la puissance du sonar sur sa directivité.

2) un équipement de mesure opérationnel situé à l'intérieur du dôme et permettant de connaître la directivité de la base en permanence, afin de détecter une détérioration des performances de l'antenne dans le temps.

Le système devra être miniaturisé au maximum afin de pouvoir s'insérer entre la base et le dôme. D'autre part, on sera obligé de remplacer l'hydrophone de mesure unique par un anneau ou portion d'anneau pouvant coulisser autour de la base. L'acquisition et le calcul seront effectués en temps réel. Les hydrophones de mesure ne diffracteront pas l'onde émise ou reçue, en dehors de la période de saisies de données.

7.2 - Outil de calcul

Traceurs de champ sonore.

La connaissance de la directivité site permettra aux utilisateurs d'équipements pouvant tracer les parcours des ondes acoustiques dans l'eau en fonction de la célérité, d'effectuer des pondérations en fonction des sites éclairés.

On pourra ainsi remplacer les notions de zones d'ombre et zones éclairées par des considérations plus précises.

7.3 - Reconstitution du champ lointain

La précision du champ lointain obtenue a permis de valider la notion d'échantillonnage.

8. CONCLUSION

L'étude nous a permis d'appliquer une nouvelle méthode de mesure de la directivité des antennes. On peut dès maintenant connaître sa valeur dans l'espace, à partir des mesures effectuées dans la zone de FRESNEL, sur un cylindre échantillonné entourant la base. Les hypothèses de la théorie de W. LEACH appliquées à l'acoustique sous-marine ont été vérifiées par la coïncidence entre les simulations, les mesures traditionnelles en champ lointain, et les résultats obtenus à partir du champ proche.

Les applications de cette méthode sont multiples. Il convient cependant de trouver une fonction (ou des fonctions) d'interpolation permettant de reconstituer finement les diagrammes.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) The computation of far field radiation patterns from measurements made near the source by HORTON & INNIS
JASA, (1961), vol.33, p.877.
- (2) Determination of far field characteristics of large underwater sound transducer from near field measurements by BAKER
JASA, (1962), vol.34, p.1737.
- (3) Underwater sound transducer calibration from near field data by James TROTT
JASA, (1964), vol.36, p.1557.
- (4) Theoretical design of near field calibration arrays by A.L. VAN BUREN
JASA, (1973), vol.53, p.192.
- (5) Cylindrical near field calibration array by A.L. VAN BUREN
JASA, (1974), vol.56, p.849.
- (6) Scattering matrix description and near field measurements of electro-acoustic transducer by D.M. KERNS
JASA, (1975), vol.57, p.497.
- (7) Determination of far field antenna patterns from near field measurements by R.C. JOHNSON, H.A. ECKER and J.S. HOLLS
Proceedings of the IEEE, (1973), vol.61, n°12.
- (8) Probe compensated near field measurements on a cylinder by W.M. LEACH Jr. Ph. D dissertation, Georgia Institute of Technology (1972).