

# Imagerie en temps réel

## par traitement d'antenne hybride <sup>(1)</sup>

Real time imaging by antenna and hybrid device



### Georges SALVINI

ENSPM, U3, Saint-Jérôme, 13397 MARSEILLE CEDEX 13.

Docteur d'État. Maître de conférence à l'ENSPM. Chargé du cours de Fonctions Électroniques. Thèmes de recherches : 1. Traitement du signal en temps réel par méthodes hybrides; application à l'imagerie acoustique par formation de voies; réalisation du prototype de sonar SPATH en collaboration avec le LMA et l'IFREMER. 2. Techniques de transmission et de réception de signaux magnétiques dans les bandes ELF et ULF.



### Albert CALAORA

CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31, chemin Joseph-Aiguier, 13402 MARSEILLE CEDEX 9.

Ingénieur CNRS. Équipe « Ultrasons ». Principaux thèmes d'Études : Imagerie et Holographie Acoustiques. Études des Antennes Acoustiques et des Formations de Voies.



### Claude GAZANHES

CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31, chemin Joseph-Aiguier, 13402 MARSEILLE CEDEX 9.

Directeur de Recherche responsable de l'Équipe de Recherche « Ultrasons ». Principaux thèmes de Recherches, Imagerie et Tomographie Acoustique, Propagation en milieux dispersifs : milieux diphasiques et matériaux composites, Simulation de problèmes d'acoustique sous-marine : Propagation modale par petits fonds marins.

## RÉSUMÉ

On propose de localiser des sources acoustiques et d'en former une image par une méthode de traitement hybride opérant en temps réel. A partir des signaux d'une antenne réseau linéaire on réalise un filtre spatial de type transversal associant des fonctions électroniques analogiques et numériques : la partie analogique assure la rapidité et la partie numérique la précision du pointage ou de la focalisation.

### MOTS CLÉS

Acoustique, antenne, hybride, imagerie, sonar, temps réel, ultrasons.

## SUMMARY

*We propose, for localisation of acoustical sources and imaging, an hybrid proceeding working in real time. From array antenna signals we make a spatial transversal filter with analog and digital electronic devices: speed is assumed by the analog part and accuracy of angular pointing or focalisation by the digital part.*

### KEY WORDS

*Acoustic, antenna, hybrid, imaging, sonar, real time, ultrasounds.*

<sup>(1)</sup> Texte présenté aux 7<sup>es</sup> Journées d'Études Sur la Propagation Acoustique, École Centrale de Lyon, 3-6 juin 1986.

### 1. Configuration pour la formation d'images avec les antennes-réseaux

Cette configuration, établie sur des considérations dérivant du principe de Huygens-Fresnel, est théoriquement décrite par le calcul de l'amplitude complexe d'une image  $V'(X_M, Y_M, Z_M)$  d'une distribution de sources ponctuelles  $V_s(X_s, Y_s, Z_s)$  en ondes sphériques ou  $V(\alpha, \beta)$  en ondes planes :

Image en ondes sphériques (OS)

$$V'(Y_M, Z_M) = \sum_n \sum_s \underbrace{V_s e^{j\phi_s}}_{\text{sources}} \underbrace{\frac{e^{-j\phi_{ns}}}{j\lambda r_{ns}}}_{\text{propagation}} \underbrace{A_n e^{j\psi_n}}_{\text{traitement linéaire}} \underbrace{f(\theta_{ns})}_{\text{capteurs}}$$

Avec :

$$r_{ns} = [X_s^2 + (Y_s - Y_n)^2 + Z_s^2]^{1/2},$$

$$\phi_{ns} = K r_{ns}, \quad K = 2\pi/\lambda$$

$$r_{Mn} = [X_M^2 + (Y_M - Y_n)^2 + Z_M^2]^{1/2},$$

$$\psi_n = K r_{Mn}$$

(voir fig. 1).

$n$ , numéro du capteur;  $\lambda$ , longueur d'onde;  $s$ , numéro de la source;  $A_n$ , fenêtre d'apodisation;  $\alpha, \beta$ , cosinus directeurs de la direction de la source.

Image en ondes planes (OP)

$$V'(\beta_M) = \frac{1}{j\lambda} \sum_n \sum_s \underbrace{V_s e^{j\phi_s}}_{\text{sources}} \underbrace{e^{-jKY_n\beta_s}}_{\text{propagation}} \underbrace{A_n e^{jKY_n\beta_M}}_{\text{traitement}} \underbrace{f(\theta_{ns})}_{\text{capteurs}}$$

où :

$$\begin{cases} \phi_n = K \beta_s Y_n = 2\frac{\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \theta_Y \\ \psi_n = K \beta_M Y_n = 2\frac{\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \theta_{Y_M} \end{cases}$$

$\theta_{Y_M}$ , définit le « pointage » ou la « voie »;  $\theta_Y$ , angle de la direction de la source avec le plan normal à l'antenne;  $d$ , distance entre capteurs.

Les réponses spatiales ou diagrammes de directivité, sont données par :

OS 
$$g = \frac{1}{j\lambda} \sum_n \frac{A_n}{r_{ns}} e^{-j(\phi_n - \psi_n)} f(\theta_{ns})$$

OP 
$$g = \frac{1}{j\lambda} \sum_n A_n e^{-j(\phi_n - \psi_n)} f(\theta_s)$$

Pour la réalisation physique des réponses et images, diverses techniques ont été proposées [1 à 5]. Le LMA du CNRS a étudié un procédé hybride [6], dont on expose le principe ci-dessous.

### 2. Principe du traitement hybride

L'expression générale d'une image étant :

$$V'_M = \sum_n \sum_s V_s e^{j\phi_s} \frac{A_n}{j\lambda r_{ns}} e^{-j(\phi_n - \psi_n)} f(\theta_{ns})$$

les sommes sont maximales lorsque  $\phi_n = \psi_n$ , c'est-à-dire lorsqu'on additionne des termes de phases égales. Les déphasages des signaux d'antennes sont « compensés » par lignes à retards ou déphaseurs

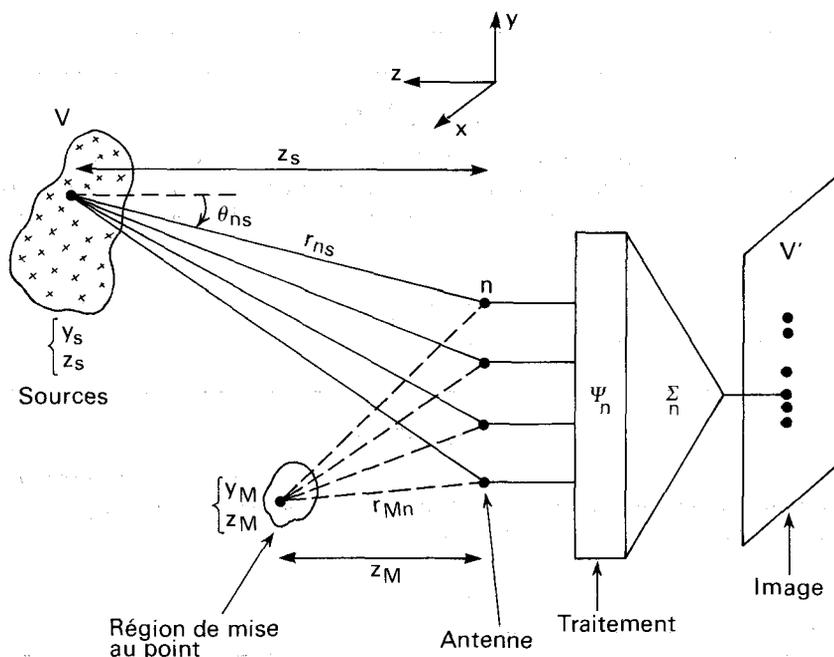


Fig. 1

purs. Le phénomène d'hétérodynage d'un signal  $v_n$  issu d'un capteur de l'antenne par celui d'un générateur auxiliaire  $v_0$  donne :

$$v_n = V_n \sin(\omega t - \varphi_n + \varphi_s)$$

$$v_0 = V_0 \sin(\omega' t - \psi_n)$$

$$v_{1n} = \frac{1}{2} V_n V_0 [\cos((\omega - \omega') t - \varphi_n + \psi_n + \varphi_s) - \cos((\omega + \omega') t - \varphi_n - \psi_n + \varphi_s)].$$

Le filtrage passe-bande élimine l'un des termes :

$$v_{2n} = \frac{1}{2} V_n V_0 \cos[(\omega - \omega') t - \varphi_n + \psi_n + \varphi_s]$$

(voir fig. 2).

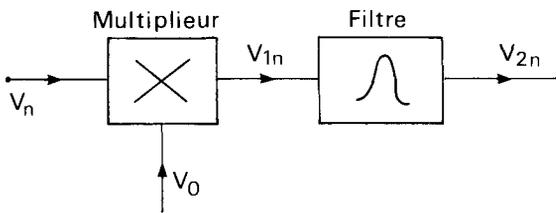


Fig. 2

On règle  $\psi_n$  pour que :  $-\varphi_n + \psi_n = 0$  ou Cte.

La somme porte alors sur des termes de phases identiques.

La disposition pratique est donnée figure 3.

Un seul filtre passe-bande est nécessaire en raison de la linéarité de la sommation.

On obtient par exemple en ondes sphériques :

$$v = \sum_n \frac{V_s}{\lambda r_{ns}} A_n \sin[(\omega - \omega') t - \varphi_n + \psi_n + \varphi_s]$$

expression identique à la réponse spatiale exigée pour la formation de l'image.

En raisonnant sur un système continu, on peut identifier l'opération effectuée à une corrélation :

$$\varphi = \varphi(Y - Y_s, Z_s), \quad \psi = \psi(Y - Y_M, Z_M)$$

où  $Y$ , coordonnées des capteurs le long de l'antenne ;  $Y_s, Z_s$  coordonnées des sources ;  $Y_M, Z_M$  coordonnées des réglages de focalisation en OS.

Le signal en un point  $Y$  de l'antenne est :

$$V(X, Y, Z) = A_Y V(Y, Y_s, Z_s) \times \sin(\omega t - \varphi(Y - Y_s, Z_s) + \varphi_s)$$

où  $A_Y$  est l'apodisation.

Le produit par le signal auxiliaire donne :

$$V_0(Y, Y_M, Z_M) = V_0(Y - Y_M, Z_M) = V_0 \sin(\omega' t - \psi(Y - Y_M, Z_M))$$

soit :

$$V_1 = \int V(Y, Y_s, Z_s) \cdot V_0(Y - Y_M, Z_M) dY$$

où  $Y_s, Z_s, Z_M$  sont des paramètres,  $Y_M$  est le retard de translation.

Pour une source  $(Y_s, Z_s)$ , on effectue la corrélation du signal  $V(Y, Y_s, Z_s)$  avec le signal auxiliaire  $V_0(Y, Y_M, Z_M)$ . Le filtre se comporte comme un corrélateur vis-à-vis des variables spatiales.

### 3. Réalisation du traitement hybride

3.1. L'ensemble des  $N$  signaux  $\psi_n$  est fourni par un registre à décalage numérique, entrée série, sorties parallèles (fig. 4). Si  $F_\varphi$  est la fréquence de l'horloge de décalage, le retard élémentaire entre deux prises est :  $\delta_e = 1/F_\varphi$ . Le signal auxiliaire est appliqué à l'entrée de chargement. Sa fréquence est  $F'$ , la pulsation du fondamental  $\omega'$ . Le déphasage élémentaire entre deux prises adjacentes est donc :

$$\psi_e = \omega' \delta_e = 2\pi F'/F_\varphi.$$

Si l'on saute  $m$  prises :

$$\psi = m \psi_e.$$

3.2. Les multiplieurs sont des portes analogiques commandées par les sorties du registre. Elles effectuent le produit du signal d'antenne  $F$  par l'auxiliaire  $F'$ , dit « signal de commutation » contenant  $H$  harmoniques. On obtient, dans le produit, les signaux  $HF' \pm F$  ou  $F \pm HF'$ . Le filtre passe-bande isole le terme  $F' - F$  ou  $F - F'$ .

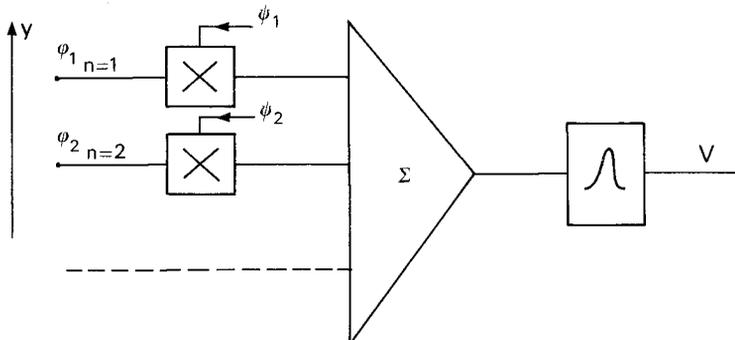


Fig. 3

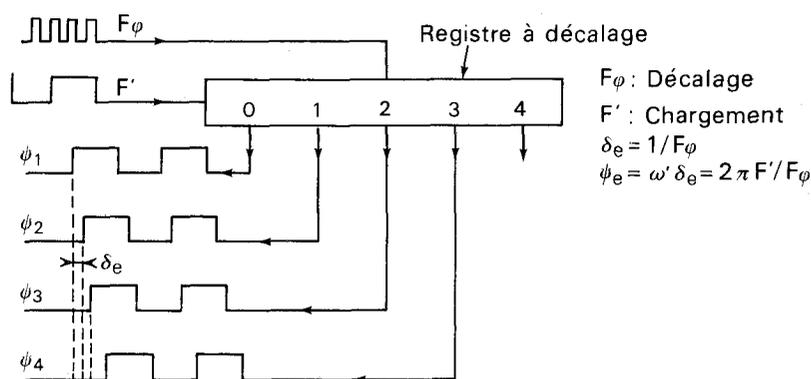


Fig. 4

3.3. Sommateurs et filtres sont réalisés selon les techniques conventionnelles de l'électronique analogique.

#### 4. Calcul du pointage et de la focalisation pour une antenne linéaire

##### 4.1. EN ONDES PLANES

$$\psi_n = 2 \frac{\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \theta_M$$

$$\varphi_n = 2 \frac{\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \theta$$

$$\begin{aligned} \varphi_n = \psi_n &= 2 \frac{\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \theta_M \\ &= (n-1) m \psi_e = (n-1) m 2 \pi F' / F_\phi \end{aligned}$$

d'où le pointage :

$$\theta_M = \text{Arc sin} \frac{c}{d} \frac{F'}{F} \frac{m}{F_\phi} \quad (H=1).$$

$m$  est le « pas » des prises;  $c$  est la vitesse de propagation;  $d$  est la distance entre capteurs.

##### 4.2. EN ONDES SPHÉRIQUES

$$\psi_n = K (r_{Mn} - Z_M) = m \psi_e = m 2 \pi F' / F_\phi$$

qui donne le nombre de prises  $m$  relatives au capteur  $n$  :

$$r_n = \frac{F F_\phi}{F'} \cdot \frac{r_{Mn} - Z_M}{c}$$

$$r_{Mn} = [(Y_n - Y_M)^2 + Z_M^2]^{1/2}.$$

La focalisation est réalisée dans la zone repérée par  $(Y_M, Z_M)$ . On peut calculer que :

$$Z_M = A \cdot F_\phi - \frac{B}{F_\phi}$$

avec :

$$A = \frac{(Y_M - Y_n)^2 \cdot F}{2 c m F'}, \quad B = \frac{c m F'}{2 F}.$$

Le pointage et la focalisation sont commandés par la fréquence de décalage du registre  $F_\phi$ .

Les figures 5 et 6 montrent de manière schématique la répartition des prises pour les adaptations en ondes planes et sphériques.

##### 4.3. INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE DE LA SOURCE

On l'étudie sur l'expression de la réponse spatiale  $g$  en ondes sphériques :

$$g = \sum_n \frac{A_n}{\lambda r_n} e^{-j(\varphi_n - \psi_n)} \quad (f(\theta_n) = 1)$$

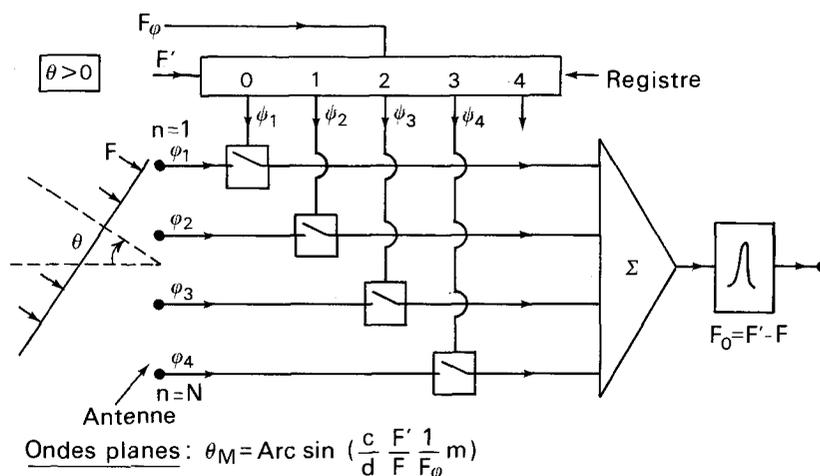


Fig. 5

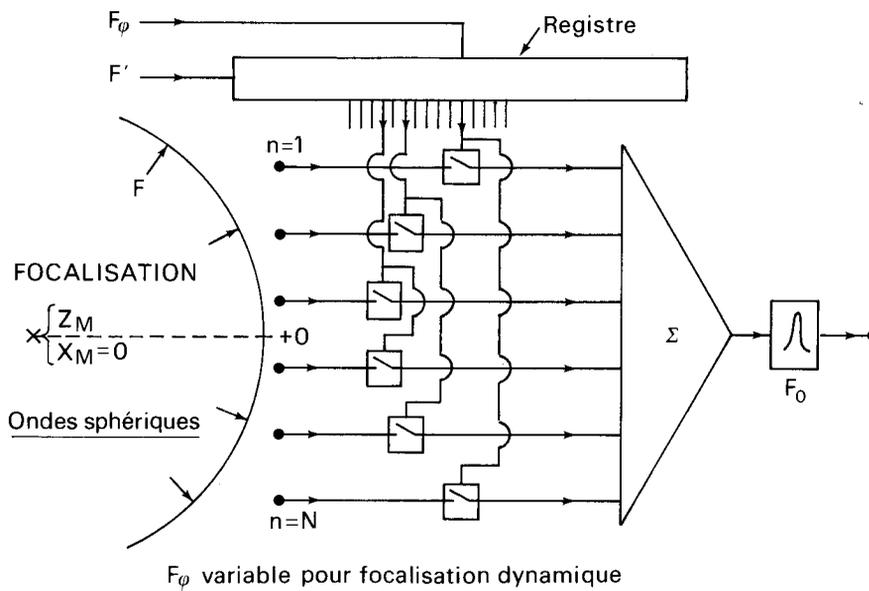


Fig. 6

avec :

$$\varphi_n = \omega \tau_n = 2 \pi F \frac{r_n}{c}$$

$$\varphi_n = m \psi_n = m 2 \pi F' / F_\phi = K r_{Mn} = 2 \pi F_M r_{Mn} / c$$

soit :

$$\varphi_n - \psi_n = 2 \frac{\pi}{c} (F \cdot r_n - F_M r_{Mn})$$

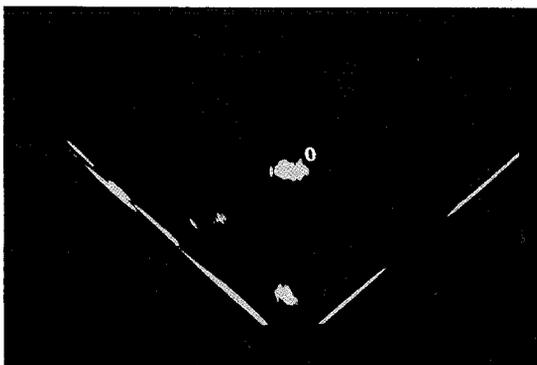
et en ondes planes :

$$g = \sum_n \frac{A_n}{\lambda} e^{-j(\varphi_n - \psi_n)}$$

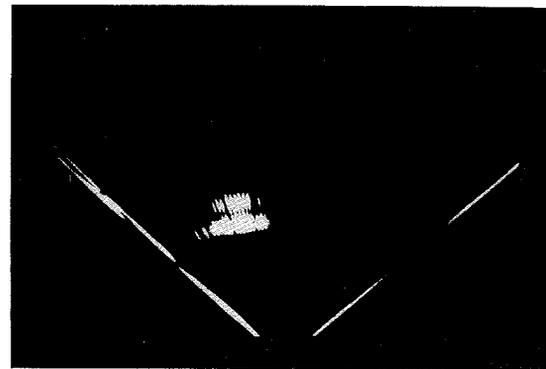
$$\varphi_n - \psi_n = 2 \pi (n-1) \frac{d}{c} (F \cdot \sin \theta - F_M \cdot \sin \theta_M)$$

### 5. Résultats obtenus avec un prototype de sonar

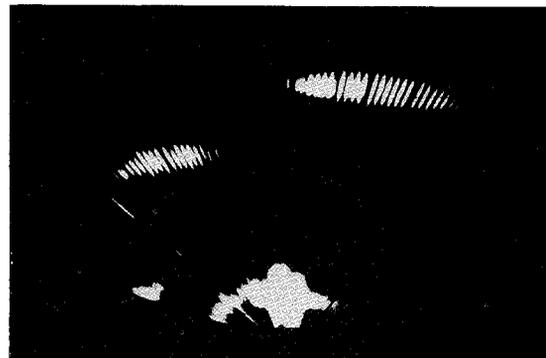
Réalisé au LMA-CNRS, un prototype équipé d'une antenne linéaire de 10 capteurs fonctionnant à



(a) Écho d'une tige inox, diamètre 4 mm à 50 cm.



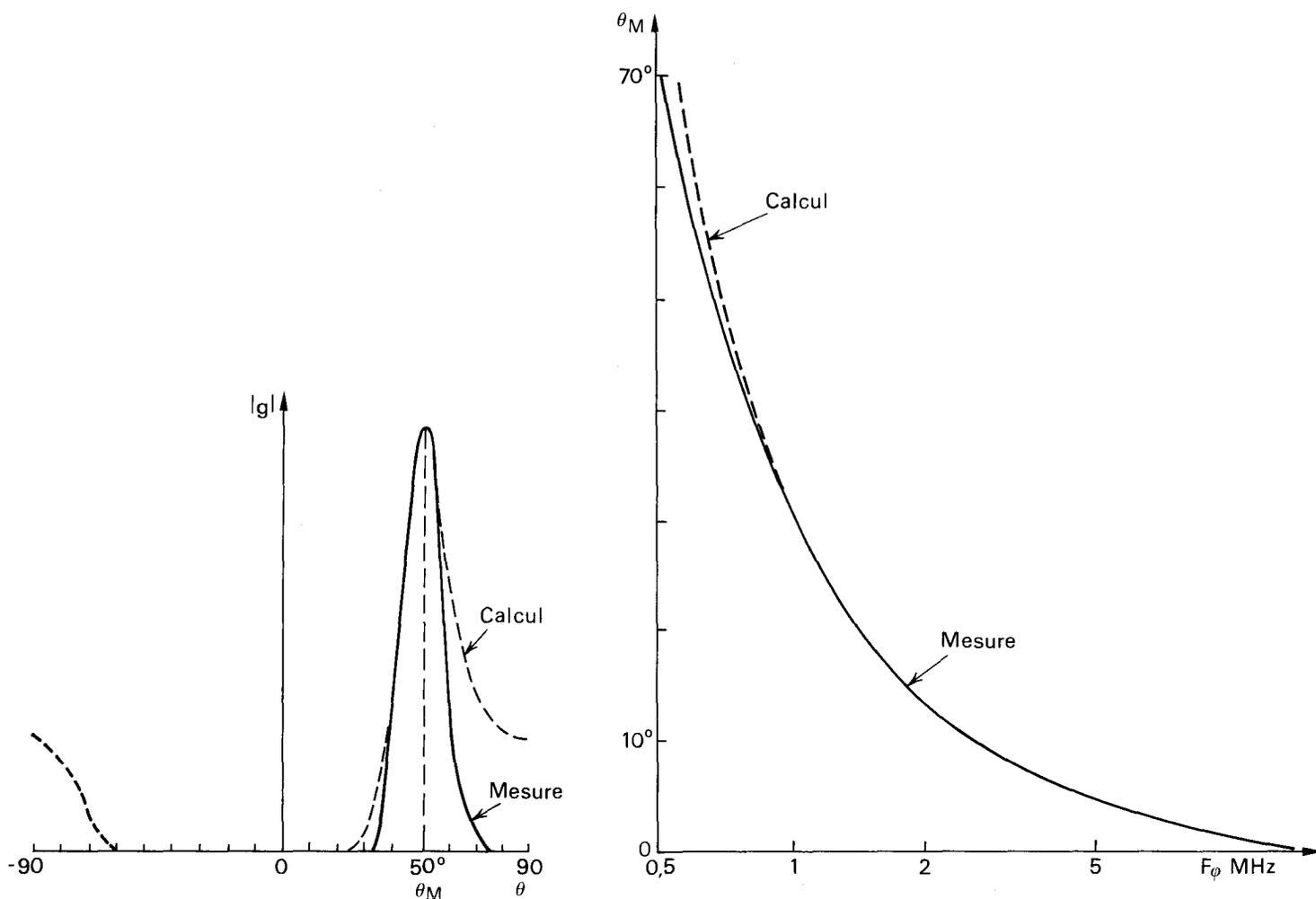
(b) Échos de deux tiges inox, diamètre 4 mm.



(c) Échos de barres dural de 15 mm à 75 et 115 cm.

Fig. 7. — Images obtenues avec une antenne linéaire à 10 capteurs par traitement hybride, exploration séquentielle sur 120 voies,  $F = 83$  kHz. Prototype de sonar expérimenté en cuve. Durée d'une émission : 100  $\mu$ s. L'impulsion d'émission est du type « train d'onde sinusoïdale ». Les capteurs de l'antenne sont espacés de  $\lambda/2$ .

$F = 83$  kHz, a donné des images de cibles en cuve par balayage polaire (panoramique) visibles sur les figures 7. L'exploration séquentielle, commandée par  $F'$ , est effectuée sur 120 voies, se formant chacune en 100  $\mu$ s.



(a) Diagramme à l'infini.

(b) Angle de pointage

$$\theta_M = \text{Arcsin} \left( \frac{c F' m}{d F F_\phi} \right)$$

Fig. 8

La précision du pointage en ondes planes a été vérifiée expérimentalement (fig. 8).

Le dispositif fonctionne également en écoute passive. Si le procédé n'apporte actuellement que peu de chose en résolution, il semble intéressant sur les plans de la rapidité de formation d'image et d'économie de réalisation.

Manuscrit reçu le 21 novembre 1986.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] G. S. KINO, Acoustic imaging for non destructive evaluation, *Proc. IEEE*, 67, n° 4, avril 1979, p. 510-525.

[2] D. A. GAUBATZ, Fast beamforming processor, *Acoustical Holography*, 7, p. 495-507.  
 [3] L. C. GRANGER, An experimental beamforming sonar, *Acoust. Holog.*, 7, p. 447-459.  
 [4] P. ALAIS et M. FINK, Fresnel zone focusing of linear arrays, *Acoust. Hol.*, 7.  
 [5] G. M. VOGLIS, Design features of advanced scanning sonars, *Ultrasonics*, Jan. 1972; A general treatment of modulation scanning as applied to acoustic to linear arrays, *Ultrasonics*, July 1972.  
 [6] G. SALVINI, A. CALAORA et C. GAZANHES, Traitement d'antenne hybride, *GRETSI*, 1091-1983, 1985.