

# HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

987



NICE du 1<sup>er</sup> au 5 JUIN 1981

---

EXPERIMENTATION D'UNE ANTENNE A FORMATION DE FAISCEAUX PAR LE CALCUL

H. DEVRED - J. ROGER

THOMSON CSF - DRS rue des Mathurins 92223 BAGNEUX

---

## RESUME

Les récents développements de la technologie hyperfréquence et des processeurs rapides rendent possible la réalisation d'une antenne à formation de faisceaux par le calcul numérique dans un avenir proche.

La technique FFC apporte des solutions nouvelles aux problèmes posés par les contraintes de la défense anti aérienne moderne : antibrouillage, adaptativité à l'environnement extérieur, souplesse dans l'utilisation des faisceaux.

L'étude que nous poursuivons sur la FFC tend à développer cette technique dans le domaine du radar.

Une maquette expérimentale de 16 modules illustre les possibilités de la FFC.

## SUMMARY

The last developments of the techniques in both electronic and microwave components, and their expected applications in the radar domain, will make possible the realization of a digital beam forming antenna in the next future.

There are a lot of advantages we may expect from the use of that kind of antenna, and they perfectly meet the needs and requirements of radar systems for the future : enhancement of the protection from jammers, adaptivity to the environment, beam shaping..

The research we have developed about digital beam forming, aimed at estimating the performances of such equipments as also the required specifications on their elements.

An experimental sixteen-element array has been realized in order to illustrate that study and the large capabilities of DBF technique.



EXPERIMENTATION D'UNE ANTENNE A FORMATION DE FAISCEAUX PAR LE CALCUL

INTRODUCTION

Le filtrage numérique spatial est une technique utilisée depuis plusieurs années par le sonar. Elle a également été introduite récemment dans le domaine des appareils médicaux avec le développement des "scanners". Son application en radar s'est, jusqu'à présent, heurtée aux limites de la technologie, aussi bien dans le domaine des composants hyperfréquence que dans celui des dispositifs numériques rapides.

Néanmoins, l'évolution de la technique dans ces différents domaines, permettra la réalisation d'une antenne radar à formation de faisceaux par le calcul numérique dans un avenir proche.

PRINCIPE DE LA FORMATION DE FAISCEAUX PAR LE CALCUL

L'aérien d'un radar (antenne à réflecteur ou antenne réseau) constitue, pour les ondes électromagnétiques, un "filtre spatial" analogique naturel. La structure de l'antenne (sa géométrie, ses propriétés rayonnantes), réalise physiquement un filtrage sur le signal hyperfréquence en fonction de son incidence avec l'aérien.

En première approximation, on a coutume d'écrire la réponse de l'antenne à une onde plane provenant de la direction  $\vec{U}$  sous la forme :

$$A(t) = e^{2j\pi ft} \int_R E(M) e^{2j\pi \frac{\vec{OM}_i \cdot \vec{U}}{\lambda}} dR = e^{2j\pi ft} D(\vec{U}) \quad (1)$$

où R est "l'ouverture" de l'antenne et E (M) "l'éclairement" sur l'ouverture.

$|D(\vec{U})|^2$  constitue le "diagramme de rayonnement lointain" de l'antenne..

Pour une antenne réseau, le terme  $D(\vec{U})$  s'écrit :

$$D(\vec{U}) = \sum_{i=1}^N E_i e^{2j\pi \frac{\vec{OM}_i \cdot \vec{U}}{\lambda}} \quad (2)$$

et s'appelle fonction de réseau de l'antenne.

La formation de faisceaux par le calcul consiste à remplacer cette opération "physique" par une opération de filtrage numérique.

Le principe en est résumé par la figure 1 :

- Un réseau de N modules élémentaires "échantillonne" sur une ouverture donnée l'enveloppe du signal hyperfréquence.
- Les signaux sont codés numériquement en phase et en quadrature par un réseau de 2 x N codeurs fonctionnant simultanément.
- Les N échantillons d'espace sont stockés en mémoire.
- Un processeur spécialisé forme, à la demande du système pilotant le radar, les signaux appelés faisceaux :

$$S = \sum_{i=1}^N a_i x_i \quad (3)$$

à partir des N échantillons d'espace  $x_i$  et d'une pondération complexe  $a_i$  prédéfinie.

Les avantages de ce type d'antenne sont nombreux : la qualité des diagrammes n'est plus limitée par la structure de l'antenne (spill-over, masque...), la bande de l'antenne ne dépend que de celle des modules, la méthode de formation des faisceaux est naturellement multifaisceau, elle est également auto adaptative, c'est une antenne fonctionnant uniquement à la réception, donc discrète...

Par contre, elle nécessite la réalisation de modules de réception élémentaires\* de grande qualité et de faibles dimensions, ainsi que le traitement d'un flux de données considérable : N valeurs complexes par case distance traitée !

\* antenne élémentaire, amplificateur faible bruit, démodulation homodyne ou hétérodyne.

EXPERIMENTATION D'UNE ANTENNE A FORMATION DE FAISCEAUX PAR LE CALCUL

EXPRESSION DU SIGNAL FORME PAR UNE ANTENNE FFC

L'expression du signal formé par le processeur est théoriquement donné par l'équation (3).

En fait il est affecté de deux types de bruit :

- les bruits sur le signal : bruit thermique, brouillage, bruit de quantification et de calcul
- les bruits "de pondération" : quantification des termes  $a_i$ , dispersion entre les caractéristiques des modules.

Si les premiers s'expriment sous la forme d'un bruit additif  $\epsilon$  ([1]), les seconds interviennent de manière plus pernicieuse en perturbant le diagramme théorique de la pondération ( $a_i$ ) :

$$S = \sum_{i=1}^N (a_i + \epsilon_i) s_i + \epsilon = D(\vec{u}) S(\vec{u}) + \epsilon = [D_0(\vec{u}) + \delta(\vec{u})] S(\vec{u}) + \epsilon \tag{4}$$

$$\text{avec } D_0(\vec{u}) = \sum_{i=1}^N a_i e^{2j\pi \frac{\vec{O}\vec{M}_i \cdot \vec{u}}{\lambda}} \tag{5}$$

Il résulte de (4) qu'il ne sera pas possible de prédire de manière certaine le diagramme résultant d'une pondération donnée ( $a_i$ ).

Néanmoins, on peut approcher ce diagramme résultant de manière statistique en écrivant que \* :

$$p(|D(\vec{u})| = D/D_0) dD = 2 \frac{D}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{D^2 + D_0^2}{\sigma^2}\right) I_0\left(2 \frac{D D_0}{\sigma^2}\right) \tag{6}$$

avec  $D_0 = |D_0(\vec{u})|$  et  $\sigma$  écart type de  $D$ .

On peut exprimer  $\sigma$  en fonction de la valeur du petit bit des pondérations  $b$  et de l'écart type  $d\vec{u}$  à la dispersion des modules  $\sigma_m$  :

$$\begin{cases} \sigma^2 = N \frac{b^2}{6} + P \sigma_m^2 \\ P = \sum_{i=1}^N |a_i|^2 \end{cases} \tag{7}$$

On connaît donc une densité de probabilité de l'amplitude du diagramme résultant dans chaque direction connaissant l'amplitude du diagramme théorique  $D_0$  dans cette direction. Ceci permet de définir la notion de diagramme garanti qui donne une bonne idée du diagramme résultant. Le diagramme garanti à  $p$  % de non dépassement (soit  $|D_p(\vec{u})|$ ) est donné de manière implicite par l'équation :

$$\int_0^{|D_p(\vec{u})|} p(|D(\vec{u})| = D/D_0) dD = p/100 \tag{8}$$

La figure 2 donne un exemple des diagrammes garantis pour une pondération en cosinus carré sur un piédestal avec 25dB sur les bords.

Le calcul porte sur une antenne de 50 capteurs (3000 MHz, 65 mm). Les diagrammes sont formés pour 66% et 99%. La valeur de  $\sigma^2$  est choisie -50 dB en dessous du maximum de rayonnement.

PROCESSEUR DE FORMATION DE FAISCEAUX ET ANTIBROUILLAGE

Le développement d'une antenne de ce type suppose la réalisation d'un processeur capable de traiter les données à une vitesse compatible de la bande émise. Ainsi, la formation d'un faisceau pour chaque case distance sur un réseau de 100 modules élémentaires nécessite du moins 400 multiplications réelles par case distance, soit pour une case distance de 1  $\mu$ s, 400 millions de multiplications réelles par seconde !

Fort heureusement, l'exploration systématique de l'ensemble du domaine de surveillance - qui est réalisée "naturellement" par une antenne classique - n'est pas une nécessité pour un système radar, ou tout au moins pas

\* Distribution de Rice -  $I_0$  fonction de Bessel modifiée d'ordre zéro.



EXPERIMENTATION D'UNE ANTENNE A FORMATION DE FAISCEAUX PAR LE CALCUL

avec la fréquence de renouvellement de l'information maximum. Ceci permet de décharger le processeur qui peut étaler les calculs qui lui sont demandés sur une période supérieure à la case distance. C'est dans cette optique que l'on peut envisager la mise en oeuvre d'un traitement plus élaboré du signal : adaptation à l'environnement ou antibrouillage.

On transpose en effet facilement à la FFC les algorithmes proposés par la littérature sur ce sujet : au lieu de nécessiter l'adjonction d'antennes auxiliaires, la FFC permet d'utiliser les signaux recueillis sur certains modules pour mettre en oeuvre l'algorithme.

D'autre part, la FFC permet de synthétiser le signal pilote, ou signal désiré, qui fait défaut à certains de ces algorithmes.

Soient par exemple  $(x_i^{(k)})$  les N échantillons d'espace utilisés à l'itération "k" d'un algorithme LMS, et  $(w_j^{(k)})$  la pondération d'antibrouillage entretenue par cet algorithme (22).

On procédera à chaque itération comme il est indiqué dans le tableau qui suit (les  $m_j$ ,  $(j=1, \dots, J)$  sont les numéros des modules retenus pour l'antibrouillage)

Calcul d'un signal pilote	$(P_i)$
Formation du faisceau principal .....	$f_o^{(k)} = \sum_{i=1}^N a_i (x_i + p_i)$
Sélection des faisceaux auxiliaires .....	$f_j^{(k)} = x_{m_j}^{(k)} + p_{m_j}$
Calcul du signal d'erreur	$\left\{ \begin{aligned} \epsilon^{(k)} &= P_o - \sum_{j=0}^J w_j^{(k)} f_j^{(k)} \\ P_o &= \sum_{i=1}^N a_i p_i \end{aligned} \right.$
Entretien de la pondération	$w_j^{(k+1)} = w_j^{(k)} + 2\mu \epsilon^{(k)} f_j^{(k)*}$

L'ensemble de ces calculs constitue un surcroit de charge pour le processeur d'antenne. Mais l'entretien constant de l'algorithme n'est pas nécessaire partout, ni sur toute la longueur de la récurrence. On peut envisager un mode de fonctionnement discontinu de la fonction antibrouillage qui n'est déclenchée au delà d'un certain seuil de bruit.

On en vient donc à la structure optimale du processeur indiquée figure 3 :

- une unité de séquençage analyse la charge imposée par le système et l'environnement du radar : elle commande en conséquence le codage et la mise dans une mémoire tampon des échantillons sur lesquels seront formés des faisceaux
- l'unité de calcul traite "à son rythme" les données en mémoire.

Ainsi, on utilise au mieux la puissance de calcul disponible en répartissant tout au long de la récurrence les calculs nécessaires au fonctionnement du radar.

EXPERIMENTATION D'UNE MAQUETTE

Une maquette d'antenne à formation de faisceaux par le calcul a été réalisée pour illustrer le principe de la FFC. Cette maquette est constituée d'un réseau linéaire de 16 modules de réception homodyne, constitués chacun d'une source élémentaire, un diviseur de puissance, un coupleur 3 dB/90° et deux mélangeurs qui fournissent directement deux tensions continues proportionnelles aux deux composantes de l'enveloppe du signal complexe capté par la source. L'ensemble fonctionne en bande S et en CW, le signal et l'OL sont dérivés du même générateur hyper. Deux codeurs analogique-numérique et deux multiplexeurs 16-canaux permettent de coder séquentiellement\* les 32 tensions en sortie du réseau de capteurs. L'ensemble est commandé par un miniordinateur de

\* Cette solution, qui fait l'économie de 30 codeurs A/N, n'est possible que dans le cadre de notre expérimentation en CW...

EXPERIMENTATION D'UNE ANTENNE A FORMATION DE FAISCEAUX PAR LE CALCUL

de type courant qui supporte la simulation du processeur FFC ainsi que les programmes spécifiques d'expérimentation. (Figure 4).

La maquette est testée en chambre anéchoïde face à une (ou plusieurs) parabole(s) qui forme(nt) le signal incident sous forme d'onde(s) plane(s).

Les résultats (figures 5 et 6) confirment les prévisions faites sur cette maquette et engagent à poursuivre l'étude dans cette voie.

Remerciements :

Nous tenons à remercier la Direction des Recherches et Etudes Techniques qui a supporté financièrement la majeure partie de cette étude.

Références :

- 1 "Experimental Digital Beam Forming Antenna"  
H. Devred - J. Roger - Proceedings Military Microwaves - MM 80 -
- 2 "A comparison of adaptive Algorithms based on the methodes of steepest descent and random search"  
Bernard Widrow - John Mc Cool - IEEE Transactions on Antenna and Propagation - Sept 76.

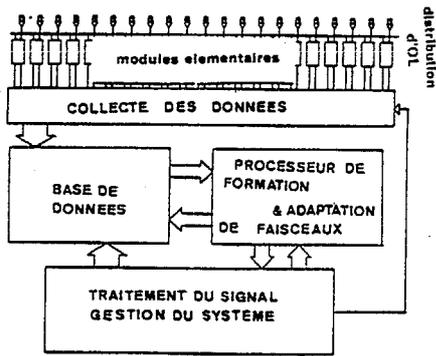


Figure 1 : schéma de principe d'une antenne à formation de faisceaux par le calcul.

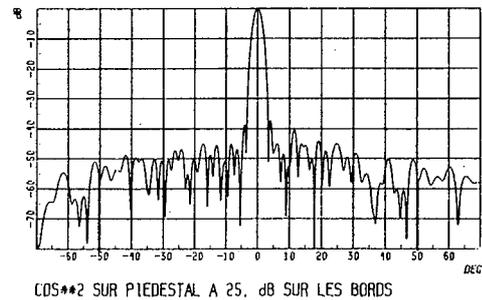
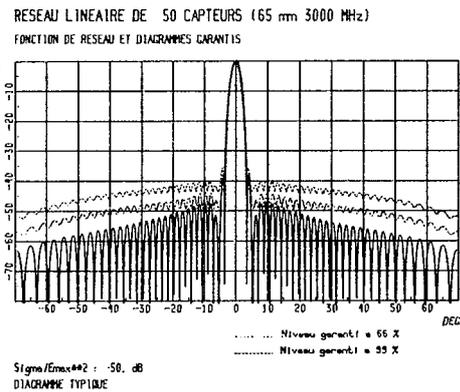
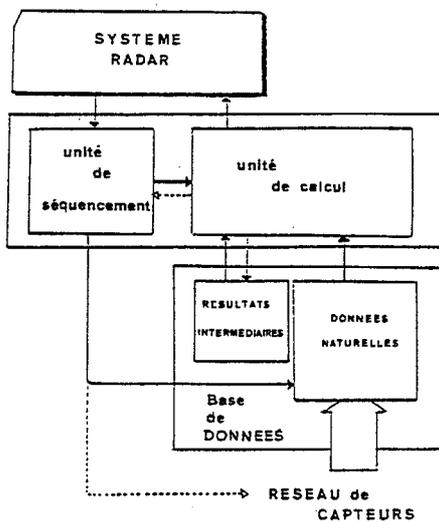


Figure 2 (ci-dessus) : prédiction de diagrammes garantis.

Figure 3 (ci-contre) : structure du processeur de formation et d'adaptation des faisceaux.



EXPERIMENTATION D'UNE ANTENNE A FORMATION DE FAISCEAUX PAR LE CALCUL

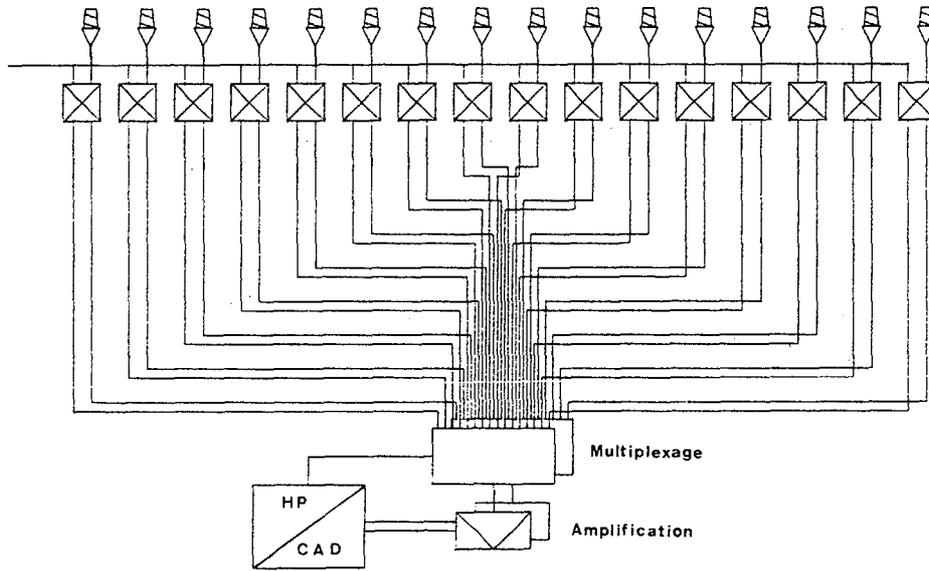
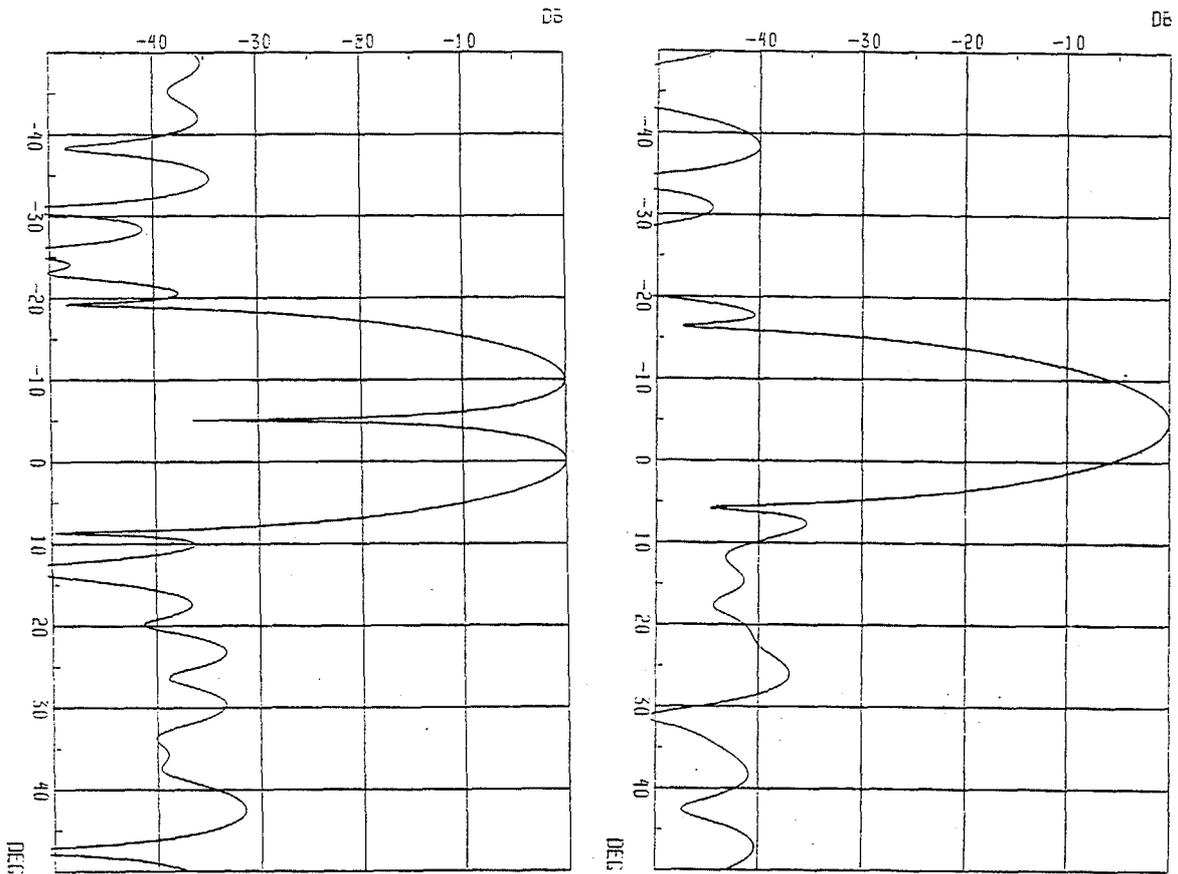


Figure 4 : schéma de la maquette 16 éléments d'antenne à formation de faisceaux par le calcul.

Figure 5 et 6 : diagrammes reconstitués par la maquette (voies somme et différence).



RESEAU DE 16 CAPTEURS A 3000 MHZ  
COSINUS CARRE SUR UN PIEDestal : 25 DB SUR LES BORDS