

## TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE  
DANS LES ANTENNES - RESEAUX*F. LOUANGE*, Ingénieur (★)*J. MUNIER*, Maître de Recherche (★)**RESUME**

La modulation d'ouverture est un procédé de traitement des signaux d'antennes consistant à faire varier au cours du temps les dimensions de l'ouverture rayonnante et qui présente de l'intérêt surtout pour les antennes - réseaux à grand nombre d'éléments pour micro-ondes.

Nous nous proposons de montrer comment on peut réaliser, à l'aide de commutateurs rapides (par exemple, à diodes P.I.N.) des antennes à ouverture modulée possédant deux voies de sortie : l'une optimisée en ce qui concerne l'ambiguïté angulaire, l'autre optimisée en pouvoir séparateur.

D'autres applications sont possibles, comme la synthèse de diagrammes évolutifs.

**SUMMARY**

Aperture modulation is an antenna signal processing method which consists in time-varying the size of the radiating aperture ; it concerns especially the large microwave arrays.

Our purpose is to display how aperture-modulated antennas would be constructed by means of fast switches (e.g. PIN diodes) so as to obtain two output channels : one optimized with respect to the angular ambiguity and the other to the resolving power.

There are others possible applications, e.g. synthesis of evolutive radiation patterns.

(★) Ecole Nationale Supérieure d'ELECTRONIQUE et de RADIOELECTRICITE  
23, rue des Martyrs - 38031 GRENOBLE CEDEX .



## TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...

F. LOUANGE, J. MUNIER

### PRINCIPE DE LA MODULATION D'OUVERTURE

La modulation d'ouverture est un procédé de traitement des signaux d'antennes connu de longue date (SHANKS, 1959), qui consiste à faire varier au cours du temps les dimensions de l'ouverture rayonnante d'une antenne ou, plus généralement, à moduler temporellement la loi d'illumination d'ouverture. On a pu dire qu'il revenait à conférer à l'antenne une quatrième dimension, le temps, les trois autres étant relatives aux variables d'espace.

Ce procédé n'a guère trouvé d'applications que dans les "réseaux phasés" utilisés pour le RADAR, dont la loi d'illumination subit une modulation de phase spatio-temporelle lente de manière à réaliser un balayage angulaire. La raison en est, sans doute, que l'état d'avancement de la technologie des micro-ondes ne permettait pas d'envisager, jusqu'à ces dernières années, d'autres types de traitements.

La tendance actuelle, encouragée par les progrès récents de la micro-électronique en hyperfréquences, est de réaliser des antennes-réseaux actives, dont chaque élément est muni d'un amplificateur individuel. Par ailleurs, on sait construire des commutateurs très rapides et peu coûteux à diodes, au moins pour les faibles puissances observées en réception. Il est donc devenu concevable de moduler en amplitude, tout aussi aisément qu'on le fait en phase, la distribution d'ouverture d'une antenne pour micro-ondes, soit par commutation, soit par modulation de gain des amplificateurs, et ceci à des cadences extrêmement élevées, opérations qui peuvent être commandées au moyen d'un ordinateur.

La méthode s'applique évidemment aussi aux antennes SONAR, qui sont habituellement constituées de réseaux de capteurs suivis d'amplificateurs.

La question est naturellement de savoir ce qu'on peut attendre de ce procédé de traitement : en fait, des possibilités nouvelles diverses, si l'on se réfère à la théorie de base [6]. Cette théorie montre qu'une modulation d'ouverture *périodique* a pour effet d'enrichir considérablement le spectre du signal émis ou reçu par l'antenne ; si on prend le cas simple d'une porteuse non modulée correspondant à une seule raie spectrale, l'effet produit est un spectre de raies encadrant la raie de la porteuse, distantes les unes des autres de quantités égales à la fréquence de modulation. Chaque élément de l'antenne-réseau subit une loi temporelle de modulation particulière, qui détermine les coefficients du développement en série de Fourier du signal que cet élément transmet. Il en résulte qu'à *chaque raie spectrale correspond une réponse angulaire distincte de l'antenne-réseau*, réponse qui dépend des excitations respectives des éléments du réseau à la fréquence considérée et qui est calculable à partir des coefficients de Fourier.

Si la fréquence de modulation est suffisamment élevée, il est aisé de filtrer les différentes composantes spectrales, de manière à



## TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...

F. LOUANGE, J. MUNIER

constituer des voies séparées, dont chacune correspond à une réponse angulaire propre. La modulation d'ouverture permet donc de *synthétiser, au moyen d'une seule antenne, plusieurs diagrammes indépendants simultanés* (théoriquement, jusqu'à une infinité). Lorsque le signal transmis par l'antenne est non plus une porteuse pure, mais une porteuse modulée occupant une certaine bande de fréquence, il suffit que la fréquence de modulation d'ouverture soit supérieure à la bande passante pour que la méthode soit encore valide.

En pratique, cette méthode n'est guère applicable qu'à la réception car, à l'émission, elle conduirait à un encombrement excessif du spectre des fréquences rayonnées dans l'espace. Par ailleurs, bien que la théorie vaille aussi bien pour les ouvertures continues que pour les réseaux, la modulation n'est en fait réalisable par des moyens simples que sur ces derniers.

Des traitements variés peuvent être envisagés grâce à la modulation d'ouverture ; à titre d'exemples, nous citerons les applications suivantes :

1. Synthèse d'un diagramme unique répondant à certaines spécifications (notamment, bas niveau de lobes secondaires) qu'il peut être difficile, voire impossible, d'obtenir par des moyens classiques ; la méthode est particulièrement intéressante lorsque la loi d'illumination statique est imposée d'avance [4] ;
2. Synthèse d'un diagramme unique évolutif : antennes à balayage, antennes adaptatives ; la modulation peut alors porter sur l'amplitude et sur la phase ;
3. Synthèse de diagrammes multiples simultanés, chacun d'entre eux correspondant à une voie distincte ; on peut ainsi obtenir les diagrammes somme et différence d'un système monopulse ou réaliser une antenne multifaisceaux [2][3].

Nous nous bornerons à examiner, dans ce qui suit, le cas où l'on opère une *modulation par tout ou rien* au moyen d'interrupteurs ou de commutateurs, ce qui est aisément réalisable en micro-ondes avec des diodes P.I.N., qui admettent des fréquences de modulation de plusieurs dizaines de mégahertz. Moduler par tout ou rien est une contrainte qui interdit de synthétiser de façon indépendante les diagrammes relatifs aux différentes raies spectrales ; on en est alors réduit à ne s'intéresser qu'à un seul de ces diagrammes et il est naturel de choisir celui qui correspond à la fréquence de l'onde incidente. Le schéma de principe du système est représenté sur la figure 1.a, où  $\Sigma$  symbolise un circuit de synthèse additive classique (qui peut éventuellement introduire des déphasages ou retards) ; on ne dispose évidemment dans ce cas que d'une seule voie de sortie, qui doit comporter, si le système fonctionne en réception, un filtre passe-bande (non représenté sur la figure) destiné à sélectionner la raie spectrale centrale.

Dans le système de la figure 1.a, la modulation par tout ou rien suivie d'un filtrage de la composante spectrale centrale n'est pas autre chose qu'une *méthode particulière de pondération de l'amplitude d'excitation des éléments du réseau* ; ainsi, l'affaiblissement

TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...

F. LOUANGE, J. MUNIER

FIGURE 1  
Schémas de principe de la modulation d'ouverture à l'aide d'interrupteurs (a) ou de commutateurs à deux voies (b).

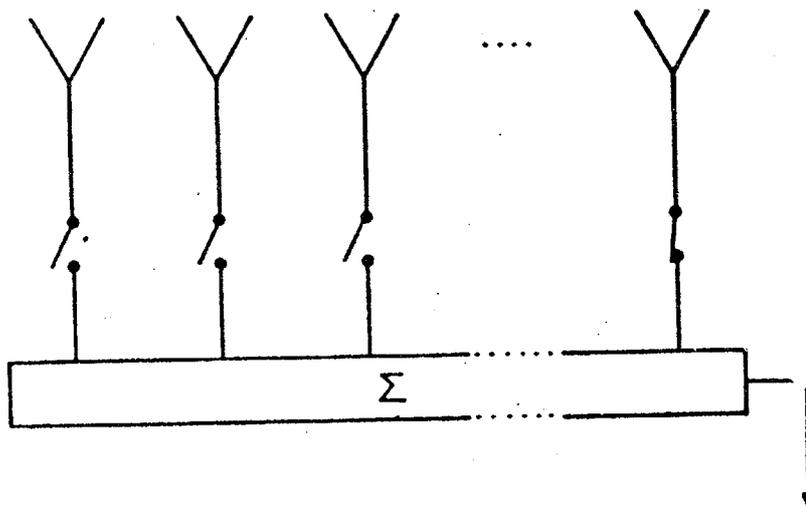


Figure 1.a

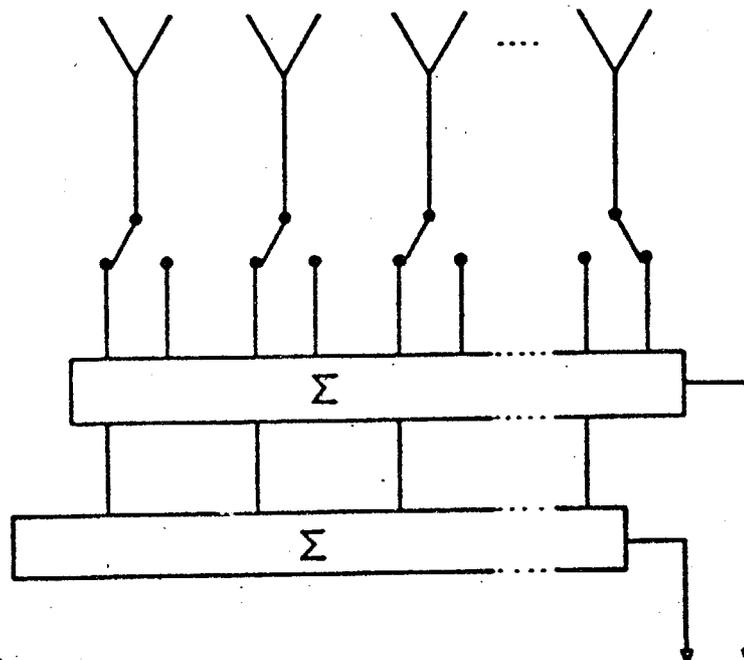


Figure 1.b



## TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE...

F. LOUANGE, J. MUNIER

sement croissant du centre vers les bords que l'on impose habituellement à la loi d'illumination d'ouverture pour réduire le niveau de lobes secondaires, au lieu d'être réalisé par les moyens classiques, est obtenu ici par un découpage temporel. Il est clair que les résultats en ce qui concerne la puissance transmise et le gain d'antenne sont alors strictement les mêmes.

On remarque que la puissance captée par les radiateurs élémentaires non connectés à un instant donné *n'est pas dissipée* et se trouve donc réfléchiée et rerayonnée, ce qui risque de perturber la partie active du réseau ; une solution consiste à remplacer les interrupteurs de la figure 1.a par des commutateurs à deux voies de sortie, l'une étant connectée au circuit de synthèse additive et l'autre à une terminaison résistive destinée à absorber la puissance inutilisée. Au lieu de dissiper sans profit cette puissance, on peut l'utiliser, comme l'indique la figure 1.b, pour former une *deuxième voie de sortie* que nous qualifierons de *complémentaire*.

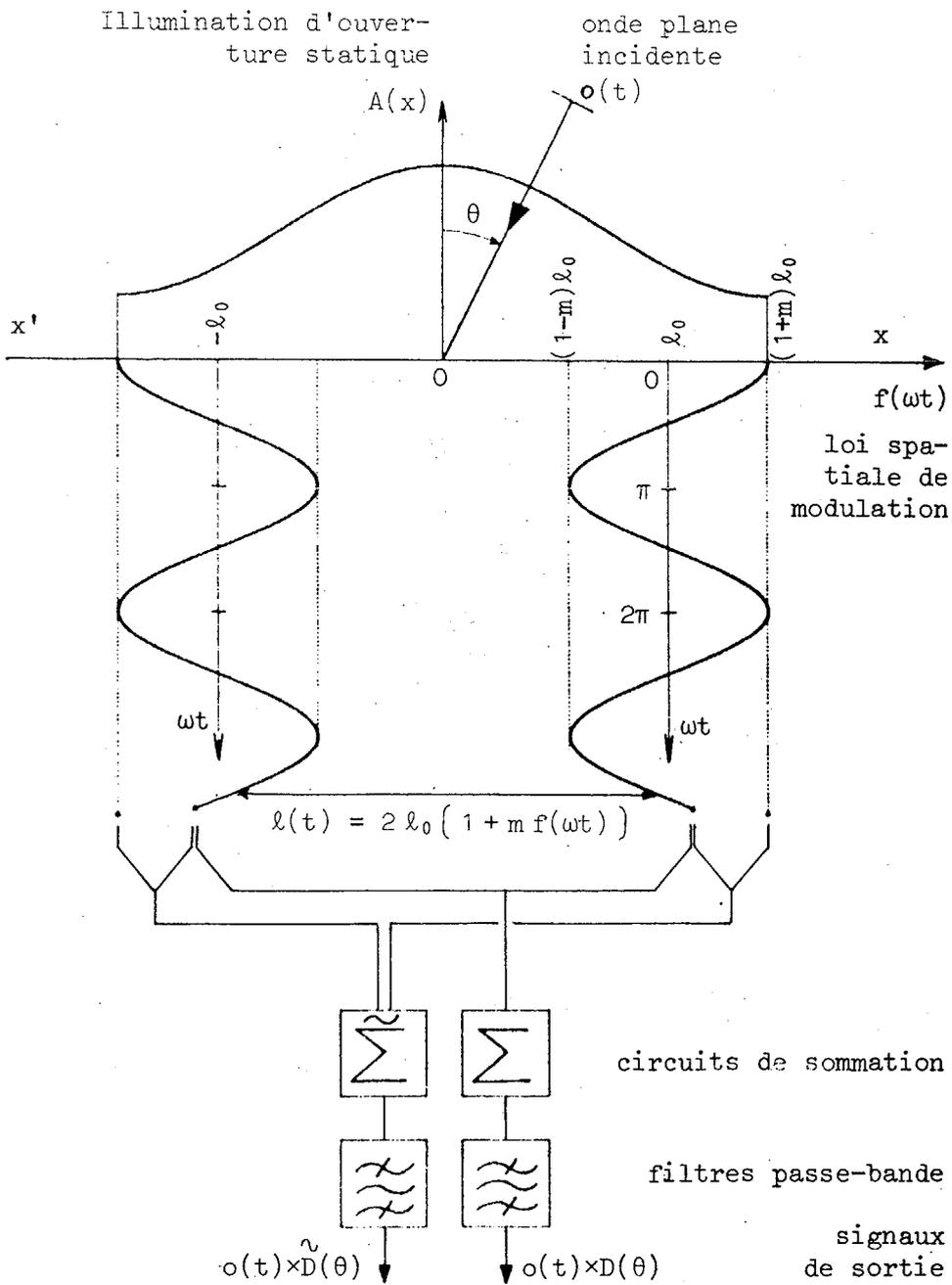
Les diagrammes correspondant respectivement à la voie principale et à la voie complémentaire sont, en général, très différents : l'un peut présenter, par exemple, une ambiguïté angulaire très faible, grâce à un bas niveau de lobes secondaires, et l'autre un pouvoir séparateur angulaire élevé, avec un niveau de lobes secondaires important. Cette méthode permet d'utiliser toute la puissance captée par le réseau, d'augmenter la quantité d'information spatiale reçue, et d'envisager un traitement final des signaux de voies en vue de bénéficier simultanément d'une ambiguïté et d'une précision angulaires améliorées.

Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu de la théorie, pour des antennes comportant, comme indiqué ci-dessus, une voie principale et une voie complémentaire, et quelques résultats extraits d'une étude numérique approfondie que nous avons faite, portant sur plusieurs cas typiques de lois d'illumination statique et de lois spatiales de modulation.

## BASES THEORIQUES

Le fonctionnement d'une antenne à modulation d'ouverture conforme au schéma de la figure 1.b est illustré symboliquement par la figure 2. Le problème est traité à deux dimensions seulement, l'antenne étant disposée le long de l'axe  $x'Ox$  ;  $A(x)$  représente sa *loi d'illumination statique*, qu'on supposera réelle, positive et de symétrie paire par rapport au centre  $O$  de l'antenne. Le cas où cette loi présente un gradient de phase n'est pas envisagé ici, mais peut être traité indépendamment sans difficulté ; on remarquera, en effet, que la modulation d'ouverture par tout ou rien ne fait pas intervenir la phase. Cette modulation, dont la pulsation fondamentale est notée  $\omega$ , est caractérisée par une loi temporelle  $f(\omega t)$ , à

FIGURE 2  
 Représentation symbolique du fonctionnement  
 d'une antenne à modulation d'ouverture.





TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...

F. LOUANGE, J. MUNIER

partir de laquelle on peut formuler la loi de modulation spatio-temporelle de la longueur d'antenne variable  $l(t)$  connectée à la voie principale.

De même qu'on a choisi de prendre une illumination d'ouverture  $A(x)$  à symétrie paire, on considèrera une modulation spatiale symétrique par rapport au centre 0, ce choix étant fondé sur la symétrie du problème du repérage d'une cible par rapport à l'axe de l'antenne. Bien qu'en pratique la modulation d'ouverture s'applique essentiellement à des réseaux, nous formulerons  $l(t)$  dans le cas plus général d'une ouverture continue, l'antenne-réseau étant un cas particulier pour lequel la loi d'illumination  $A(x)$  est une distribution. Nous écrirons :

$$l(t) = 2 l_0 (1 + m f(\omega t)) ,$$

$m$  est un *taux de modulation* compris entre 0 et 1 et  $f(\omega t)$  la *fonction modulante*, elle aussi comprise entre 0 et 1 et valant 1 à l'origine des temps.

L'antenne est supposée recevoir une onde plane monochromatique  $O(t) = S \cos(\Omega t + \phi)$  arrivant sous l'incidence  $\theta$  par rapport à sa normale ; les signaux de sortie de la voie principale et de la voie complémentaire sont caractérisés respectivement par les réponses angulaires  $D(\theta)$  et  $\tilde{D}(\theta)$ .

Si on considère tout d'abord la voie principale, en un point d'abscisse  $x$  de l'antenne, l'excitation subit un découpage temporel périodique, de telle sorte qu'elle peut être représentée par une série de Fourier qui caractérise ce que nous appellerons la *loi d'illumination dynamique* :

$$E(x,t) = E_0(x) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} E_k(x) \cos k \omega t .$$

Le terme de rang zéro est celui qui donne naissance à la raie spectrale centrale correspondant à la fréquence de l'onde incidente ; les termes de rang supérieur donnent naissance aux raies latérales de modulation. Par filtrage, on sélectionne le terme  $E_0(x)$  qui déterminera donc, à lui seul, la réponse angulaire de l'antenne pour la voie principale ; tout revient à dire qu'on a *synthétisé par modulation d'ouverture suivie de filtrage une loi d'illumination statique*  $E_0(x)$  différente de  $A(x)$ . Le calcul montre [8] qu'on a la relation :

$$E_0(x) = \frac{A(x)}{\pi} \Phi \left( \frac{|x| - l_0}{m l_0} \right)$$

dans laquelle  $\Phi(\xi)$  est une fonction obtenue par prolongement de la fonction réciproque  $f^{-1}(\xi)$  de la fonction modulante :

$$\left| \begin{array}{l} \Phi(\xi) = \pi \quad \text{pour } \xi \leq -1 \\ \Phi(\xi) = f^{-1}(\xi) \quad \text{pour } -1 \leq \xi \leq 1 \\ \Phi(\xi) = 0 \quad \text{pour } \xi \geq 1 \end{array} \right. .$$

De la même façon, la voie complémentaire est caractérisée par une loi d'illumination dynamique :

$$\tilde{E}(x,t) = A(x) - E(x,t)$$

TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...

F. LOUANGE, J. MUNIER

Le premier terme de son développement en série de Fourier est donné par la relation :

$$\tilde{E}_0(x) = A(x) - E_0(x)$$

Des expressions des illuminations statiques équivalentes  $E_0(x)$  pour la voie principale et  $\tilde{E}_0(x)$  pour la voie complémentaire, on peut déduire les réponses angulaires  $D(\theta)$  et  $\tilde{D}(\theta)$  ; nous renvoyons à la référence [8] où on en trouvera une formulation complète dans le cas général et dans les cas particuliers suivants :

- . fonctions modulantes en créneaux, sinusoïdale et en dents de scie rectilignes ;
- . lois d'illumination statique en triangle sur piédestal et en cosinus au carré sur piédestal.

EXEMPLE TYPIQUE

A titre d'exemple, nous considèrerons une *loi d'illumination statique en cosinus au carré sur piédestal* de la forme suivante :

$$A(x) = A_0 \left( 1 - 2\alpha \sin^2 \left( \frac{\pi x}{4 \ell_0} \right) \right)$$

Le paramètre  $\alpha$ , qui varie en sens inverse de la hauteur relative du piédestal, caractérise cette hauteur aux points d'abscisses  $+\ell_0$  et  $-\ell_0$  (définition qui permet de simplifier les calculs). Les cas limites sont *l'illumination uniforme*, pour laquelle on a  $\alpha = 0$ , et *l'illumination en cosinus au carré sans piédestal*, pour laquelle on a :

$$\alpha = \frac{1}{1 + \sin \left( m \frac{\pi}{2} \right)}, \quad m \text{ étant le taux de modulation (compris entre 0 et 1).}$$

Par ailleurs, nous prendrons une fonction modulante en dents de scie linéaires périodiques, définie sur la période  $(-\pi, \pi)$  par la relation :

$$f(\omega t) = 1 - 2 \frac{|\omega t|}{\pi}$$

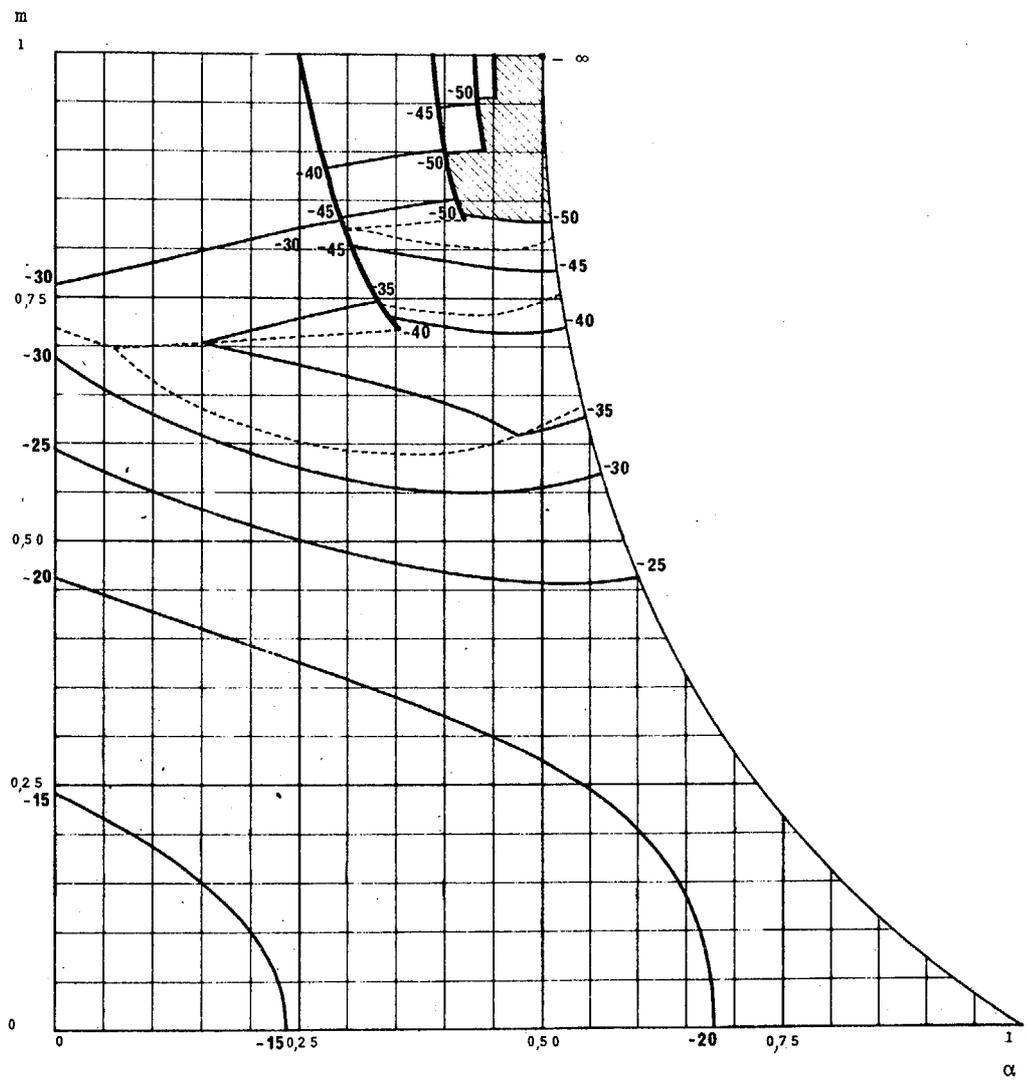
Quel que soit l'exemple choisi, la voie principale est essentiellement alimentée par la partie centrale de l'antenne et correspond à une illumination statique équivalente atténuée aux extrémités elle a donc généralement comme caractéristiques un niveau de lobes secondaires bas et un lobe principal peu directif. Par contre, la voie complémentaire est surtout alimentée par les extrémités de l'antenne et présente donc les propriétés inverses : niveau de lobes secondaires élevé, mais bonne directivité. C'est précisément ce qu'on vérifie sur les figures 3, 4 et 5 relatives au cas considéré ci-dessus.

La figure 3 fait apparaître une zone du plan  $(m, \alpha)$  où le niveau de lobes secondaires est extrêmement bas ; on constate même une absence totale de lobes secondaires au point défini par  $m=1$  et  $\alpha=0,5$ . Sur les figures 4 et 5, les largeurs de lobe principal évaluées au niveau  $(-3\text{dB})$  sont définies en prenant comme variable angulaire :



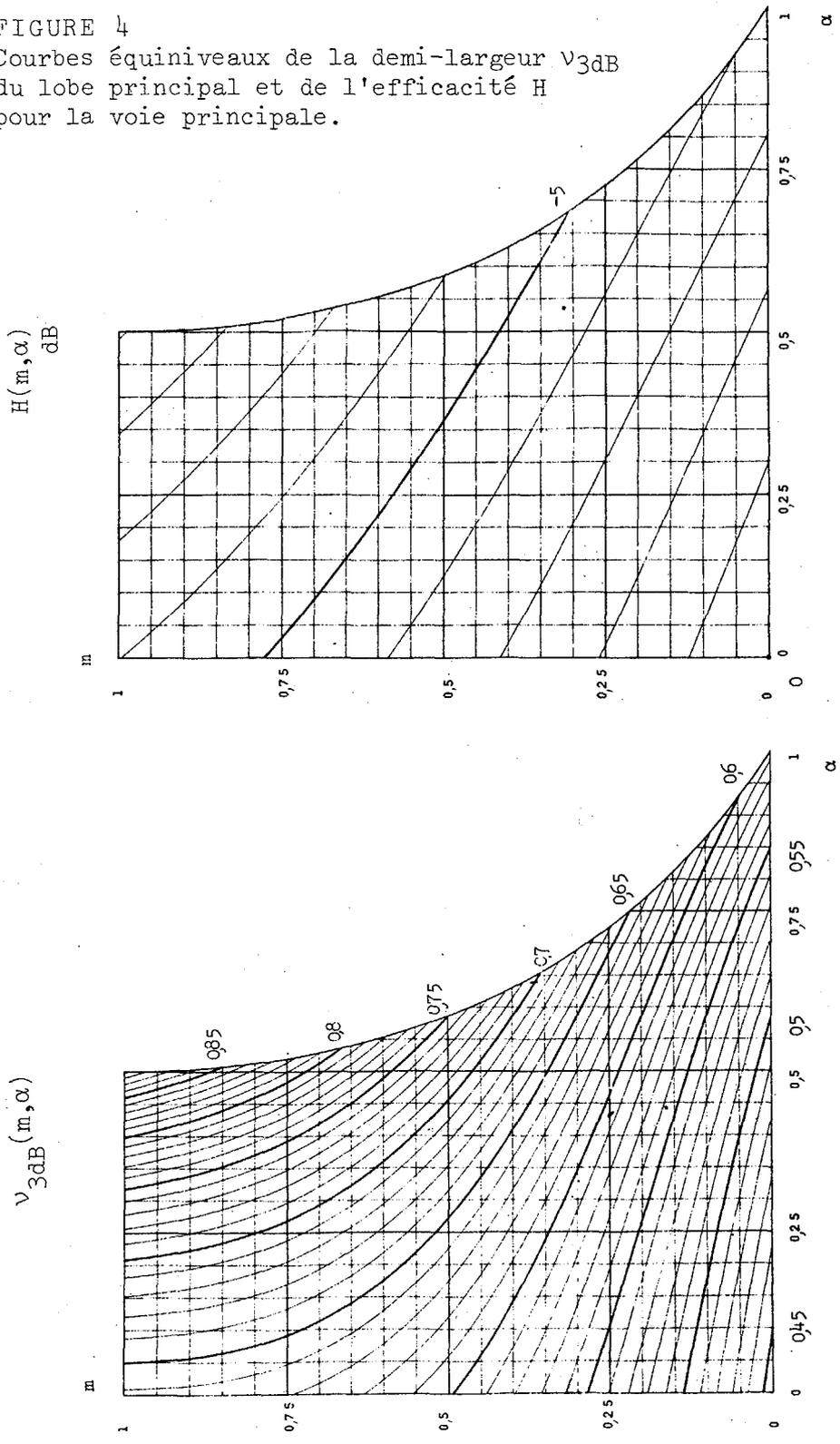
TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...  
 F. LOUANGE, J. MUNIER

FIGURE 3  
 Courbes équiniveaux du niveau de lobes secondaires  
 en décibels pour la voie principale.



TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...  
 F. LOUANGE, J. MUNIER

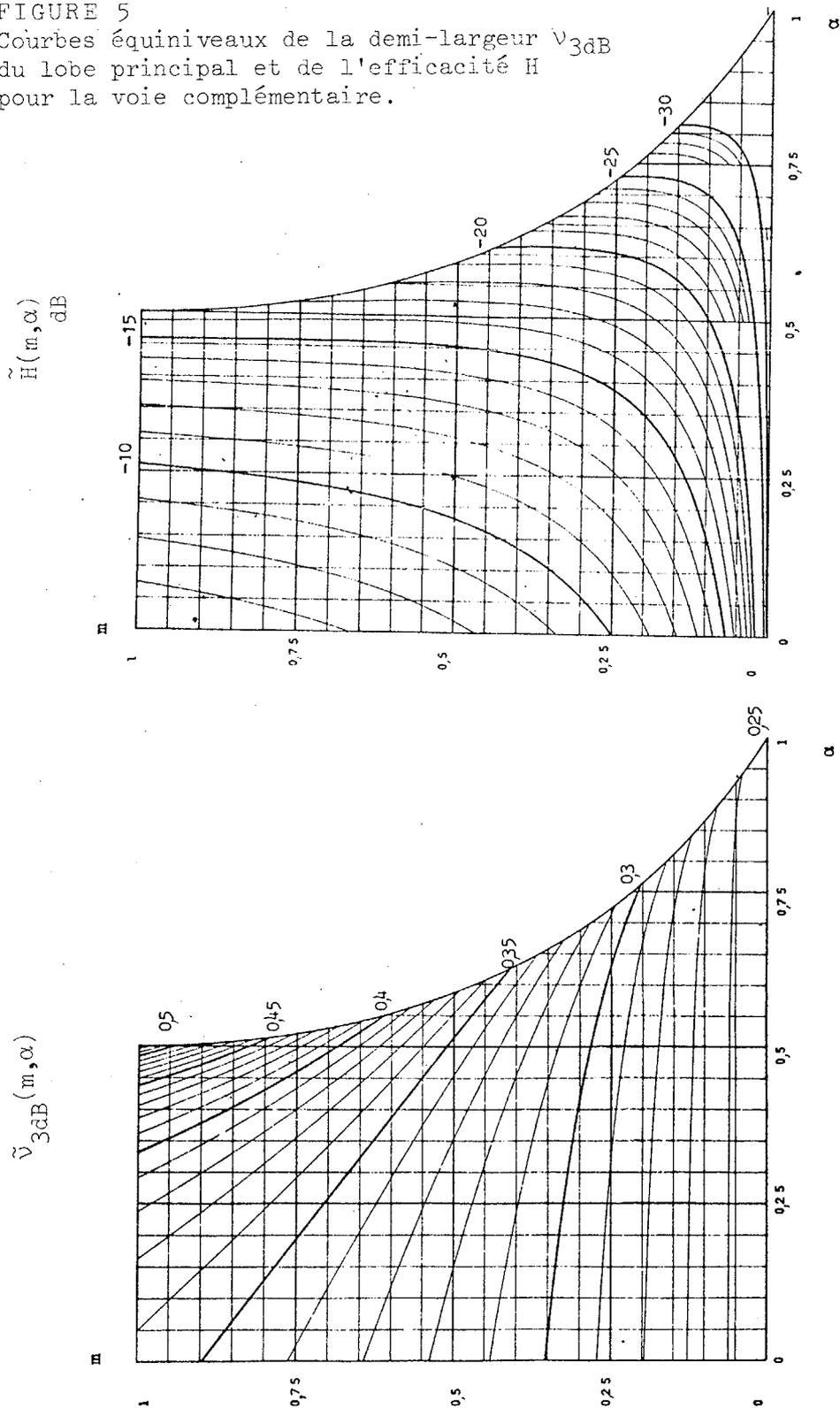
FIGURE 4  
 Courbes équiniveaux de la demi-largeur  $\nu_{3dB}$   
 du lobe principal et de l'efficacité  $H$   
 pour la voie principale.





TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...  
 F. LOUANGE, J. MUNIER

FIGURE 5  
 Courbes équiniveaux de la demi-largeur  $\tilde{\nu}_{3dB}$   
 du lobe principal et de l'efficacité  $\tilde{H}$   
 pour la voie complémentaire.



## TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...

F. LOUANGE, J. MUNIER

$$v = \frac{L}{\lambda} \sin \theta$$

L étant la longueur totale de l'antenne égale à :  $L = 2(1+m)\lambda_0$ ,  
et  $\lambda$  la longueur d'onde du signal transmis.

A titre de comparaison, signalons qu'une illumination statique uniforme sur une longueur L, sans modulation d'ouverture, donne :

$$v_{3dB} = 0,443$$

tandis qu'un interféromètre composé de deux radiateurs ponctuels distants de L donne :

$$v_{3dB} = 0,25$$

Ainsi qu'on pouvait s'y attendre, la voie complémentaire présente en moyenne une directivité intermédiaire entre celle de l'illumination uniforme et celle de l'interféromètre.

Les figures 4 et 5 donnent en outre l'efficacité H, définie comme étant, pour chacune des voies, le rapport entre la puissance qu'elle reçoit dans l'axe ( $\theta = 0$ ) et la puissance que recevrait une antenne de longueur L à loi d'illumination uniforme non modulée. Ces efficacités auraient les mêmes valeurs si les diagrammes des deux voies étaient obtenus par des moyens classiques, à l'aide de deux antennes distinctes. En pratique, il y aura souvent intérêt à s'arranger pour que les efficacités des deux voies soient du même ordre de grandeur ; c'est, en effet, la condition pour qu'il en soit de même des rapports signal à bruit.

Les figures 6 et 7 illustrent la façon dont la réponse angulaire évolue, pour chacune des deux voies, lorsque le taux de modulation varie de 0 à 1, dans le cas d'une loi d'illumination sans piédestal qui correspond aux valeurs limites supérieures de  $\alpha$ , telles qu'elles apparaissent sur les figures 3 à 5. On vérifie notamment l'absence de lobes secondaires dans la voie principale pour  $m = 1$ . On constate en outre, pour cette valeur de m, une particularité intéressante de la voie complémentaire, à savoir de présenter une réponse angulaire à valeurs positives seulement dans le lobe principal. Cette propriété est manifeste sur la figure 8, tracée pour une antenne de longueur  $L = 50 \lambda$  ; elle permet d'envisager un *traitement des signaux de sortie* tel qu'on ait une bonne directivité et pas de lobes secondaires. Ce traitement consiste à effectuer le *produit des signaux issus des deux voies* et à utiliser un *dispositif à seuil éliminant les réponses de signe négatif* ; notons, toutefois, que les systèmes à produit basés sur ce principe ne sont efficaces qu'en présence d'une cible ou d'une source ponctuelle unique.

Les réponses angulaires résultant du produit des signaux de sortie sont données par la figure 9 pour des réseaux de  $2n+1$  radiateurs équidistants.



FIGURE 6  
Evolution de la réponse angulaire de la voie principale en fonction du taux de modulation (illumination statique en cosinus au carré sans piédestal et modulation d'ouverture en dents de scie).

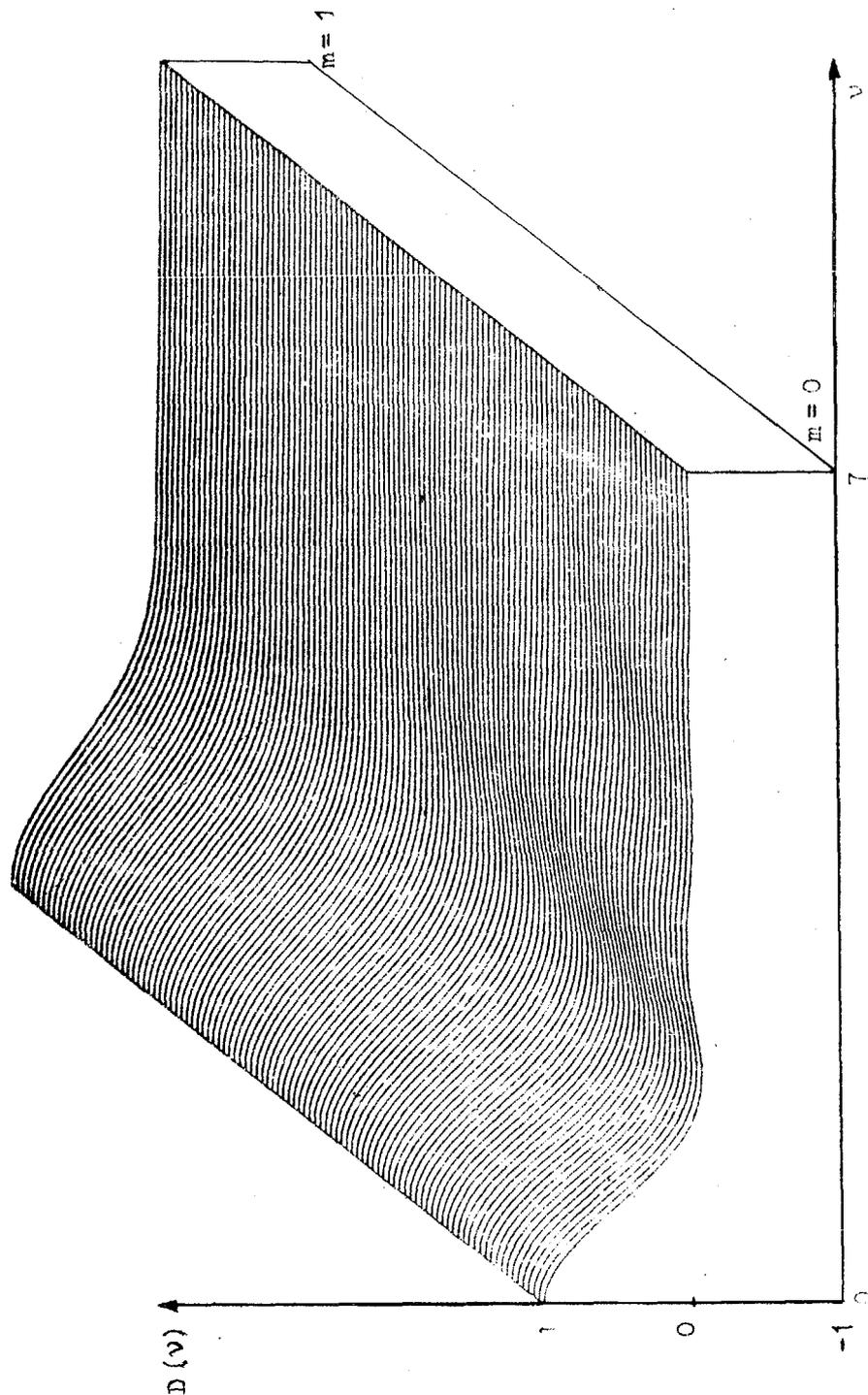
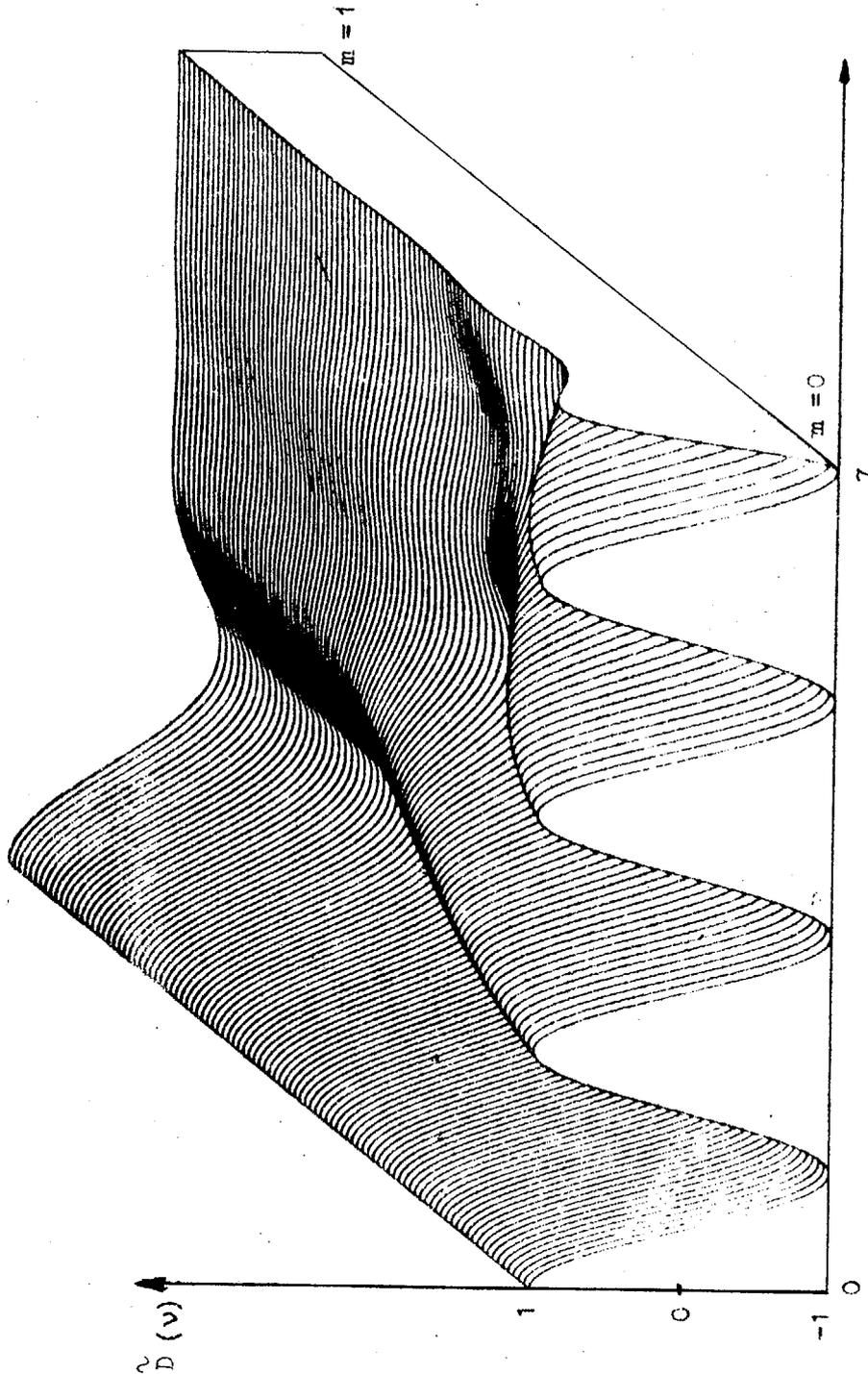


FIGURE 7

Evolution de la réponse angulaire de la voie complémentaire en fonction du taux de modulation (illumination statique en cosinus au carré sans piédestal et modulation d'ouverture en dents de scie).





TRAITEMENT DU SIGNAL PAR MODULATION D'OUVERTURE ...  
 F. LOUANGE, J. MUNIER

FIGURE 8

Diagrammes relatifs aux deux voies pour une ouverture continue d'illumination statique en cosinus au carré modulée à 100 % par une loi en dents de scie, et de longueur  $L = 50 \lambda$ .

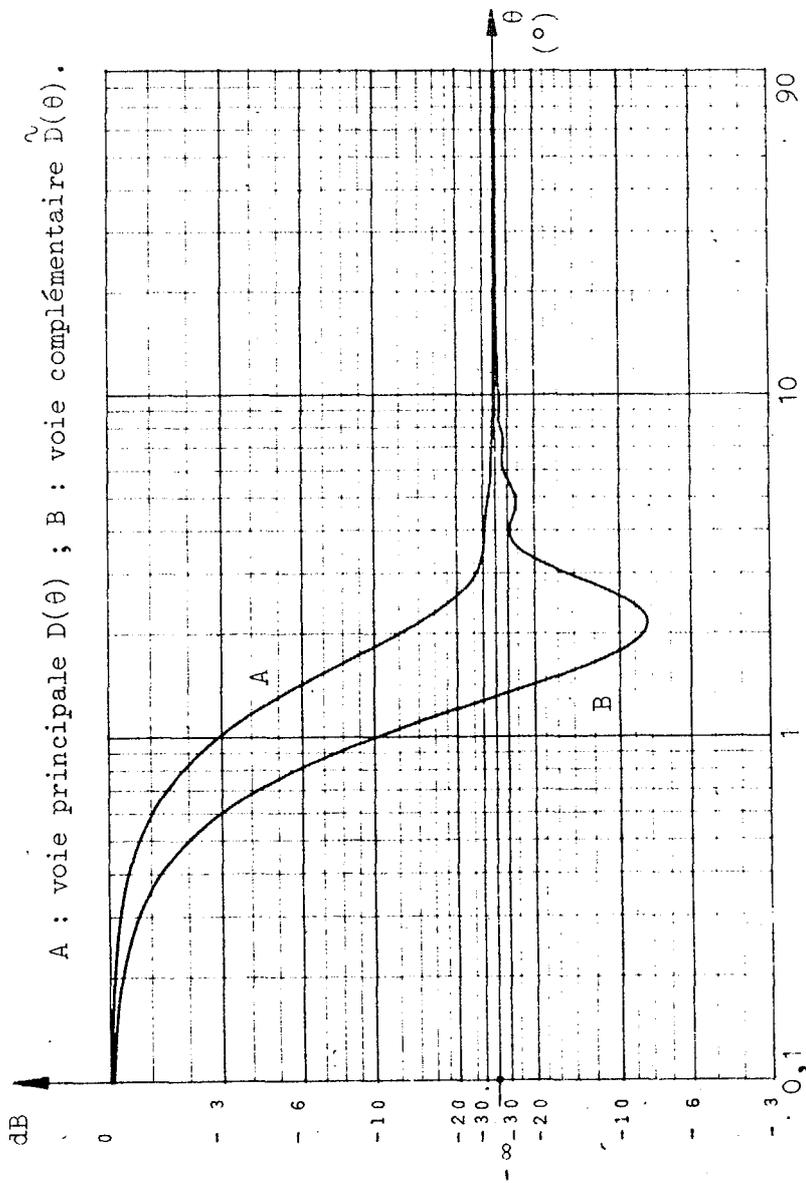
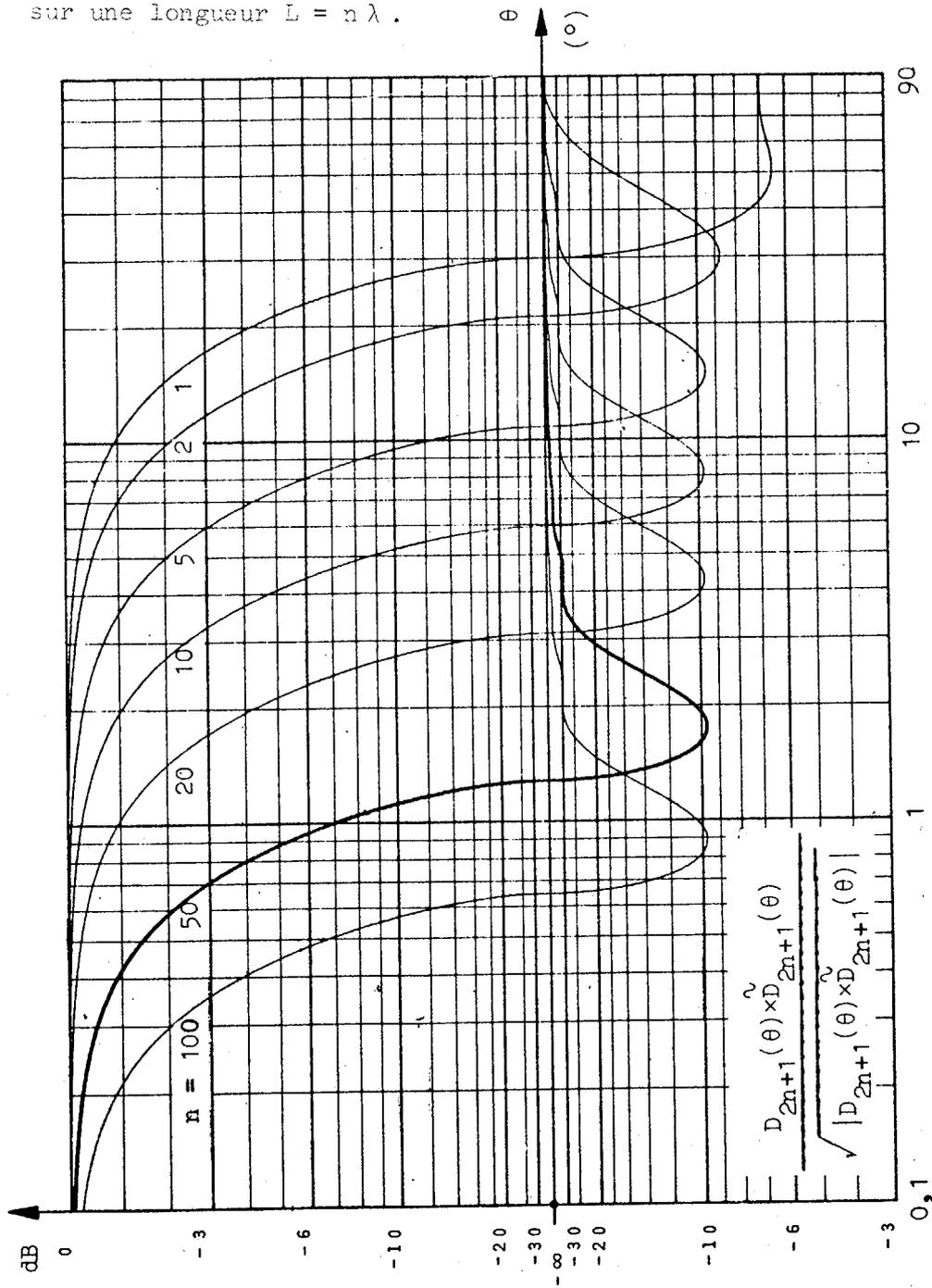


FIGURE 9

Produit des diagrammes relatifs aux deux voies pour une antenne-réseau d'illumination statique en cosinus au carré modulée à 100 % par une loi en dents de scie, et comportant  $2n+1$  radiateurs uniformément répartis sur une longueur  $L = n\lambda$ .





---

## CONCLUSION

Les progrès technologiques en matière de micro-électronique en hyperfréquences permettent à l'heure actuelle d'envisager, à des coûts raisonnables, la généralisation des réseaux d'antennes actifs pour le RADAR, similaires à ceux du SONAR, dans lesquels chaque capteur possède son propre amplificateur ainsi que tous organes destinés à effectuer un traitement du signal au niveau des capteurs du réseau (déphaseurs, lignes à retard, commutateurs, modulateurs, mélangeurs, etc.).

Parmi la multiplicité des traitements possibles dont la plupart reste certainement à découvrir, la modulation d'ouverture, sous la forme où nous l'avons présentée, est probablement l'un des plus simples ; elle ne nécessite strictement que des commutateurs rapides et des filtres de bande. C'est une méthode peu dispendieuse, grâce à laquelle on peut synthétiser indépendamment deux diagrammes angulaires distincts correspondant à deux voies de sortie, à partir d'une seule antenne.

A titre d'exemple, nous avons indiqué comment peut être obtenue, par un traitement approprié des signaux de sortie, une réponse angulaire caractérisée par un seul lobe directif. On peut évidemment imaginer d'autres applications, comme la synthèse des diagrammes somme et différence d'un système monopulse.

Toutefois, la méthode implique une limitation de la bande passante des signaux transmis par l'antenne ; la limite est imposée par la fréquence de modulation d'ouverture, donc par la vitesse de commutation. En hyperfréquences, l'emploi de diodes P.I.N. permet d'atteindre des valeurs de *plusieurs dizaines de mégahertz*. En utilisant le principe des duplexeurs de RADAR à coupleurs 3 dB, nous avons réalisé au moyen de quatre diodes un commutateur compact pour la bande X, présentant des performances suffisantes en perte d'insertion et en isolation. De tels commutateurs sont peu coûteux et peuvent être aisément incorporés dans toute antenne-réseau ; en outre, les puissances de commande sont modestes.

Si, pour une raison quelconque, on est amené à prendre une fréquence de modulation très élevée, le temps de commutation des diodes n'est plus négligeable : au lieu d'une modulation par tout ou rien, on obtient une modulation graduelle, dont on peut tenir compte dans le calcul des diagrammes. Par ailleurs, une partie de la puissance peut se trouver dissipée dans les diodes, mais ceci n'est pas réellement un handicap car, dans tout système d'antenne, on est conduit de toutes façons à ne pas utiliser toute la puissance reçue dès l'instant où l'on cherche à pondérer la loi d'illumination d'ouverture.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] H.E. SHANKS, R.W. BICKMORE  
Four-dimensional electromagnetic radiators  
Can. J. Phys., 37, 263-75 (mars 1959) ;
- [2] H.E. SHANKS  
A new technique for electronic scanning  
I.R.E. Trans., AP.9 n° 2, 162-6 (mars 1961) ;
- [3] W.H. KUMMER, A.T. VILLENEUVE, F.G. TERRIO  
Scanning without phase shifters  
Electronics; 36 n° 13, 27-32 (mars 1963) ;
- [4] W.H. KUMMER, A.T. VILLENEUVE, T.S. FOND, F.G. TERRIO  
Ultra-low sidelobes from time-modulated arrays  
I.R.E. Trans., AP.11 n° 11, 633-9 (novembre 1963) ;
- [5] R.W. BICKMORE (ed. HANSEN)  
Microwave scanning antennas, Academic Press (1966)  
3 chapitre 4 : Time versus space in antenna theory ;
- [6] B.R. HATCHER  
General time-modulated antenna-arrays  
Microwave Journal, 10 n° 13, 53-7 (décembre 1967) ;
- [7] F. LOUANGE, J. MUNIER  
Improved angular ambiguity and accuracy by aperture-modulation  
technique - Electron. Letters, 8, 233-5 (4th may 1972) ;
- [8] F. LOUANGE  
Traitement du signal par modulation d'ouverture dans les antennes-réseaux - Thèse Doct.-Ing., Grenoble (23 octobre 1972).