



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

MADAME SERRES - CIT-ALCATEL

RESUME La simulation optique d'antenne est maintenant un procédé très classique.

Elle nous a permis non seulement de photographier le diagramme de directivité des antennes simulées, mais aussi de mesurer leur index de directivité à l'infini, ainsi que l'influence sur cet index :

- des écarts relatifs de la puissance rayonnée par les éléments ;
- de la fréquence
- de l'orientation du lobe principal,
- des erreurs de phase,

Ces mesures ont été effectuées sur deux modèles d'antennes, une antenne pleine rectangulaire de 30 m sur 5 m, une antenne lacunaire de 7,5 m sur 2,5 m - 400 éléments.

SUMMARY

Optical simulation of antennas is now a well known process. We thereby were able to take pictures of antenna diagrams and also to measure their directivity index in the Fraunhofer zone and study the influence of such parameters as :

- discrepancy between elements radiated powers
- frequency
- tilting of the main lobe
- phase errors.

Measurements were conducted on two small scale model types. the first corresponding to a uniform rectangular aperture of 30 m X 5 m, the second corresponding to a 7,5 m X 2,5 m aperture size of 400 randomly distributed elements.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

1.- INTRODUCTION

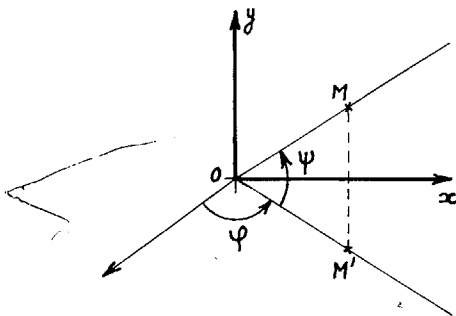
L'idée d'obtenir optiquement le diagramme de directivité d'une antenne n'est pas nouvelle. De nombreuses études ont déjà été faites sur ce sujet. Mais une caractéristique importante des antennes est leur gain, ou index de directivité qui permet de chiffrer :

- Soit le gain en rapport signal sur bruit à la réception d'un signal arrivant par une direction donnée en présence d'un bruit isotrope.
- Soit le gain en niveau d'émission, à l'émission.

Nous avons fait la mesure de cet index sur deux modèles d'antennes :

- Une antenne pleine de grande dimension
- Une antenne lacunaire.

On a étudié le champ à l'infini et réalisé quelques mesures en champ proche.

2.- PRINCIPE DES MESURES A L'INFINI2.1.- Généralités :

Prenons une base située dans le plan xOy de surface A et dont la loi de variation de pression au niveau de A est $A(x,y)$.

Dans le cas de l'antenne pleine $A(x,y)$ est une constante.

Dans le cas de l'antenne lacunaire, cette loi est obtenue au moyen d'un ensemble de sources quasi ponctuelles dont la loi de rayonnement est $S(\varphi, \psi)$. $A(x,y)$ est un ensemble de fonctions de Dirac.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

Si on emploie les symboles suivants :

λ_a = longueur d'onde acoustique

λ_o = longueur d'onde optique

$$b = \frac{\lambda_a}{\lambda_o}$$

a = rapport de similitude entre antenne vraie et antenne simulée

$F_A(\psi, \Psi, \varphi_o, \psi_o)$ = champ à l'infini créé par l'antenne.

Par le changement de variable $X = \frac{Fa}{b} (\cos \Psi \sin \varphi - \cos \psi_o \sin \varphi_o)$

$$Y = \frac{Fa}{b} (\sin \Psi - \sin \psi_o)$$

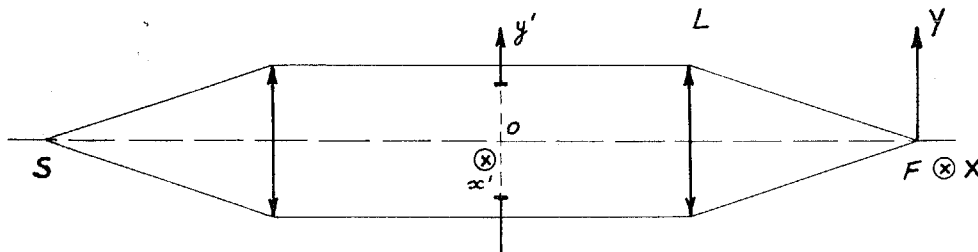
$F_A(\psi, \Psi, \varphi_o, \psi_o)$ devient $\mathcal{F}_A(X, Y)$ et on montre que le facteur de

directivité s'écrit :

$$K = \frac{2\pi |\mathcal{F}_A(0,0)|^2}{\frac{b^2}{F^2 a^2} \iint \frac{\mathcal{F}_A(X,Y)^2}{\cos \Psi \cos \varphi} dXdY}$$

2.2.- Simulation optique

Le montage est le suivant :





SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

S = source ponctuelle cohérente

Dans le plan $x'o'y'$ on place un diaphragme dont la répartition en transmission est $A(ax', ay')$

La lentille L a une distance focale F.

Dans le plan focal la répartition est :

$$\mathcal{F}_0(X, Y) = K_2 \iint_{\frac{A}{a^2}} A(ax', ay') e^{j \frac{2\pi}{\lambda_0 F} (x'X + y'Y)} dx' dy'$$

Le facteur de directivité optique est : $K_0 = \frac{|\mathcal{F}_0(0,0)|^2 \frac{\pi a^2 F^2}{b^2}}{\iint |\mathcal{F}_0(x,y)|^2 dx dy}$

et on montre facilement que :

$$K = \frac{|\mathcal{F}_0(0,0)|^2 \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{a^2 F^2}{b^2}}{\iint |\mathcal{F}_0(x,y)|^2 |S(x,y)| \frac{dXdY}{\cos \psi \cos \varphi}}$$

$$K = 2 K_0$$

est donc une relation exacte dans le cas de l'antenne

lacunaire, si l'on considère que les trous rayonnent en $\cos \psi \cos \varphi$

C'est encore une très bonne approximation pour l'antenne pleine.

3.- REALISATION DES ANTENNES REDUITES

L'antenne pleine est simulée par une simple fenêtre rectangulaire dans un écran opaque.

L'antenne lacunaire est réalisée sur plaque photographique. Chaque élément étant approximativement un cercle transparent sur le fond noir.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

Les figures 1 et 2 montrent les deux antennes simulées.

4.- MESURES

4.1.- Description des mesures

- Nous avons photographié le diagramme de directivité avec des échelles en sinus.
- Nous avons mesuré l'index de directivité en fonction de la fréquence.
- Nous avons ensuite fait la mesure de cet index en fonction du dépointage.
- Puis nous avons regardé l'influence sur cet index de défauts de phase allant jusqu'à 20°.

4.2.- Montage optique

Le montage est celui que nous avons vu au paragraphe 2.2.

Le point source est le foyer d'un objectif de microscope éclairé par un laser $H_e - N_e$.

Ce point source est placé au foyer d'une lentille collématrice qui donne un faisceau de lumière cohérente, parallèle et homogène.

Faire varier ψ de $-\frac{\pi}{2}$ à $\frac{\pi}{2}$ et φ de 0 à π revient à rester dans le plan focal, à l'intérieur d'un cercle de rayon $\frac{Fa}{b}$

où F est la distance focale de la lentille intégratrice.

a : le rapport de similitude entre l'antenne vraie et l'antenne simulée

$$b : \frac{\lambda_a}{\lambda_0}$$



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

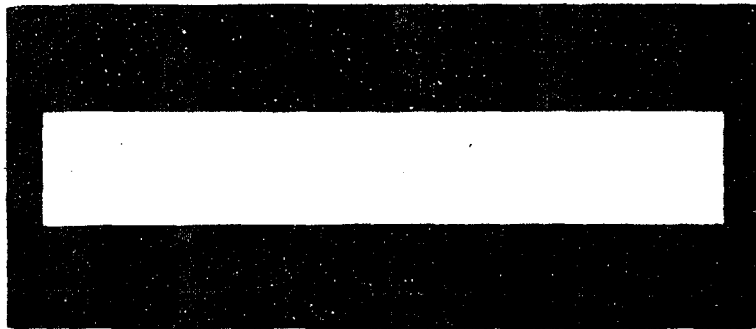


Fig. 1 - Diaphragme simulant l'antenne pleine.

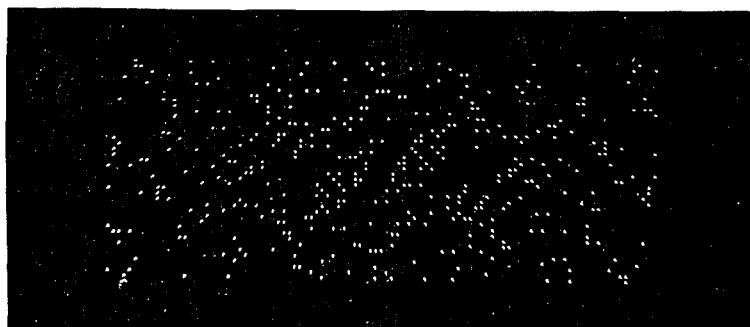


Fig. 2 - Diaphragme simulant l'antenne lacunaire.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

Le rayon du cercle varie comme la fréquence.

4.3.- Mesure de K_o

K_o est le rapport de l'intensité au maximum du lobe principal, à l'intensité moyenne dans le demi-espace s'étendant devant l'antenne.

C'est ici, le rapport de l'intensité au maximum du lobe principal, à l'intensité moyenne à l'intérieur du cercle de rayon $\frac{Fa}{b}$

- On mesure l'intensité lumineuse au maximum du lobe principal, à l'aide d'un photomultiplicateur diaphragmé par un trou de diamètre petit devant la largeur de ce lobe ; qui mesure l'énergie traversant ce trou - I_o ,

si S_o est la surface du trou, l'intensité est : $\frac{I_o}{S_o}$

- De même on mesure l'énergie moyenne dans le cercle de rayon $\frac{Fa}{b}$, en diaphragmant le photomultiplicateur par un trou de rayon $\frac{Fa}{b}$, soit I l'énergie mesurée, l'intensité moyenne est $\frac{I}{S}$.

Donc on a $K_o = \frac{I_o}{S_o} / \frac{I}{S}$

$$D_o = 10 \log \left[\frac{I_o}{S_o} / \frac{I}{S} \right] = 10 \log \frac{S}{S_o} - 10 \log \frac{I}{I_o}$$

L'index de directivité est donc :

$$D = 10 \log \frac{S}{S_o} - 10 \log \frac{I}{I_o} \cdot 3$$



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

4.4.- Mesure de K en fonction de l'orientation du lobe principal

Faire un dépointage de ψ_0 , φ_0 , correspond à décentrer le cercle de :

$$X_0 = \frac{F}{b} \cos \psi_0 \sin \varphi_0 \quad Y_0 = \frac{F}{b} \sin \psi_0$$

Nous faisons les mesures à 4 kHz pour l'antenne pleine où $\frac{Fa}{b} = 3$ mm
 et à 8 kHz " lacunaire où $\frac{Fa}{b} = 1,5$ mm

En fait, il faut introduire une correction :

Dans le cas d'un dépointage réel, le lobe principal est déplacé, tandis qu'ici, nous laissons le lobe principal fixe et nous déplaçons le cercle. Ce qui revient à faire l'intégrale (pour le calcul de l'intensité moyenne) sur $-\frac{\pi}{2} + \psi_0$, $+\frac{\pi}{2} + \psi_0$ ou bien de la faire sur $-\frac{\pi}{2}$, $\frac{\pi}{2}$; donc à intégrer dans un angle solide de $2\pi \cos \psi_0$ au lieu de 2π .

Donc pour avoir le vrai K il faut multiplier le K mesuré par $\cos \psi_0$

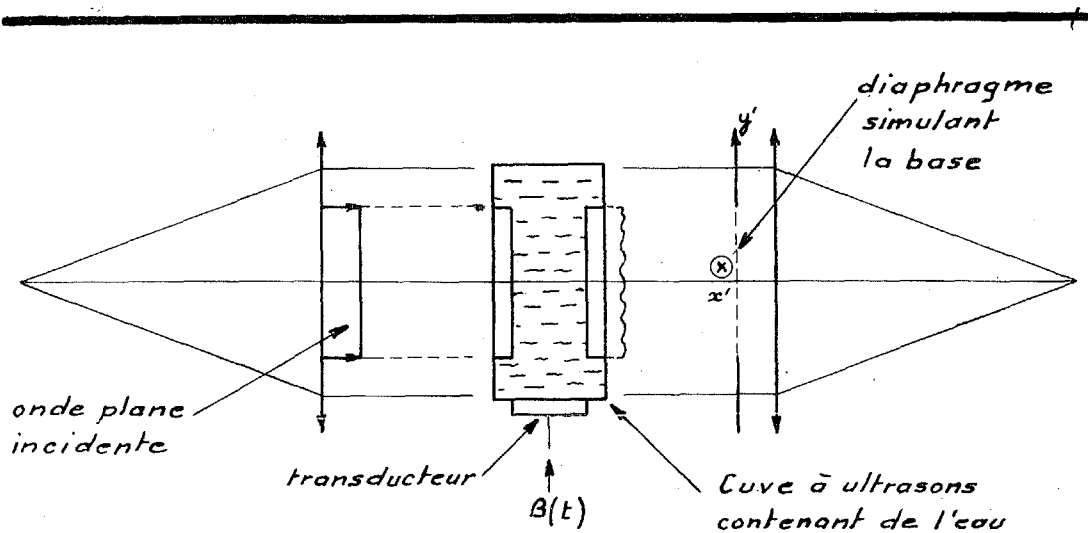
4.5.- Influence des défauts de phase

On introduit les défauts de phase, que l'on peut contrôler, par l'intermédiaire d'une cave à ultrasons. L'onde de pression provoque une variation d'indice du milieu, donc du chemin optique parcouru, et module ainsi la phase de l'onde lumineuse.

On peut obtenir, par ce moyen, des variations de phase atteignant 20°



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE



Le transducteur résonne dans une bande de 1 MHz autour de 16 MHz.

Le déphasage introduit par une variation d'indice $\Delta\mu$ est :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} l \Delta\mu \sin\left(2\pi f^* \frac{y'}{v}\right) \quad f^* = 16 \text{ MHz}$$

l = longueur du transducteur

v = vitesse du son dans l'eau.

Si, en l'absence de l'antenne mais avec la cuve et le transducteur excité, on observe, dans le plan focal, un lobe principal et deux lobes diffractés correspondant à la fréquence de 16 MHz, le rapport des amplitudes est :

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{\pi l \Delta\mu}{\lambda_0}$$

donc
$$\varphi_{\max} = \frac{2a_1}{a_0} = 2\sqrt{\frac{I_1}{I_0}}$$

Donc la mesure de $\frac{I_1}{I_0}$ donne la valeur du déphasage.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

On fait les mesures pour 16 MHz $\psi_{\text{max}} = 18^\circ$
 $15,5 \text{ MHz}$ 18°
 $16,75 \text{ MHz}$ 18°

5.- RESULTATS DES MANIPULATIONS5.1.- Antenne pleine

5.1.1.- Diagramme de directivité et index

Les figures 3, 4 et 5 montrent respectivement les diagrammes de directivité pour 15 KHz - 10 KHz et 5 KHz .

D en fonction de la fréquence est montré sur la courbe N° I en annexe.

D en fonction de l'orientation du lobe principal ; on fait les mesures à 4 KHz et les résultats sont portés sur le tableau suivant :

ψ_0	0	10	20	30	60
0	38,3	38,6	38,3	38,2	36,1
10°	38,3	38,4	38,6	38,4	
20°	38,7	38,5	38,6		
30°	38,7	38,8	38,6		
$10 \log \cos \psi_0$	0	0,06	0,26	0,6	3

On retrouve la variation de D en $10 \log \cos \psi_0$.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

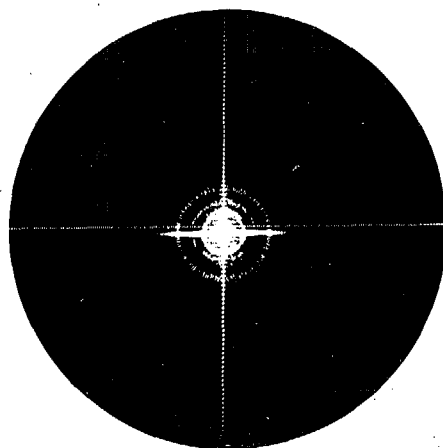


Fig. 3 - Diagramme de directivité de
l'antenne pleine pour 15 kHz.

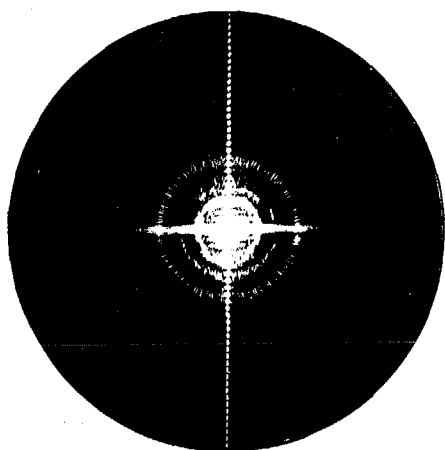


Fig. 4 - Pour 10 kHz

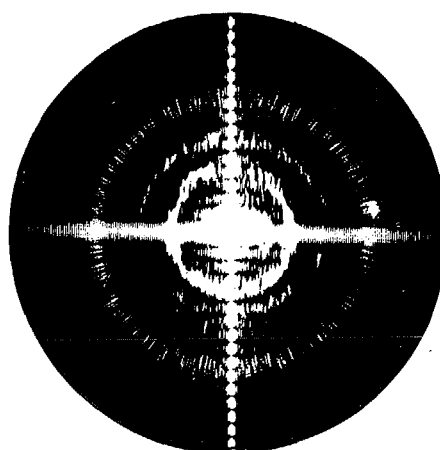


Fig. 5 - Pour 5 kHz.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

5.1.2.- Influence des défauts de phase

La diminution de l'index de directivité pour des variations de phase de 18° est la suivante :

à 16 MHz	$\Delta D = 0,9$ dB
15,5 MHz	$\Delta D = 0,2$ dB
16,75 MHz	$\Delta D = 0,6$ dB.

La différence apportée par ces déphasages est à la limite des précisions de nos mesures. on peut dire qu'elle est inférieure à 1 dB.

5.1.3.- Conclusion

- 1.- L'index de directivité est très proche du résultat théorique.
- 2.- L'orientation du lobe principal fait varier D comme $10 \log \cos \psi_0$.
- 3.- Des défauts de phase inférieurs à 20° introduisent une erreur négligeable sur la mesure de l'index.

5.2.- Antenne lacunaire5.2.1.- Méthode de mesure

Les méthodes de mesure sont les mêmes que pour l'antenne pleine.

Mais nous avons dû introduire une petite différence. du fait que la surface des trous était faible par rapport à la surface totale de l'antenne et. la plaque photographique n'étant pas suffisamment opaque entre les trous, l'index de directivité mesuré directement était entaché d'une erreur systématique.

Nous avons contourné la difficulté en faisant les mesures autour d'un lobe image.

Nous avons fait la mesure de K en fonction de la direction du lobe principal à 8 kHz donc avec $\frac{F_a}{b} = 1,5$ mm. et nous avons introduit les mêmes dépointages que sur l'antenne pleine.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

5.2.2.- Photographie du diagramme de directivité

La figure 6 est une photographie prise dans le plan focal dans le rapport 1. tout l'espace s'y trouve simulé pour des fréquences allant jusqu'à 144 kHz.

Les figures 7, 8 et 9 représentent tout l'espace pour les fréquences :
24 kHz, 16 kHz, et 8 kHz.

5.2.3.- Mesure de D en fonction de la fréquence : c'est

la courbe II donnée en annexe. D tend vers 26,5 dB.

Pour des trous rayonnant de façon omnidirectionnelle, la limite théorique serait de $10 \log N = 25,9$ dB.

Pour des trous rayonnant en $\cos \varphi \cos \Psi$, cette limite serait de :

$$10 \cdot \log \frac{\pi}{2} N = 27,9 \text{ dB}$$

La limite mesurée est inférieure de 1,4 dB à la limite théorique, cela s'explique très bien.

5.2.4.- Mesure de D à 8 kHz en fonction de l'orientation du lobe principal.

Les mesures sont faites à 8 kHz. L'index de directivité est exprimé en dB.

$\varphi_0 \backslash \Psi_0$	0°	10°	20°	30°	60°
0	26	25,8	25,5	25,25	22,8
10	26	25,85	25,6	25,3	
20	26,05	25,9	25,6	25,3	
30	26,6	25,75	25,65	25,3	
$10 \log \cos \Psi_0$	0	0,06	0,26	0,6	3



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

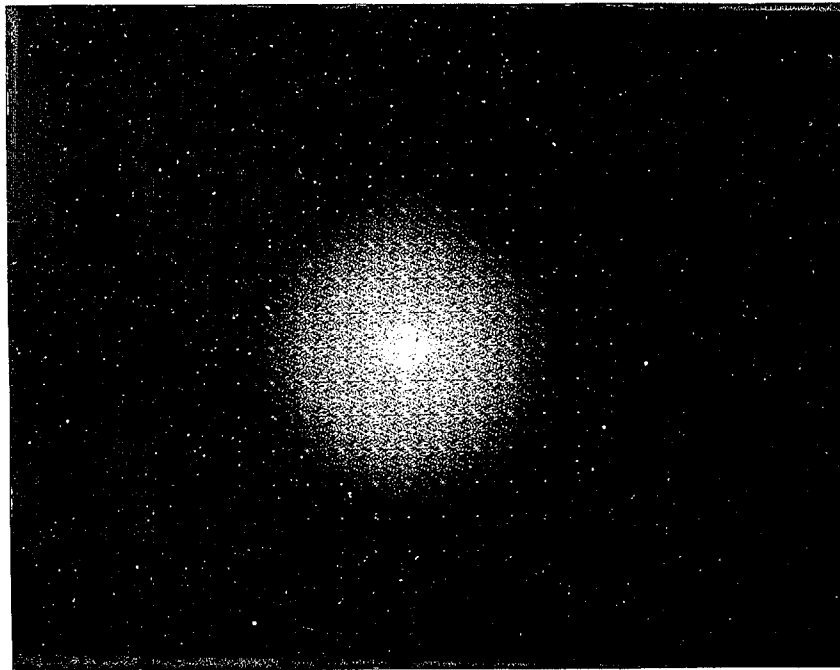


Fig. 6 - Photographie en rapport 1. de la figure de diffraction obtenue dans le plan focal de la lentille. Nous avons ici le diagramme de directivité de l'antenne lacunaire dans tout l'espace jusqu'à 141 kHz.

SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

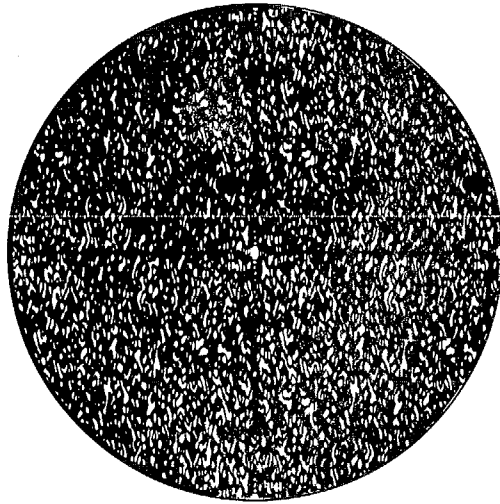


Fig. 7 - Diagramme de directivité de
l'antenne lacunaire pour 24 kHz.

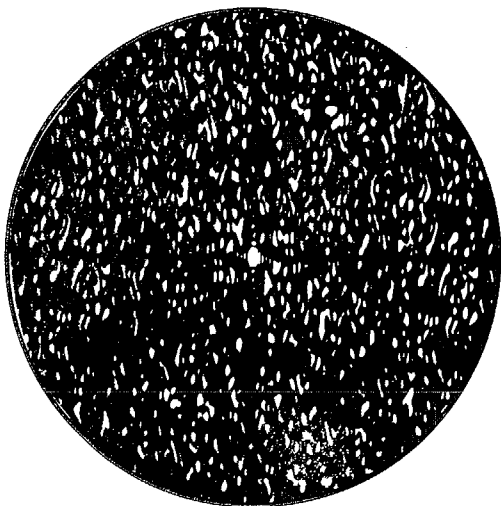


Fig. 8 - Pour 16 kHz.

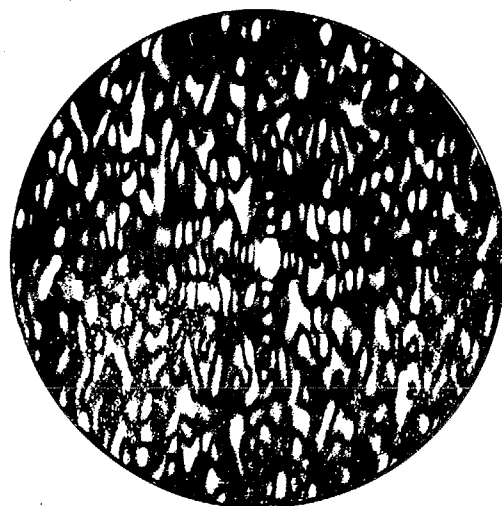


Fig. 9 - Pour 8 kHz.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

5.2.5.- Influence des défauts de phase

pour 16 MHz	$\varphi = 18^\circ$	$\Delta D = - 0,1 \text{ dB}$
15,5 MHz		$\Delta D = - 0,5 \text{ dB}$
16,3 MHz		$\Delta D = - 0,4 \text{ dB}$

La diminution de directivité est inférieure au dB.

5.2.6.- Conclusion

De toutes ces mesures on peut tirer les conclusions suivantes :

1/ L'index de directivité de l'antenne lacunaire est de :

$10 \log \frac{2\pi S}{\lambda^2}$ aux basses fréquences et $10 \log \frac{\pi}{2} N$ aux fréquences élevées qui sont les valeurs théoriques.

La largeur du lobe principal, donc le pouvoir de résolution, correspond à celui d'une antenne pleine : l'effet principal de la réduction du nombre d'éléments est une augmentation du niveau des lobes secondaires qui, dans le cas étudié, est de l'ordre de :

$$x - 20 \text{ dB}$$

2/ L'orientation du lobe principal fait varier D en $10 \log \cos \psi_0$

3/ Les défauts de phase inférieure à 20° introduisent une diminution négligeable de l'index.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

6.- ETUDE DES ANTENNES EN CHAMP PROCHE6.1.- Généralités

Une deuxième partie de l'étude consiste à mesurer, non plus l'index de directivité des antennes à l'infini, mais en champ proche.

Le montage est exactement le même que le précédent, restait à trouver la relation qui liait la position du plan de mesure optique, et la distance équivalente à l'antenne réelle.

Soit d_a , la distance acoustique entre antenne et le plan de mesure de l'index.

d'_o , la distance qui sépare le plan de la lentille intégratrice, du plan de mesure optique.

d_o , son homologue en absence de lentille intégratrice.

Les lois de l'optique géométrique lient d_o et d'_o par $d'_o = \frac{F d_o}{F - d_o}$

Les lois de la diffraction en champ proche lient d_a et d_o par :

$$d_a = \frac{a^2}{b} d_o$$

6.2.- Antenne pleine

Nous faisons les mesures à 4 kHz, en faisant varier la distance entre plan de mesure et antenne, de l'infini à 300 m. Pour ces distances là, les angles sont encore très petits et on peut estimer comme une bonne approximation de garder toujours pour l'intensité moyenne dans le demi-espace, la mesure faite à l'infini.

La courbe n° 3 de l'annexe donne D en fonction de la distance vraie.

On constate que le début de la chute de l'index de directivité se fait à 1.500 m, et si nous faisons le calcul de la limite théorique du champ proche et du champ lointain, nous trouvons $\frac{D^2}{\lambda} = \frac{(30)^2}{0,375} = 2.400m$

En annexe 5 une série de courbes fait la comparaison du lobe principal à différentes distances de l'antenne.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

6.3. - Antenne lacunaire

Nous faisons les mesures à 8 kHz entre 34 m et 300 m.
Ces mesures sont portées sur la courbe n° 4 en annexe.

7 - PERSPECTIVES D'AVENIR

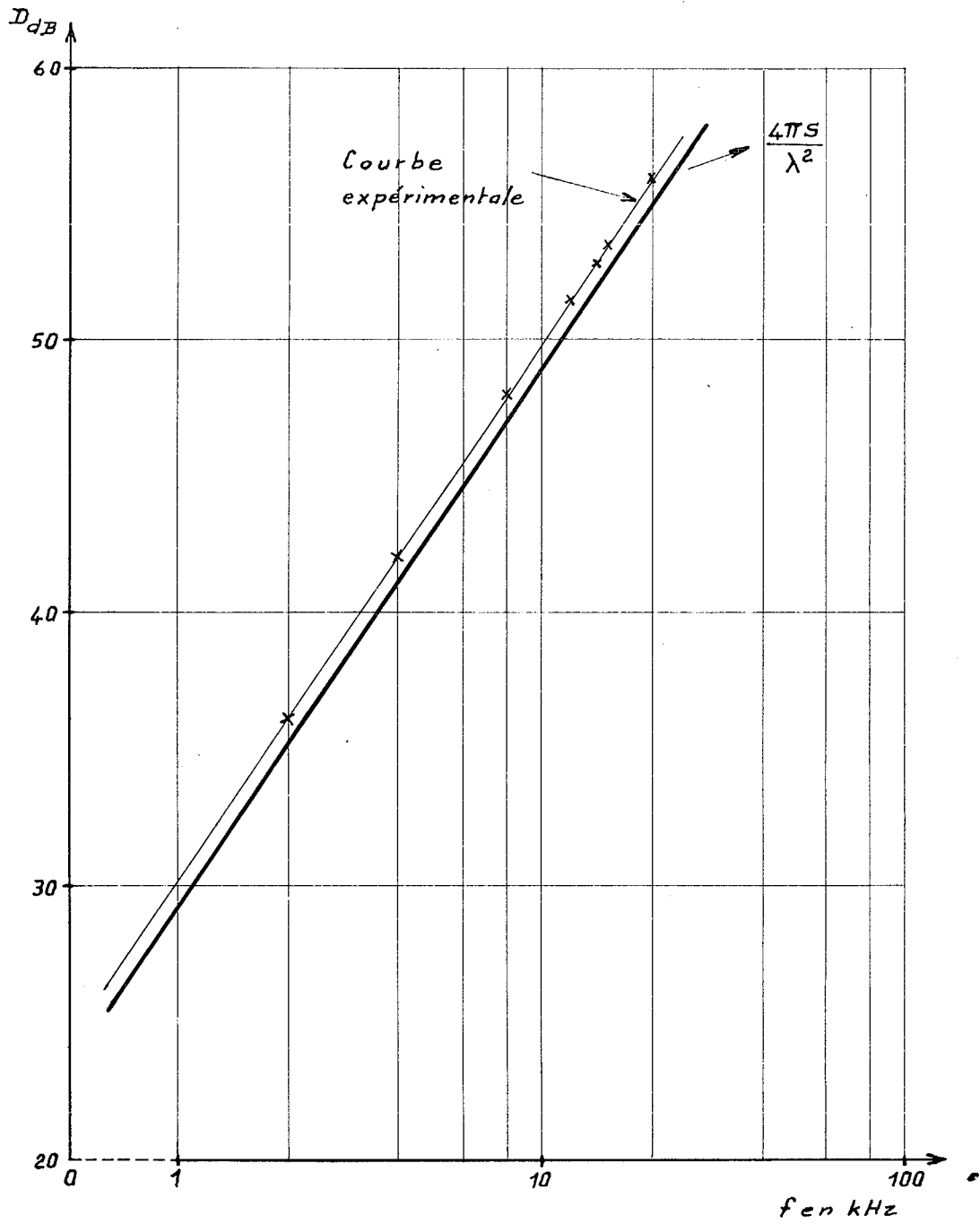
L'ensemble des mesures réalisées sur l'antenne pleine et l'antenne lacunaire a vérifié la validité de cette simulation optique qui permet de mesurer l'index de directivité d'antennes planes quelconques avec une précision meilleure que 1 dB.

D'autres types d'antennes pourraient aisément être étudiés.

Ces mesures ont mis une fois encore en évidence l'intérêt des antennes lacunaires dont le pouvoir séparateur correspond à l'antenne pleine et dont l'index de directivité est choisi indépendamment, dans la mesure où il est inférieur à $10 \log \frac{2\pi S}{\lambda^2}$, en jouant sur le nombre d'éléments.



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

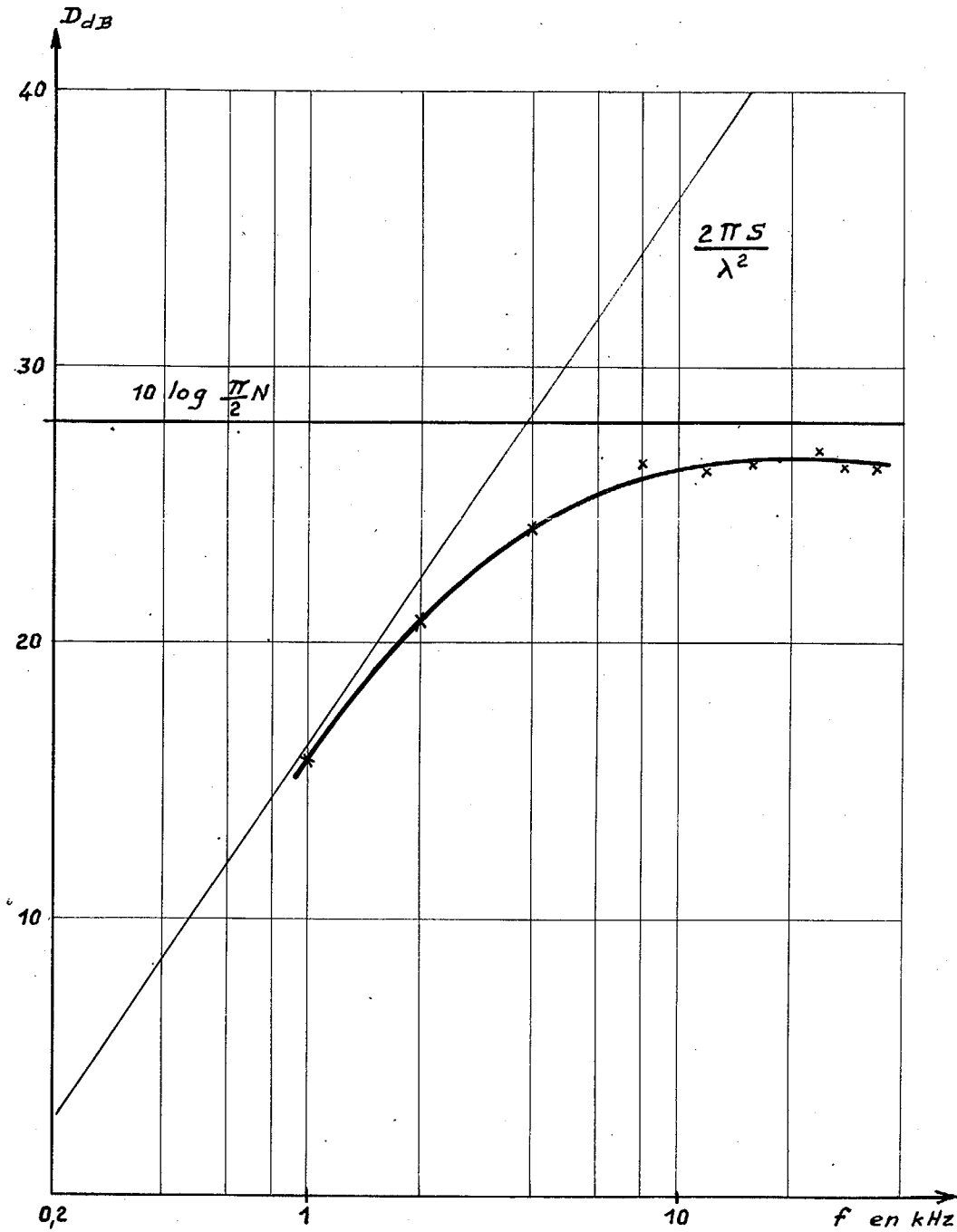
ANTENNE PLEINE

Courbe : 1



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

ANTENNE LACUNAIRE



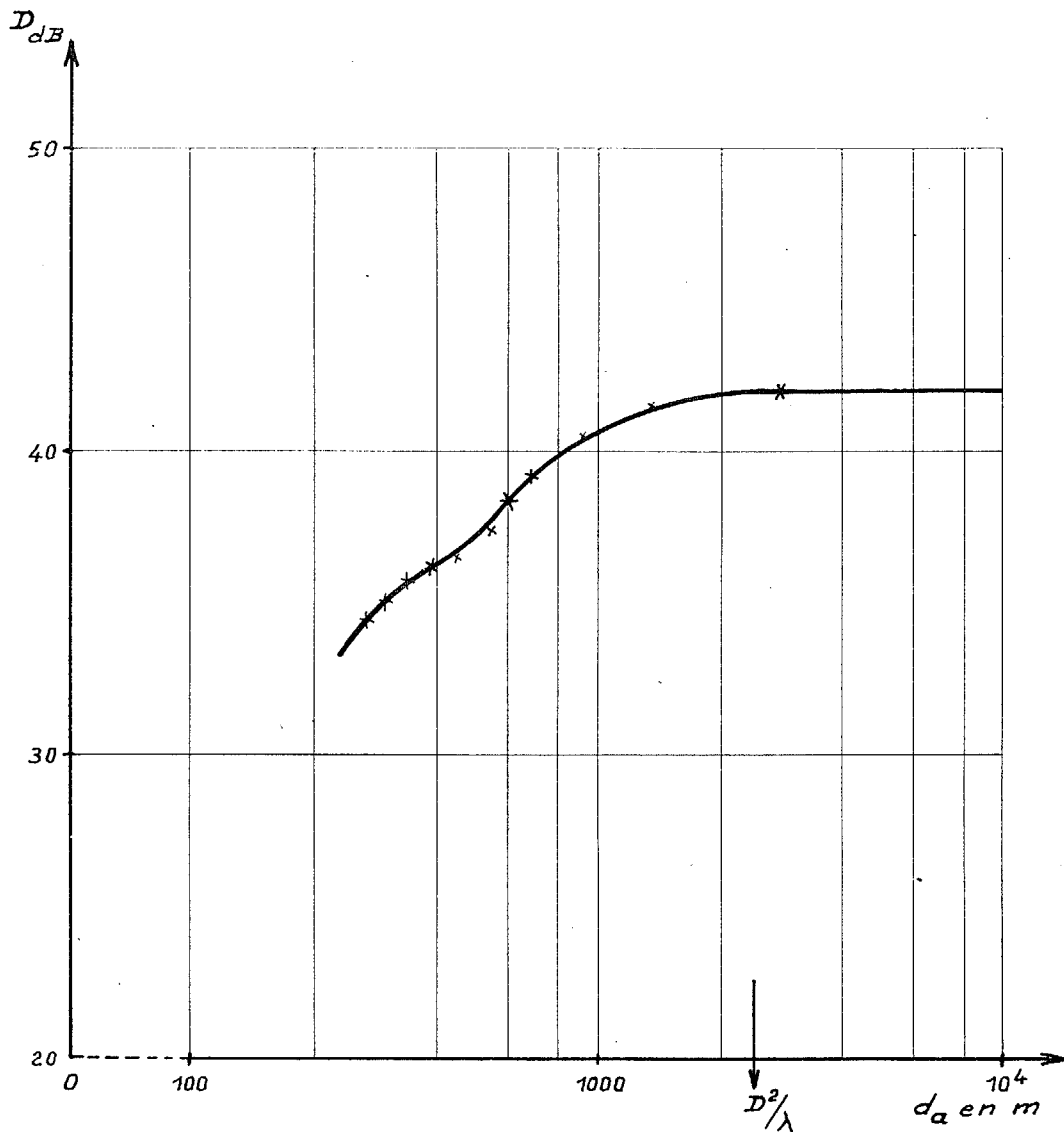
Index de Directivité en fonction de la fréquence

$N = 400$ trous

Courbe : 2



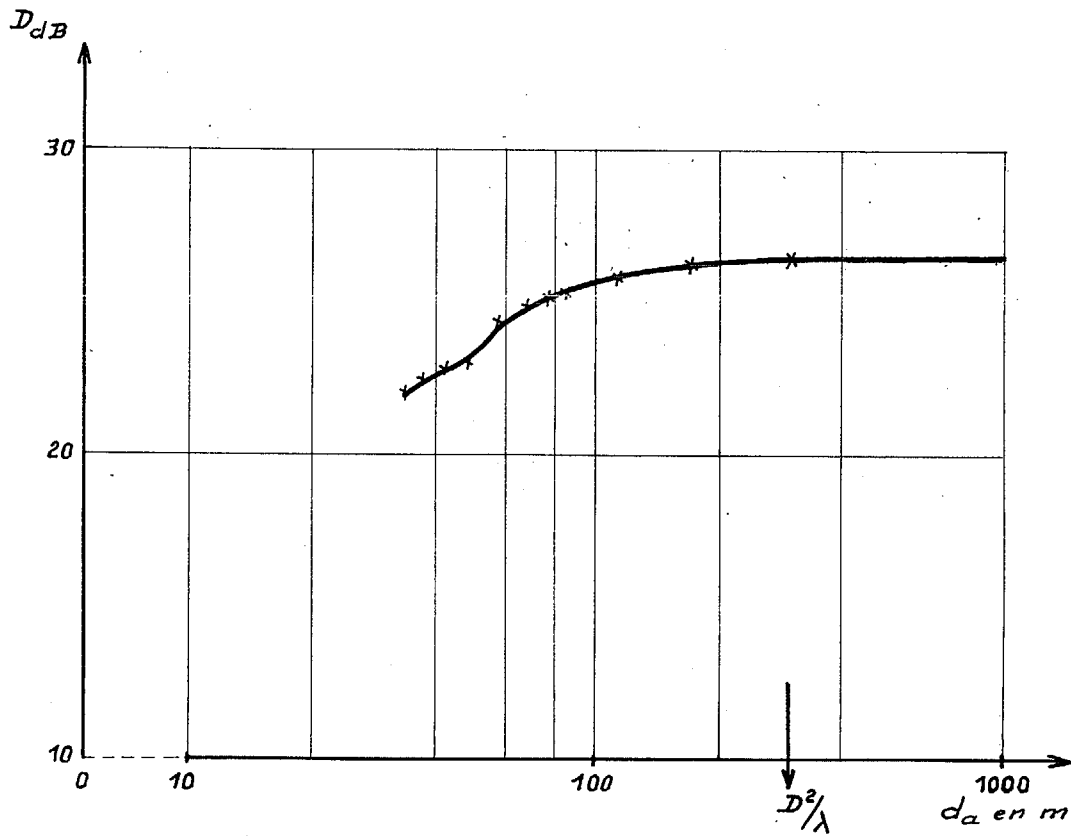
SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

ANTENNE PLEINE*Courbe : 3*



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

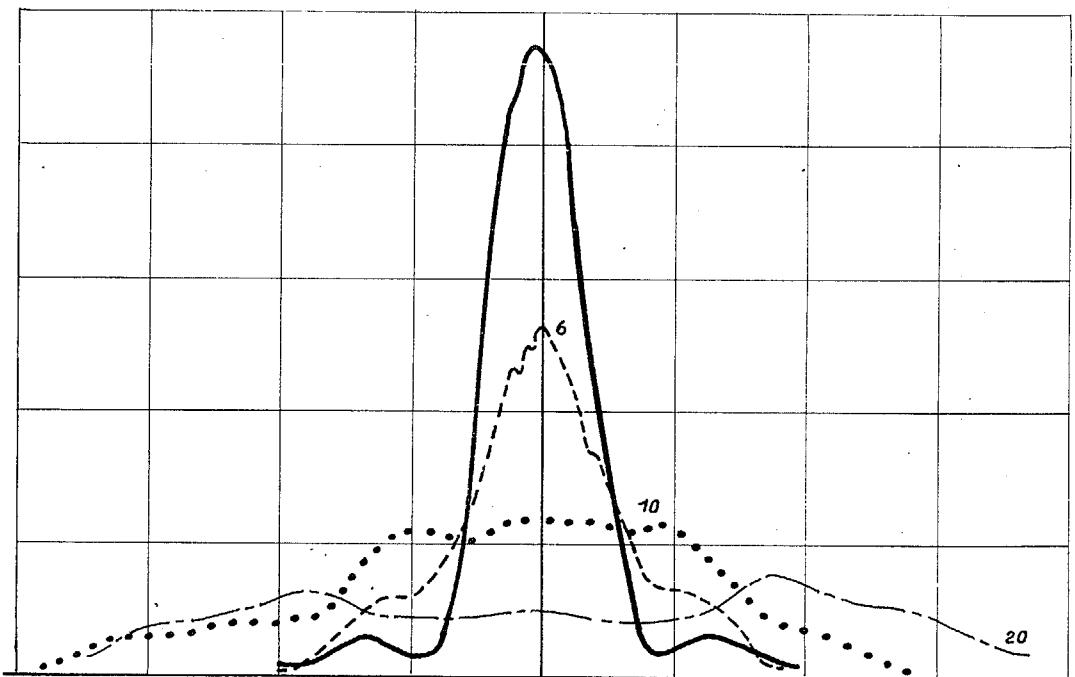
ANTENNE LACUNAIRE



Courbe : 4



SIMULATION OPTIQUE D'ANTENNE PLANE

ANTENNE PLEINE

Coupe du lobe principal
pour différentes distances à l'antenne

- distance supérieure à 2400 m
- distance égale à 900 m
- distance égale à 540 m
- .-.-.- distance égale à 270 m

Courbe : 5