

1. Congrès européen de cinéradiographie par photons  
ou particules.  
Paris, France - 19 - 21 Mai, 1981.  
CEA - CONF 5733

FR 810 1547

## IMAGERIE X PAR OUVERTURE DE CODAGE APPLIQUEE

### AUX PLASMAS CREES PAR LASER

N. FLEUROT\*, J.P. GEX\*, R. SAUNEUF\*, N. de BEAUCOUDRAY\*\*

\*C.E.A./C.E.L. - B.P. n° 27 - 94190 VILLENEUVE-SAINT-GEORGES, FRANCE

\*\*I.O.T.A., Faculté des Sciences, Bât. 503 - 91406 ORSAY, FRANCE

## I - INTRODUCTION

L'analyse des phénomènes qui se produisent au sein des microplasmas créés par laser s'effectue souvent à partir des images obtenues à l'aide des rayonnements X et des particules  $\alpha$  qu'ils émettent.

La chambre à sténopé est un appareil largement utilisé pour ce type de diagnostics mais le nombre de photons ou de particules collectés, donc le rapport signal sur bruit (S/B) décroît lorsque la résolution augmente. Des optiques à miroirs /1-2/ sont également utilisées mais elles ne sont valables que pour les rayons X et l'état de surface des miroirs disponibles limite le domaine spectral utile à des énergies inférieures à 5 keV. Pour améliorer ce rapport S/B, il est possible d'utiliser une ouverture de codage (ou codeur) /3-5/ dont la surface utile est beaucoup plus grande que celle du sténopé donnant la même résolution.

## II - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT /6/

La figure 1 montre le schéma de principe du codage. Codeur et détecteur sont plans et parallèles entre eux.

Chaque point de l'objet projeté, sur le détecteur, l'ombre du codeur qui est une figure homothétique de ce codeur. La dimension et la position de cette ombre dépendent de la position du point dans l'espace ce qui donne donc une information tridimensionnelle.

### II.1. Objet plan

Appelons  $C(x,y)$  la transmission du codeur et  $O(x,y)$  la luminance d'un objet plan parallèle au codeur pour des photons monoénergétiques : l'éclairement  $I(x,y)$  sur le détecteur s'exprime, en faisant abstraction

des facteurs de grandissement, par le produit de convolution

$$I(x,y) = O(x,y) * C(x,y) \quad (\text{Eq 1})$$

L'image formée sur le détecteur est une image codée. Pour reconstruire l'image vraie de cet objet plan, il faudrait effectuer la convolution de I par une fonction F telle que

$$C * F = \delta \quad (\delta = \text{distribution de Dirac bidimensionnelle}) \quad (\text{Eq 2})$$

Dans l'espace de Fourier nous aurions alors :

$$\tilde{C}(\nu,\mu) \cdot \tilde{F}(\nu,\mu) = 1 \quad (\text{Eq 2'})$$

$$\text{et } \tilde{O}(\nu,\mu) = \tilde{I}(\nu,\mu) \cdot \tilde{F}(\nu,\mu) \quad (\text{Eq 3})$$

où le signe  $\sim$  indique la transformée de Fourier bidimensionnelle de la fonction considérée.

De façon pratique, nous savons que ce traitement n'est pas possible à cause des zéros de la fonction  $\tilde{C}$ . Nous avons donc remplacé  $\tilde{F} = 1/\tilde{C}$  par

$$\tilde{F}_\epsilon = \tilde{C} / (\tilde{C}^2 + \epsilon) \quad (\text{Eq 4})$$

qui s'appelle un pseudo-filtre de Wiener où  $\epsilon$  est le "facteur de bruit". Ainsi l'image plane reconstruite est définie par

$$\tilde{O}_\epsilon = \tilde{I} \cdot \tilde{F}_\epsilon \quad (\text{Eq 3'})$$

reliée à  $\tilde{O}$  par :

$$\tilde{O}_\epsilon = \tilde{O} \cdot \tilde{C} \cdot \tilde{F}_\epsilon = \tilde{O} \cdot \tilde{M}_\epsilon \quad (\text{Eq 5})$$

$$\text{avec } \tilde{M}_\epsilon = \tilde{C}^2 / (\tilde{C}^2 + \epsilon) \quad (\text{Eq 6})$$

$\tilde{M}_\epsilon$  est la fonction de transfert de modulation (F.T.M.) de l'ensemble du procédé (codage + reconstruction).

## II.2. Objet tridimensionnel

Chaque plan P parallèle au codeur, va former une image codée  $I_p$  qui devrait permettre la reconstruction d'une image plane vraie  $O_{EP}$ . Cependant toutes les images codées  $I_p$  se superposent et la capacité du procédé à reconstruire une image  $O_{EP}$  à partir de l'image codée globale dépend du codeur utilisé. Nous l'avons appelé capacité tomographique ou plus simplement tomographie et nous en reparierons lors de l'examen des possibilités du codeur que nous avons choisi.

## III - CODEUR ANNULAIRE

### III.1. Considérations théoriques

Nous avons choisi un codeur simple formé d'une fente circulaire /6-8/ découpée dans une feuille mince opaque aux rayonnements considérés. Sa largeur est  $\delta_0$  et son rayon moyen  $R_0$ . Nous l'appellerons par la suite plus simplement "anneau". La figure 2 montre la F.T.M. d'un tel codeur : l'enveloppe de cette fonction est semblable à celle d'une optique utilisée dans le domaine visible et le coupage de toutes les fréquences spatiales est pratiquement uniforme.

Rapportée à l'objet, supposé plan et parallèle au codeur, la résolution transversale  $\delta_t$  est voisine de  $\delta_o$ . Dans le cas d'un objet formé de deux plans parallèles distants entre eux de la valeur  $x$ , le procédé permet de les distinguer si  $x > \delta_l$  où  $\delta_l$  est la résolution longitudinale ou résolution tomographique. Tout objet tridimensionnel dont l'épaisseur  $e$  sera inférieure à  $\delta_l$  sera restitué comme s'il était plan. Par contre si  $e \gg \delta_l$ , il sera possible de le considérer comme formé de tranches successives d'épaisseur voisine de  $\delta_l$ , indépendantes les unes des autres et qui pourront être représentées chacune par une image vraie. Ce procédé permet donc d'obtenir des "coupes" d'un objet épais.

Sur la figure 2, la F.T.M. a été limitée à la première fréquence de coupure  $1/\delta_o$  mais il est possible d'étendre cette F.T.M. si l'anneau a des bords bien francs. Dans ce cas, les deux résolutions  $\delta_t$  et  $\delta_l$  peuvent être améliorées d'un facteur  $k$  de l'ordre de 2 à 3 selon l'intensité du rayonnement incident et l'on aura :

$$\delta_t \approx \delta_o / k \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\delta_l \approx \delta_t \cdot \lambda_1 / R_o \quad (\text{Eq. 8})$$

Avec un anneau, la reconstruction ne peut se faire que par calcul sur ordinateur, l'image codée étant préalablement numérisée point par point.

### III.2. Réalisation pratique et tests

La figure 3 montre un "anneau" fabriqué industriellement. Il a été réalisé par électrodéposition de la couche d'or sur une feuille de nickel poli, la fente circulaire étant obtenue en laissant sur le nickel une zone annulaire de résine insolée, huit bras de faible largeur reliant le disque central à la couronne extérieure. Une fois l'or déposé, la feuille de nickel est découpée par attaque chimique pour laisser un simple anneau permettant la manipulation du codeur.

La mire utilisée pour tester les performances du dispositif était une grille métallique de périodicité  $12 \mu\text{m}$  (figure 4) éclairée en transmission par un tube à rayons X classique et le détecteur un film Kodirex. Un grandissement de 20 environ a été choisi pour s'affranchir du grain du film. Le cliché obtenu (figure 5) a été numérisé sur un microdensitomètre Perkin-Elmer (256 niveaux) sous forme d'une matrice de  $1024 \times 1024$  éléments. Dans un premier temps le programme calcule une transformée de Fourier réduite de  $128 \times 128$  valeurs complexes enregistrées sur bande magnétique. Dans un deuxième temps il effectue le filtrage puis une transformation de Fourier qui reconstruit l'image sous forme d'une matrice de  $128 \times 128$  valeurs. Ce deuxième calcul nécessite l'introduction d'un paramètre FT appelé "facteur tomographique" qui agit comme la mise au point lors de la formation d'une image en optique visible.

La figure 6 montre le résultat obtenu par ce procédé : on peut voir que la résolution est certainement meilleure que  $10 \mu\text{m}$  et qu'elle doit se situer près de la valeur théorique de  $6 \mu\text{m}$ . Comme la taille des cellules de numérisation, rapportée à l'objet, est de l'ordre de  $2,5 \mu\text{m}$ , l'on ne peut pas espérer mettre en évidence une meilleure résolution sans diminuer cette taille donc augmenter celle de la matrice de numérisation ce qui conduit également à augmenter le temps de calcul et surtout à modifier le programme pour que l'ordinateur puisse traiter une telle matrice.

### III.3. Utilisation sur chambre d'interaction laser-matière

Nous avons obtenu quelques clichés à partir de plasmas créés par laser à l'aide d'un dispositif comportant un "anneau" et un film. La figure 7 montre l'image d'un plasma métallique (cible plane) : le laser délivrait 2 impulsions de 80 ps séparés de 300 ps d'où la présence de 2 points chauds, l'un au voisinage de la cible, l'autre sur le plasma déjà détendu. La figure 8 montre les deux zones émissives coeur-couronne lors de l'implosion d'un microballon de verre rempli de deutérium dans une expérience d'interaction à huit faisceaux.

Ces images montrent l'intérêt de cette méthode d'imagerie. D'une part, la densité optique du cliché est beaucoup plus forte que celle obtenue avec un sténopé de même résolution (diamètre  $d_0$ ) ce qui permet d'obtenir de bons enregistrements alors que le sténopé ne donnerait aucune information ; d'autre part, chaque point de l'objet éclaire une zone beaucoup plus grande d'où un meilleur rapport S/B. De plus, si les conditions géométriques le permettent ( $R_0/\lambda_i$  élevé), il peut donner un effet tomographique notable.

#### IV - CODEUR MONOFREQUENTIEL

Nous avons vu que la F.T.M. d'un "anneau" était correcte pour presque toutes les fréquences spatiales de 0 à  $1/\delta_0$  et même au-delà, permettant ainsi la reconstruction d'images dans lesquelles aucune fréquence spatiale n'est privilégiée. Or les plasmas sont, en général, le siège d'instabilités, ce qui se traduit souvent par une structure périodique dont les fréquences spatiales peuvent être calculées à l'avance. Il peut donc être intéressant de mettre en évidence cette structure en utilisant un codeur privilégiant certaines fréquences.

Un codeur formé d'une série d'anneaux concentriques ou "multi-anneau" possède cette propriété /9/. Pour favoriser la fréquence  $\rho_0$ , la largeur optimale de chaque anneau doit être  $\delta_0 = \frac{1}{2\rho_0}$  et l'espacement entre les rayons moyens des anneaux doit être  $\Delta R = 1/\rho_0$ . Le gain en rapport S/B d'un "multi-anneau" par rapport à l'anneau est de l'ordre de  $\sqrt{N}$ , N étant le nombre d'anneaux du codeur. La figure 9 représente la fonction de transfert d'un "multi-anneau". En dehors des très basses fréquences, seule une bande étroite autour de la fréquence choisie ( $50 \text{ mm}^{-1}$ ) participera à la reconstruction de l'image. La largeur de cette bande dépend d'ailleurs du nombre d'anneaux et de leur répartition et elle peut être adaptée au problème posé.

#### V - CONCLUSION

Bien que peu développée actuellement cette méthode d'imagerie, utilisable avec les rayons X ou les particules  $\alpha$  est très prometteuse. Elle souffre d'un défaut propre aux traitements d'images faisant intervenir les transformées de Fourier, à savoir la grande quantité de données à traiter et le temps de calcul. Seul un processeur parallèle permettrait de banaliser ce procédé. Associé à un détecteur formé d'une matrice de cellules détectrices, il pourrait fournir des coupes du plasma dans un délai de quelques minutes.

REFERENCES

- /1/ Calibrated "four color" X-ray microscope for laser plasma  
F. SEWARD, J. DENT, M. BOYLE, L. KOPPEL, T. HARPER, P. STOERING  
and A. TOOR (LLL)  
Rev. Sc. Instr. 47 (1976) p. 464
- /2/ Imaging characteristics of an axysymmetric, grazing incidence X-ray  
microscope designed for laser fusion research  
M.J. BOYLE, and H.G. AHLSTROM (LLL)  
Rev. Sc. Instr. 49 (1978) p. 746
- /3/ Fresnel transformations of images  
L. MERTZ and N.O. YOUNG  
Proc. Int. Conf. Opt. Instr., LONDON (1961) Chapman and hall p. 305
- /4/ Zone-plate coded imaging of laser-produced plasmas  
N.M. CEGLIO, D.T. ATTWOOD and E.V. GEORGE (LLL)  
J. Appl. Phys. 48 (1977) p. 1566
- /5/ High order pseudo-holography using zone plates  
J. GUR  
Report N° 84, LLE - UNIVERSITY of ROCHESTER (Dec. 1978)
- /6/ Micro-coded aperture imaging applied to laser plasma diagnosis  
J. BRUNOL, R. SAUNEUF, and J.P. GEX  
Optics Communications 31 (1979) p. 129
- /7/ An aperture imaging system with instant decoding and tomography  
capabilities  
P.H. WALTON  
J. Nucl. Med. 14 (1973) p. 861
- /8/ Bruit multiplex en gammagraphie par codage  
J. BRUNOL and F. FONROGET  
Optics Communications 22 (1977) p. 301
- /9/ Codes monofréquentiels dans l'imagerie des plasmas laser  
N. de BEAUCCUDRAY, J. BRUNOL, R. SAUNEUF  
OPTICA ACTA, 28 (1981) p. 313-324.

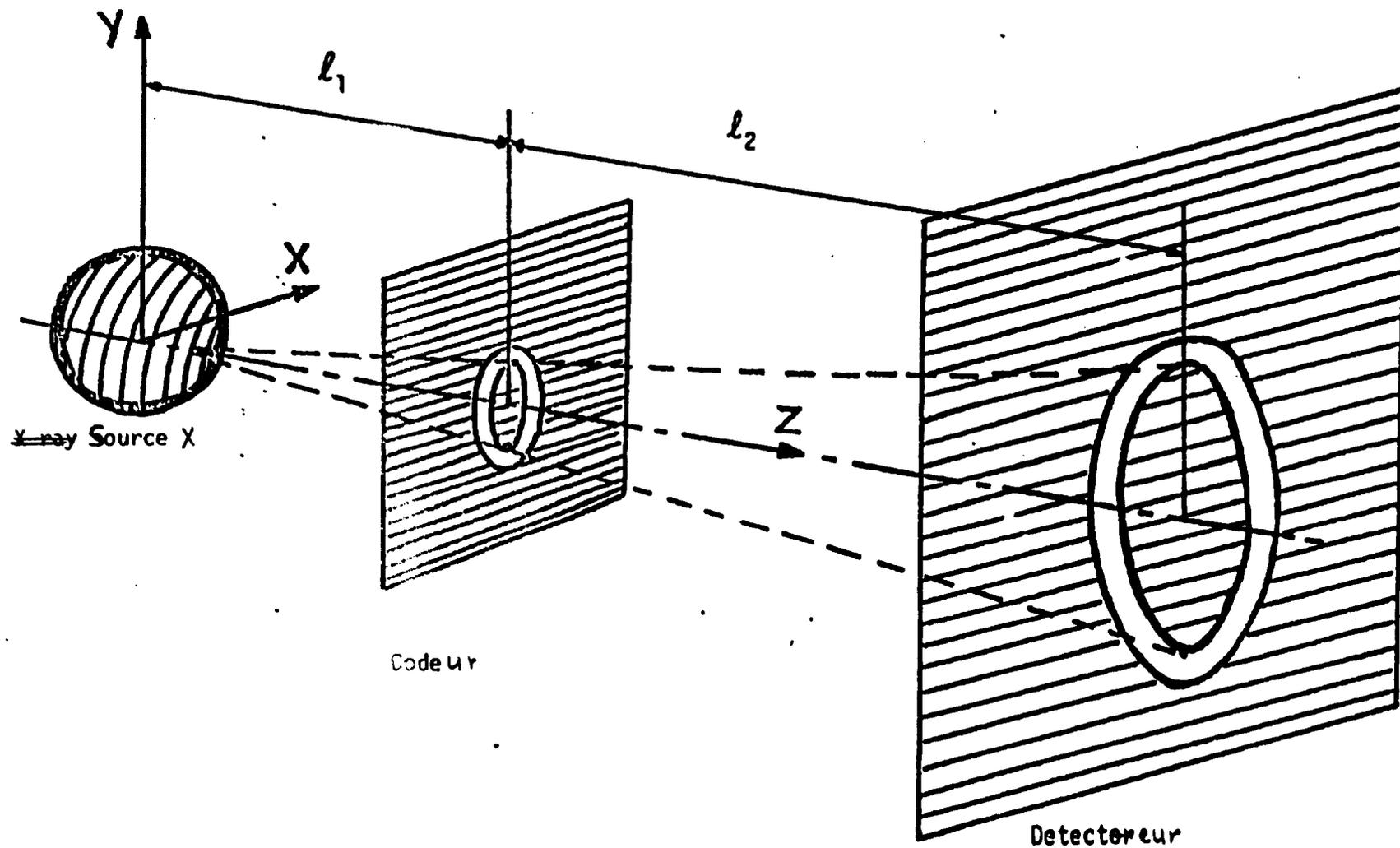


FIGURE 1 : ~~CODED APERTURE IMAGING~~ : GENERAL PRINCIPLE

*Schéma de principe de l'imagerie par ouverture de codage*

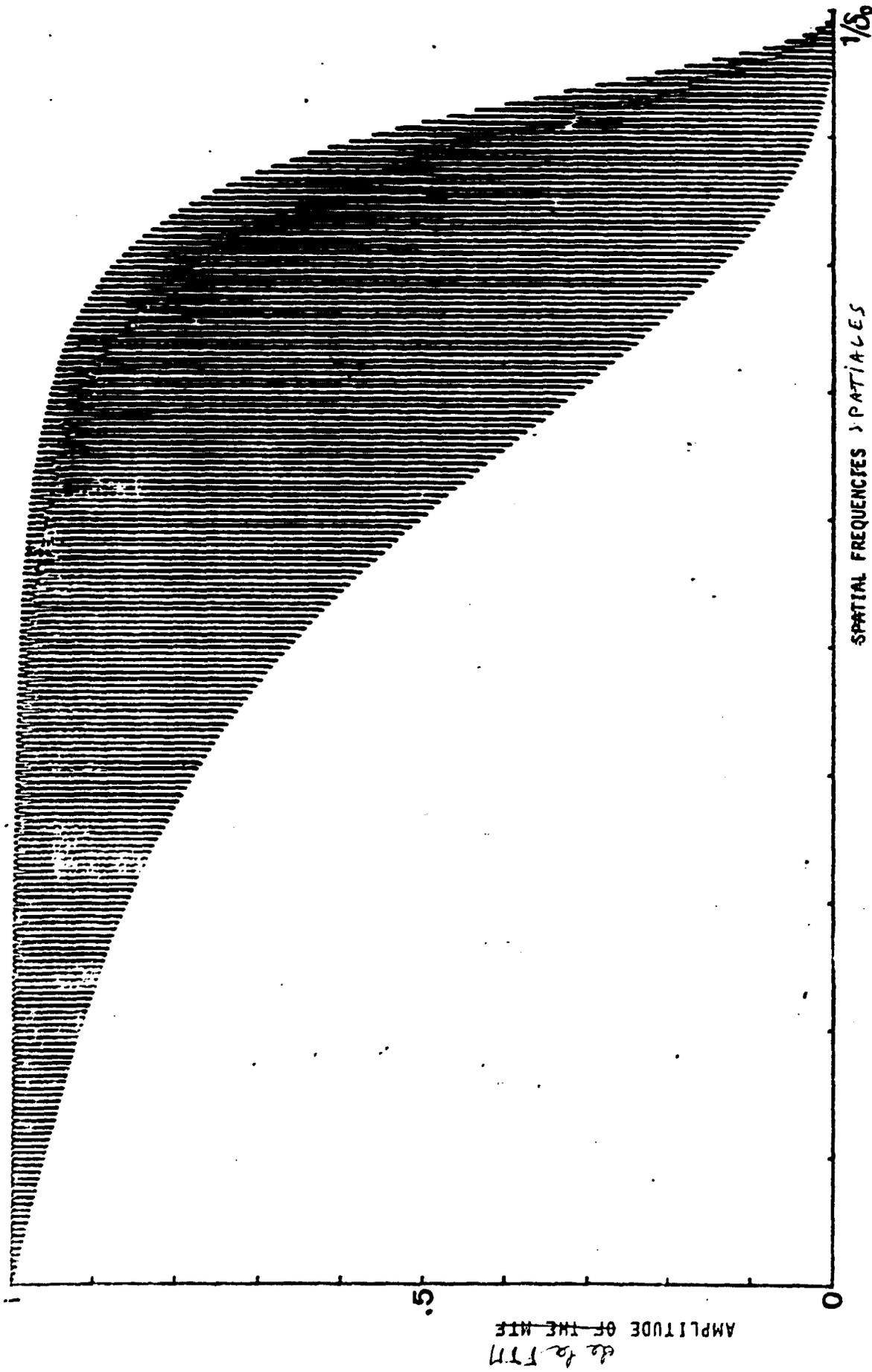


FIGURE 2 : MODULATION TRANSFER FUNCTION (M-T-F) FOR AN ANNULAR APERTURE ( $\xi = 10^{-4}$ )

fonction de transfert de modulation (FTM) d'un "anneau" ( $\xi = 10^{-4}$ )

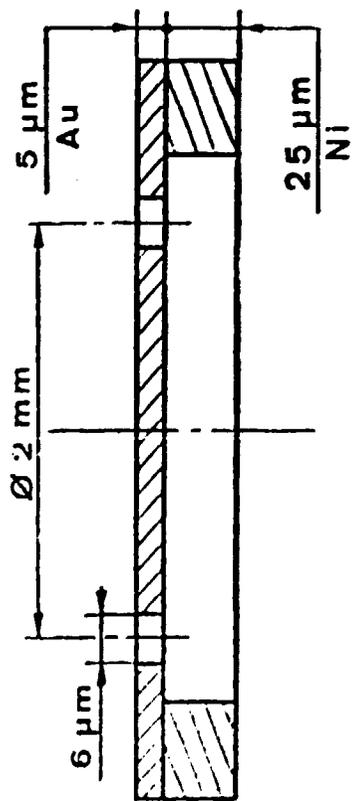


FIGURE 3 : PRACTICAL REALISATION OF AN ANNULAR APERTURE (VIEW WITH SCANNING ELECTRON MICROSCOPE).

*Codex à fente annulaire (schéma et vue au microscope électronique à balayage)*

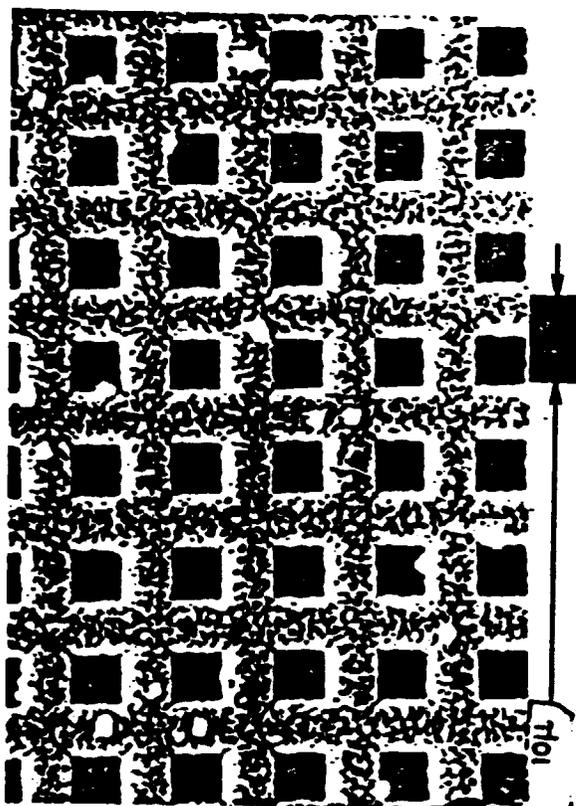


FIGURE 4 : METALLIC GRID ( $3 \mu\text{m}$  THICK AG) USED AS TEST OBJECT (VIEW WITH SCANNING ELECTRON MICROSCOPE).

*Grille métallique (Ag ép 3µm) utilisée comme objet de test (vue au microscope électronique à balayage)*

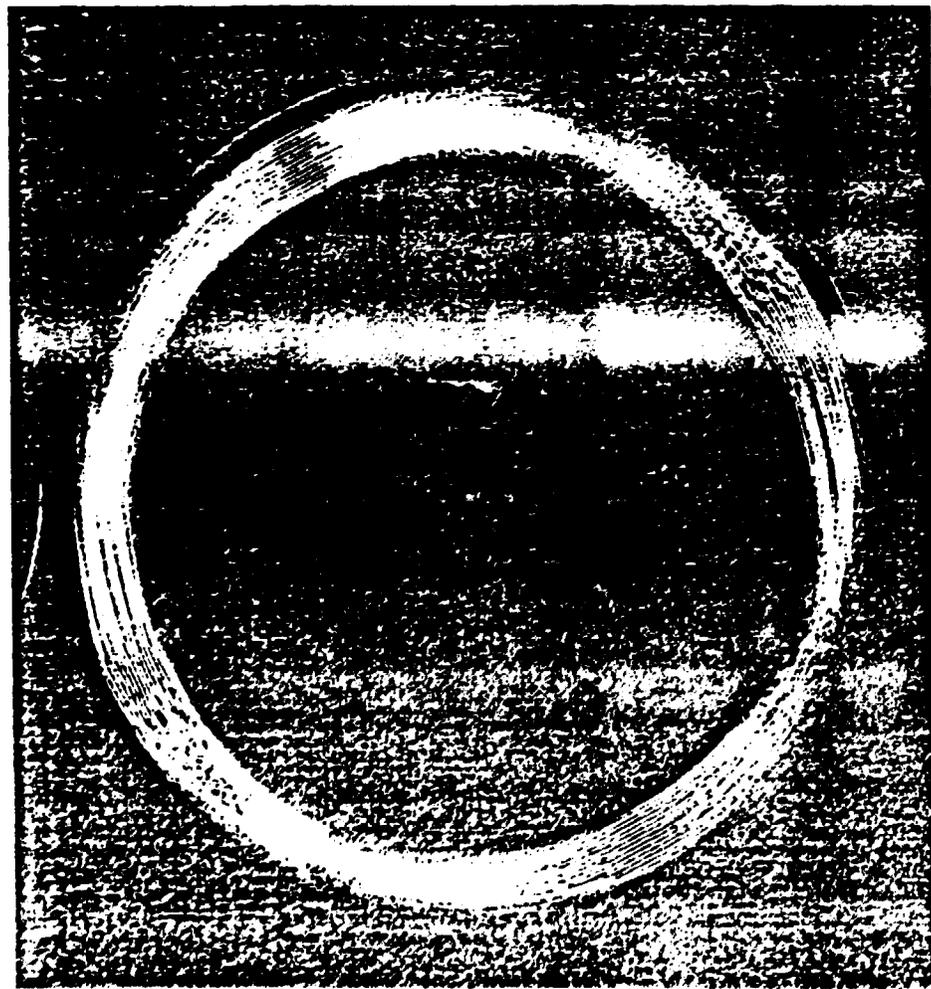


FIGURE 5 : ~~CODED NEGATIVE OF THE GRID~~  
*cliché codé de la grille métallique*

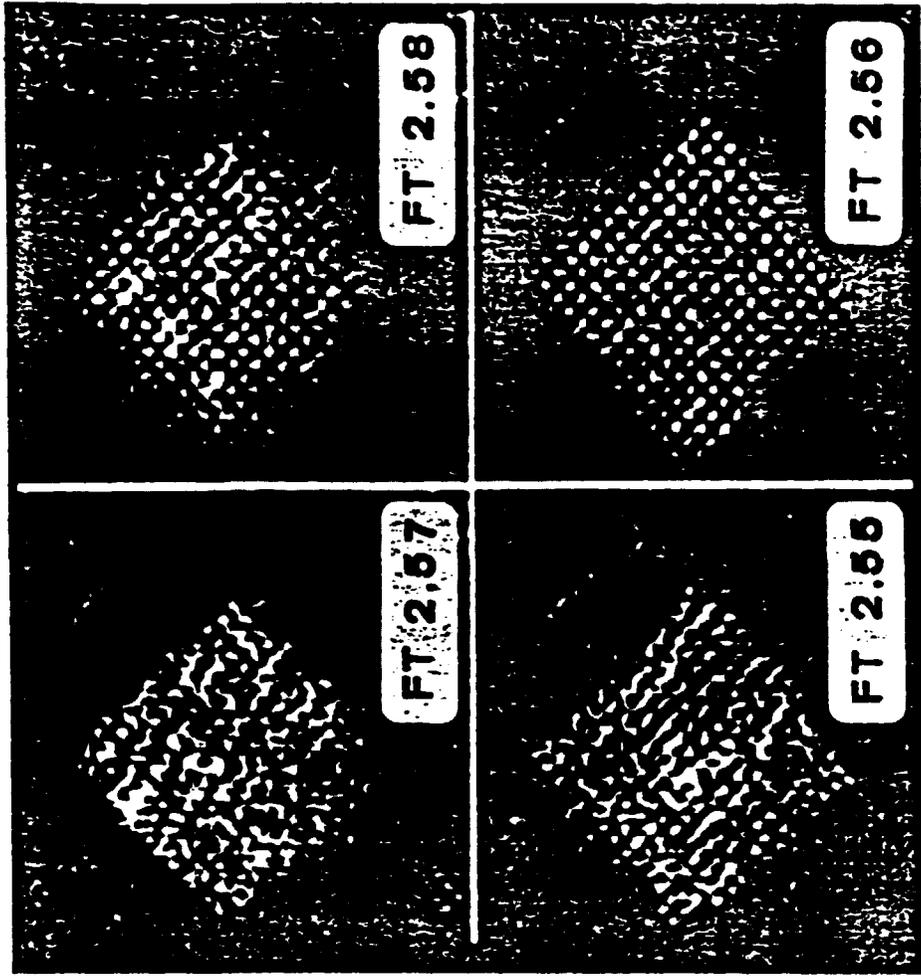


FIGURE 6 : ~~RECONSTRUCTED IMAGE OF THE GRID~~  
*Reconstruction de l'image de la grille  
 métallique  
 la meilleure visio au point correspond à FT = 2,56*

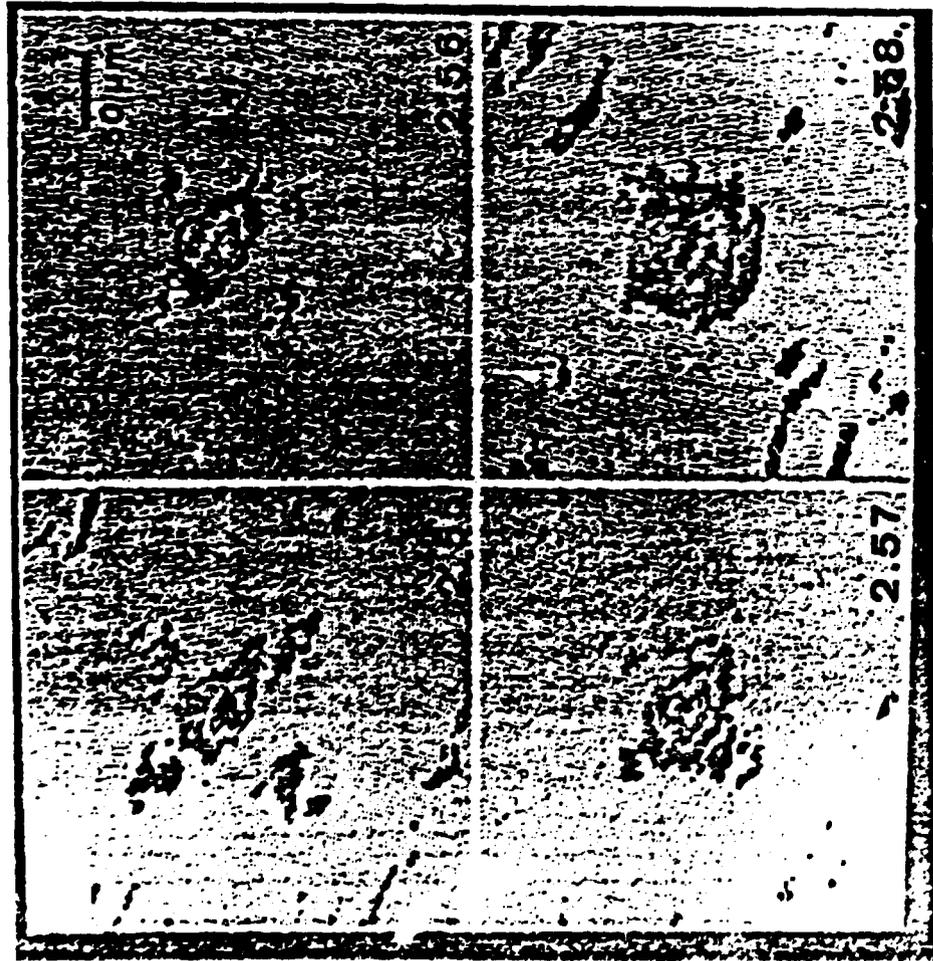


Figure 7 - Image d'une plaque métallique  
 créée par un processus de longueur 80µm  
 La meilleure mise au point correspond à 11:2,56

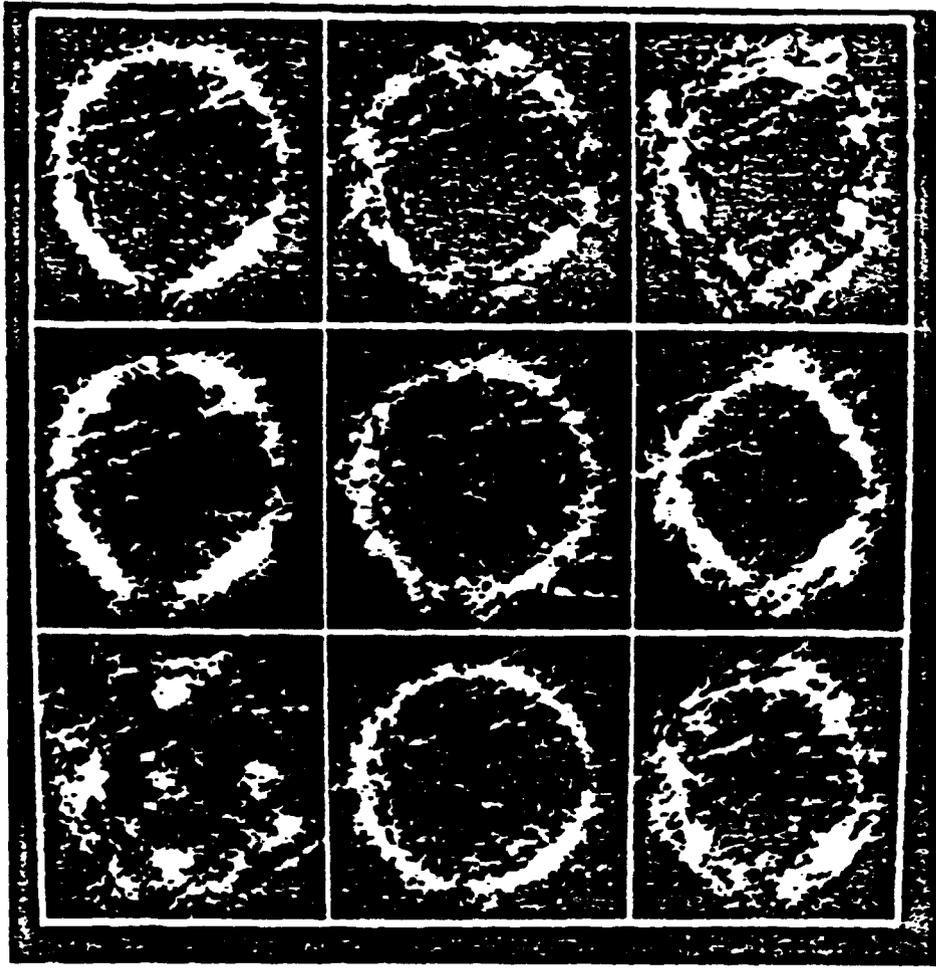


Figure 8 - Image d'une minoblation superficielle  
 La meilleure mise au point est obtenue dans  
 le sens vertical.

~~FIGURE 5a~~

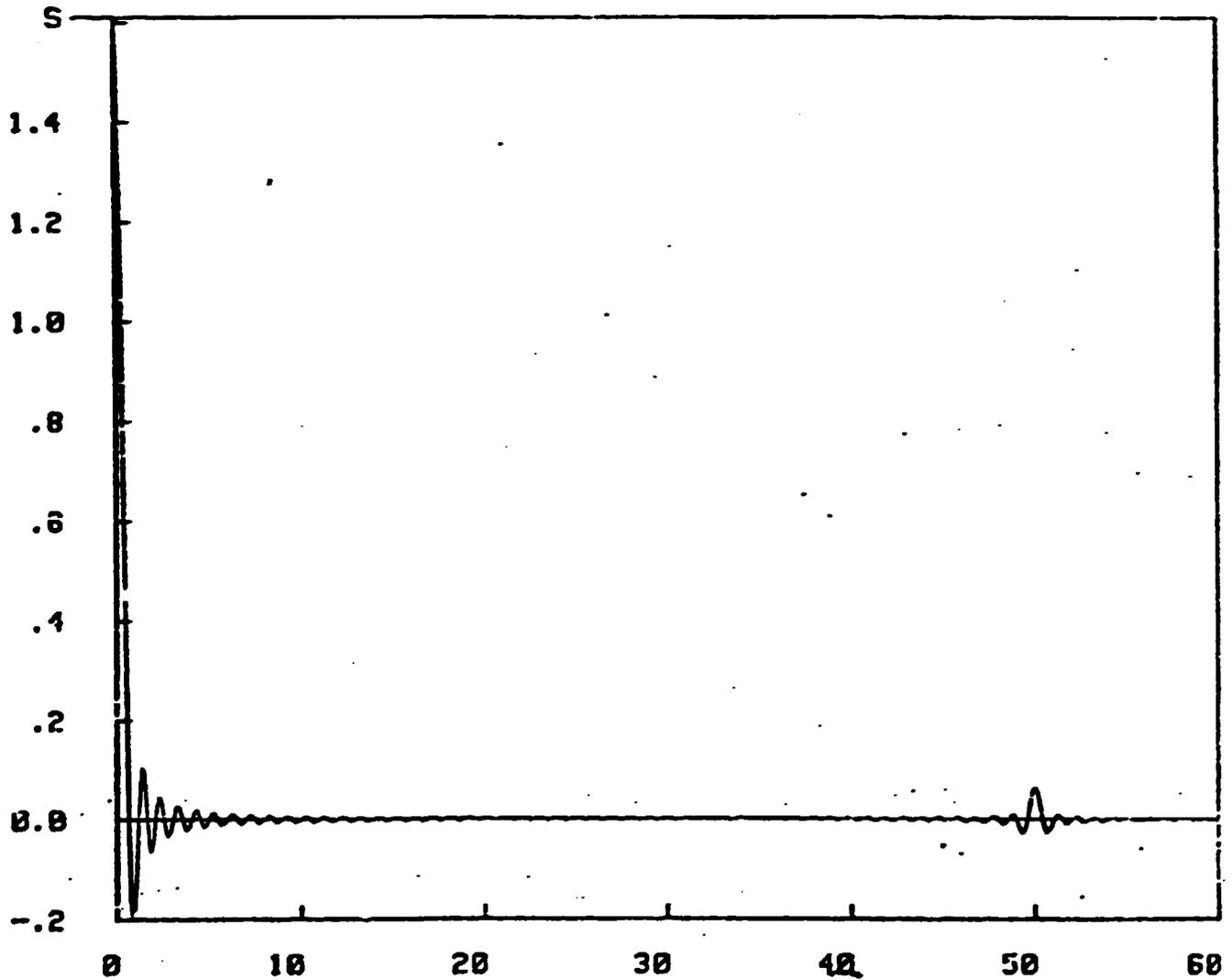


Fig 9 - FONCTION DE TRANSFERT DU MULTICODE ANNEAU  
privilegiant la frequence spatiale  $\rho_0 = 50 \text{ mm}^{-1} = 1/20 \mu\text{m}$

~~Handwritten scribbles~~ ( 50 anneaux , rayon maximum=1mm)

~~Handwritten scribbles~~ surface totale du multicode

