

Apport du traitement du signal
à la modélisation d'un système
d'imagerie ultrasonore

Modelisation of a transmission ultrasonic system



Marc BERNARD

École Nationale Supérieure des Télécommunications, Département Image, Son, Sciences de la Vie, 46, rue Barrault, 75634 PARIS CEDEX 13

Ingénieur ENSERG 1975. DEA Traitement du Signal CEPHAG IEG 1976. Docteur-Ingénieur de l'ENST 1984. Enseignant-Chercheur de l'ENST depuis 1978; activités de recherche se situant dans le domaine de l'Imagerie Ultrasonore à applications médicales; participation aux enseignements en traitement du signal et système de l'ENST, encadrement de stagiaires, etc.

RÉSUMÉ

Pour l'étude de définition d'un système d'imagerie ultrasonore en transmission, une modélisation de l'ensemble du système (émission, réception, milieu de propagation) a été faite permettant d'obtenir des images synthétiques de différents types d'objets. Le principe de base de la méthode est la décomposition des champs acoustiques en leur spectre d'ondes planes. Il est possible de définir une fonction de transfert de propagation, et les objets dont on veut faire l'image sont assimilés à des transparences planes. Ainsi, par des transformées de Fourier successives, directes ou inverses et en tenant compte d'une modélisation particulière du processus de traduction à la réception, nous pouvons aboutir à des images synthétiques de 50*50 pixels. De telles images peuvent nous donner de précieux renseignements préalables sur les propriétés de résolution du système d'imagerie, et peuvent donc nous guider pour le choix des paramètres de base du système.

MOTS CLÉS

Imagerie, ultrason, modélisation, images synthétiques, transducteurs, réseau matriciel, traducteur.

SUMMARY

A transmission ultrasonic imaging system is studied, based on the measurement of the attenuation of an ultrasonic wave travelling between an emitting bar and a receiving bar perpendicular to each other.

A theoretical modelization of the system is made using the angular spectrum development of ultrasonic waves and the propagation transfer function together with a transparency across a plane between emitters and receivers. So we designed a model of the images obtained with such a system, and we can estimate its resolution properties.

KEY WORDS

Ultrasound imaging, modelization, synthetic imaging, transducers, array

TABLE DES MATIÈRES

Introduction

1. Le principe de fonctionnement du système d'imagerie
2. Modélisation à l'aide de l'acoustique de Fourier
3. La modélisation par spectre angulaire
4. La synthèse des images
5. Problèmes liés à la numérisation du système
6. Exemples de synthèse d'images

Conclusion

Bibliographie

1. Le principe de fonctionnement du système d'imagerie

Le système d'imagerie que nous voulons modéliser est fondé sur la mesure de l'atténuation d'une onde ultrasonore se propageant entre une barre émettrice et une barre réceptrice perpendiculaires (voir fig. 1).

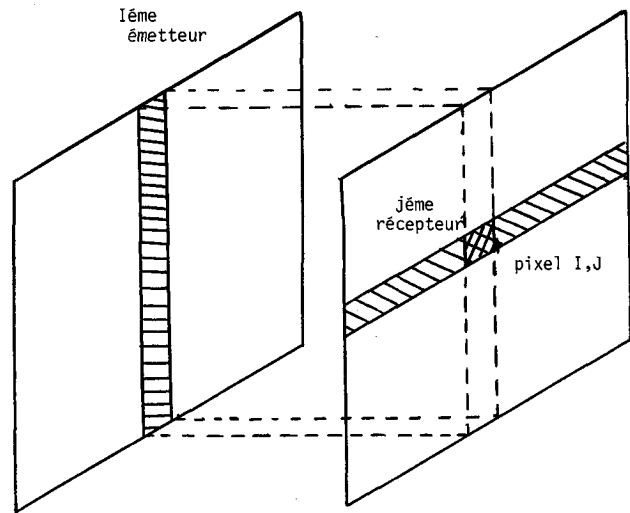


Fig. 1. — Schéma de principe du système d'imagerie montrant la méthode de formation de 1 pixel.

Introduction

La réalisation d'un système d'imagerie ultrasonore pose de nombreux problèmes technologiques de tous ordres: électroniques, de transducteurs, de visualisation... Ces problèmes peuvent devenir épineux dans le cas de l'imagerie en transmission où le poids de l'électronique peut devenir prohibitif [1, 2, 3].

L'estimation *a priori* des propriétés du système est, donc, un objectif important. En effet nous voulons obtenir une résolution aussi bonne que possible, faire un choix judicieux de divers paramètres: fréquence de résonance et largeur des transducteurs, etc. Ces objectifs nous amènent à nous poser le problème de la modélisation numérique et de la simulation du système. Pour ce faire différents types d'approches sont possibles. Le physicien aura, peut-être, tendance à considérer le problème de fond comme celui de la résolution d'un système différentiel avec des conditions aux limites, et donc à utiliser des méthodes numériques du type éléments finis, approche qui donne une modélisation proche de la réalité physique mais qui peut se révéler lourde à mettre en œuvre, en particulier pour une étude dynamique.

En fait nous allons voir que le point de vue et les méthodes du traitement du signal classique nous permettent, au prix d'approximations raisonnables, de réaliser la modélisation de façon souple et interactive.

Si nous considérons N émetteurs et N récepteurs nous avons seulement besoin de $2N$ circuits électroniques en émission et en réception (au lieu de $N \times N$ dans le cas d'un réseau matriciel de transducteurs) pour former une image de $N \times N$ pixels.

Cette simplification matérielle du système aura pour contrepartie une dégradation de la qualité des images obtenues. En effet à l'émission la directivité des transducteurs s'est dégradée, alors qu'à la réception la longueur du transducteur a fortement augmenté. Naturellement nous sommes amenés à nous demander quelle est l'importance de cette dégradation, et aussi comment elle est liée aux paramètres du système: fréquence de travail, dimensions des émetteurs et des récepteurs.

Il est donc intéressant de mettre en œuvre une modélisation de notre système et, ainsi, de pouvoir synthétiser des images en tenant compte d'un certain nombre d'hypothèses; deux voies sont alors possibles: la première est celle de l'acoustique de Fourier, la seconde celle des spectres angulaires.

2. Modélisation à l'aide de l'acoustique de Fourier

Si nous cherchons à calculer le champ émis par un transducteur émetteur dans un plan (x, y) à une distance

Z nous pouvons montrer [4] que celui-ci s'écrit :

$$P_Z(x, y) = \exp(jkZ)/2j \times \frac{[CM(\zeta_1) - CM(\zeta_2) + j(SM(\zeta_1) - SM(\zeta_2))]}{[C(\eta_1) - C(\eta_2) + j(S(\eta_1) - S(\eta_2))]},$$

avec :

$$C(x) = \int_0^x \cos(\pi t^2/2) dt,$$

$$S(x) = \int_0^x \sin(\pi t^2/2) dt,$$

$$CM(x) = \int_0^x \frac{\cos(\pi t^2/2)}{1 + (\pi t^2/kZ)} dt$$

et

$$SM(x) = \int_0^x \frac{\sin(\pi t^2/2)}{1 + (\pi t^2/kZ)} dt,$$

il s'agit d'intégrales de Fresnel, $\eta_1, \eta_2, \zeta_1, \zeta_2$ étant des variables dépendant des dimensions des traducteurs, de Z, de x et y.

Mais cette voie se révèle, en pratique, lourde à mettre en œuvre tant en place mémoire qu'en temps de calcul. Pour obtenir une bonne stabilité de l'algorithme de calcul de ces intégrales il peut être nécessaire d'utiliser une méthode d'intégration à pas variable (voir [4]). Nous lui avons préféré la démarche suivante.

3. La modélisation par spectre angulaire

Si nous considérons une distribution de pression sur un plan $p(x, y)$, nous pouvons calculer la transformée de Fourier de cette fonction bidimensionnelle et ainsi obtenir le spectre angulaire $P(f_x, f_y)$ du champ acoustique. En fait cela revient à développer celui-ci sur une base d'ondes planes [5, 6].

Si nous appelons α, β, γ les composantes du vecteur d'onde unitaire de ces ondes planes nous pouvons écrire :

$$\alpha = \lambda f_x \quad \beta = \lambda f_y$$

et

$$\gamma = \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)},$$

où λ est la longueur d'onde utilisée.

Si, maintenant, nous voulons connaître l'effet de la propagation entre deux plans séparés par une distance Z, nous devons connaître la fonction de transfert de propagation $H_Z(f_x, f_y)$:

$$H_Z(f_x, f_y) = \exp[2j\pi(Z/\lambda)\sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}],$$

avec :

$$f_x^2 + f_y^2 < 1/\lambda^2$$

et $H_Z(f_x, f_y) = 0$ ailleurs (voir fig. 2).

Dans ce cas l'outil de calcul numérique sera la transformée de Fourier qui nous fournit une méthode exploitable de synthèse d'images.

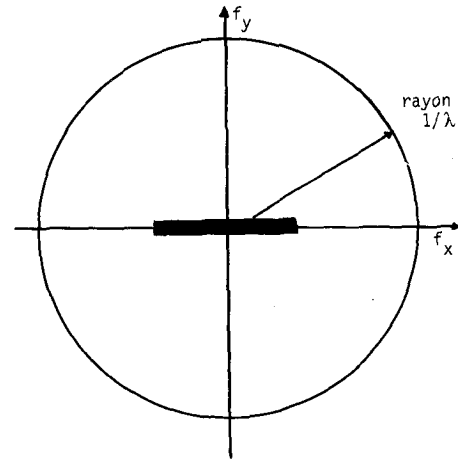


Fig. 2. — Plan des fréquences spatiales. Le rectangle noir indique le domaine fréquentiel du champ émis.

4. La synthèse des images

Pour réaliser cette synthèse, nous allons considérer la configuration géométrique suivante: l'objet dont on veut faire l'image est une transparence plane entre le plan d'émission et le plan de réception (voir fig. 3).

Pour un émetteur donné nous calculerons, dans le domaine des fréquences spatiales à l'aide de la fonction de transfert de propagation, le champ dans le plan de la transparence. Puis, par une transformée de Fourier inverse, nous revenons dans le domaine spatial pour tenir compte de l'effet de la transparence. Ensuite, par retour dans le domaine des fréquences spatiales, nous calculons la propagation jusqu'au plan de réception. Il nous faut donc, pour un émetteur, quatre transformées de Fourier directe ou inverse (voir fig. 4).

Dans le plan de réception le calcul d'un point de l'image à partir d'un récepteur donné se fait par un traitement quadratique: un pixel est donc fonction de l'énergie incidente vue par un récepteur.

Le calcul d'une image complète se fait par répétition de cette procédure de calcul pour tous les émetteurs et tous les récepteurs, le programme demandant de préciser avant chaque calcul les paramètres de base: longueur d'onde, largeur des émetteurs, distance entre émetteurs et récepteurs, position de l'objet.

Une simplification de la méthode peut être introduite en considérant les particularités du domaine des fréquences spatiales occupé par l'onde ultrasonore émise. En effet, le champ de pression émis est de la forme :

$$p(x, y) = A \text{rect}(x/l) \cdot \text{rect}(y/L),$$

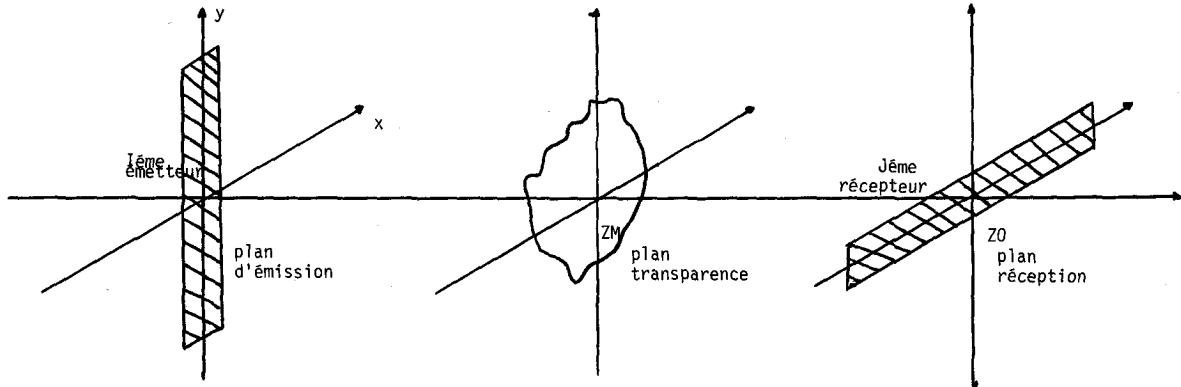


Fig. 3

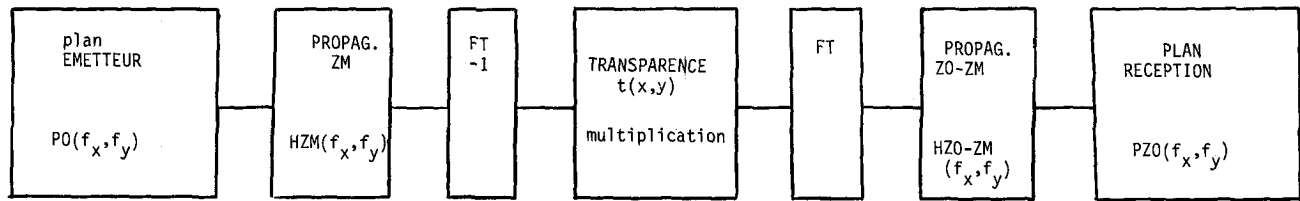


Fig. 4. — FT = transformée de Fourier, FT - 1 = transformée de Fourier inverse.

L et l sont les dimensions de l'émetteur. Son spectre angulaire est le suivant :

$$P(f_x, f_y) = A l L \sin c(l f_x) \cdot \sin c(L f_y),$$

où :

$$\sin c(x) = \sin(\pi x) / \pi x.$$

En fait, pour la longueur d'onde utilisée, le domaine du plan des fréquences spatiales occupé est approximativement celui du rectangle noir de la figure 2 [4]. On peut alors faire l'approximation :

$$f_x^2 + f_y^2 \ll 1/\lambda^2$$

et la fonction de transfert de propagation du paragraphe 4 devient alors :

$$H_Z(f_x, f_y) = \exp[2j\pi Z/\lambda] \times \exp[-j\pi\lambda Z f_x^2] \cdot \exp[-j\pi\lambda Z f_y^2]$$

pour f_x et f_y dans le rectangle noir.

Nous pourrons alors utiliser des transformées de Fourier monodimensionnelles sur chacune des variables x , y ou f_x , f_y si nous considérons des transparences séparables :

$$t(x, y) = h(x) \cdot g(y).$$

De cette approximation résulte un gain important en souplesse d'utilisation de la modélisation grâce à une économie de place mémoire et de temps de calcul.

5. Problèmes liés à la numérisation du système

La numérisation du système va entraîner deux erreurs de repliement. La première, classique, est due à la transformée de Fourier numérique des champs et des spectres angulaires. Pour minimiser cette erreur il faut considérer une largeur de bande des spectres angulaires suffisante, ce qui fixe alors le pas d'échantillonnage des champs ultrasonores dans le domaine spatial.

La deuxième est due à la conjonction de l'échantillonnage et de la propagation. La numérisation périodise les champs et la propagation les élargit d'où un repliement spatial (voir fig. 5). Pour lutter contre celui-ci on introduit une certaine garde autour des champs dans le domaine spatial en prévision des effets de diffraction dus à la propagation (élargissement du faisceau émis, diffusion par un point objet). Cette garde peut être calculée en fonction des paramètres du système et de l'erreur de repliement tolérée. Dans le cas où plusieurs propagations successives sont considérées, il pourra être utile de définir des tableaux à taille variable.

Enfin il faut aussi prendre en compte les problèmes de troncature des spectres angulaires et des champs et prévoir l'utilisation éventuelle de fenêtres autres que la fenêtre rectangulaire.

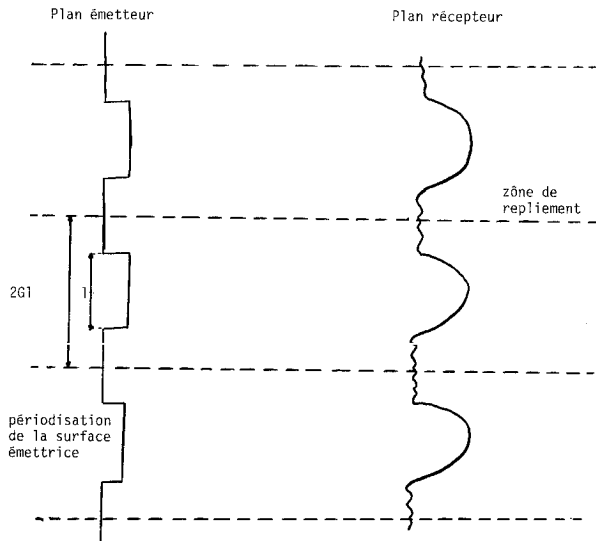


Fig. 5. — Le phénomène de périodisation spatiale: la numérisation spatiale du champ entraîne sa périodisation, la propagation jusqu'au plan de réception peut donner un repliement spatial du champ.

6. Exemples de synthèse d'images

Nous nous sommes intéressés par l'étude d'un système ultrasonore travaillant à 12 MHz, c'est-à-dire avec une longueur d'onde de 125 μm , et nous cherchons à connaître l'influence de la largeur des émetteurs-récepteurs sur la résolution de l'image.

La première transparence que nous allons utiliser sera formée d'un point noir unique. Nous pourrions faire varier la taille de ce point, ainsi que sa position dans l'image.

La figure 6 est l'image d'un point centré dont les dimensions sont celles de 1 pixel, dans le cas d'une largeur des émetteurs et récepteurs de 2 mm (c'est-à-

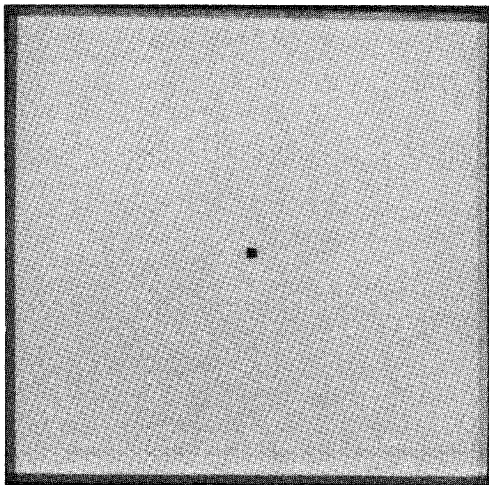


Fig. 6

dire 2 mm * 2 mm). Nous voyons que nous avons affaire à une image parfaitement nette de notre point. Les effets dus à la diffraction apparaissent avec les 4 pixels disposés autour du point et d'un niveau de gris intermédiaire entre le fond et le point.

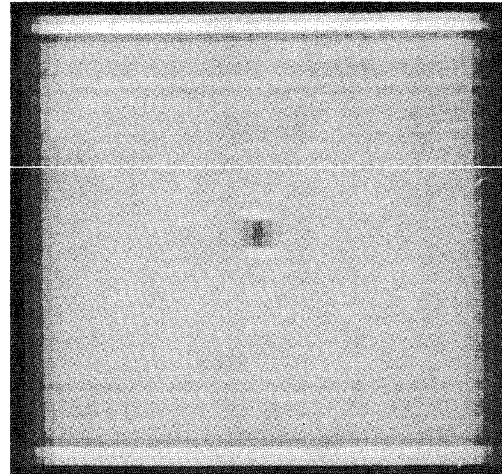


Fig. 7

La figure 7 correspond aux paramètres du cas précédent, mais maintenant la largeur des émetteurs-récepteurs est de 1 mm. L'image est complètement différente, nous n'avons plus un point bien net mais une tache de l'ordre de 3 * 3 pixels. La manière dont est constituée cette image montre le rôle différent joué par les deux dimensions dans la diffraction avec l'apparition de points plus clairs (dus à des suroscillations des champs acoustiques) dans la dimension Y et d'une variation plus lisse dans la dimension X.

La deuxième transparence plane que nous avons utilisée est formée de quatre points disposés symétriquement dans l'image.

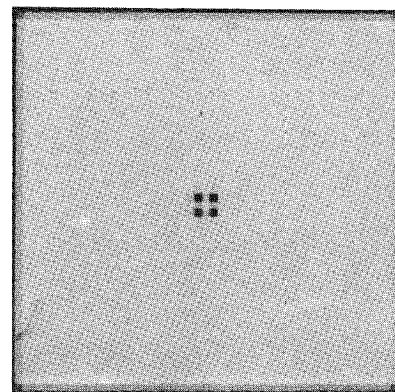


Fig. 8

La figure 8 correspond à une largeur de 2 mm pour les traducteurs, chaque point a les dimensions de 1 pixel et ils sont séparés par 1 pixel. Là encore nous pouvons séparer parfaitement les points. Pour la figure 9, réalisée avec les mêmes paramètres, mais

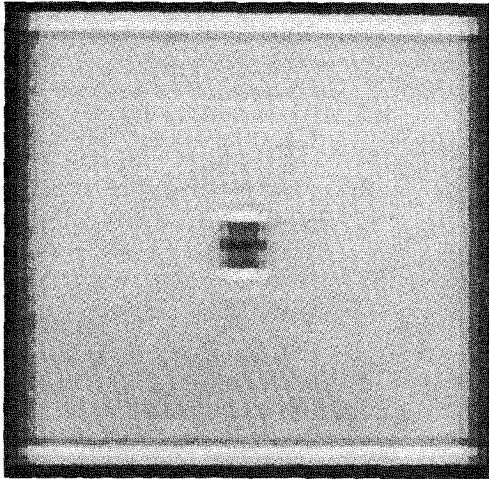


Fig. 9

avec une largeur de 1 mm, nous voyons bien les effets dus à la diffraction: non seulement il n'est plus possible de séparer les points, mais au vu de l'image on pourrait être amené à conclure à l'existence d'un seul point au centre de l'image.

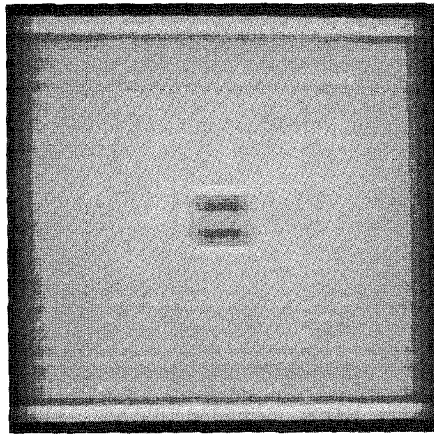


Fig. 10

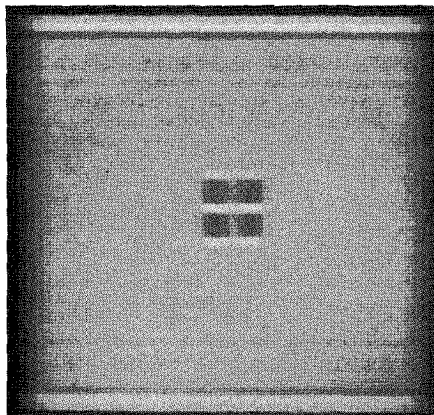


Fig. 11

Toujours dans le cas 1 mm les figures 10 et 11 sont calculées avec un espacement des points, respectivement, de 2 et 3 pixels. Dans le premier cas nous pouvons séparer les quatre points mais il existe un certain couplage au centre de l'image entre les diffractions dues à ces points. Pour la figure 11 nous voyons apparaître, reproduite quatre fois l'image de la diffraction obtenue avec un seul point, il n'y a plus de couplage entre les points. Ce résultat cadre bien avec le fait que la largeur à 6 dB du lobe principal du champ de réception correspond à 7 pixels. C'est-à-dire que le champ dans le plan de réception s'étale sur 3 pixels de part et d'autre du pixel central.

Les images que nous avons jusqu'à présent calculées étaient faites à partir de transparences situées exactement au milieu, à égale distance des émetteurs et des récepteurs. Nous allons nous intéresser maintenant à l'influence de la position de la transparence sur les images. Nous considérerons les deux cas où elle est soit proche des émetteurs, soit proche des récepteurs.

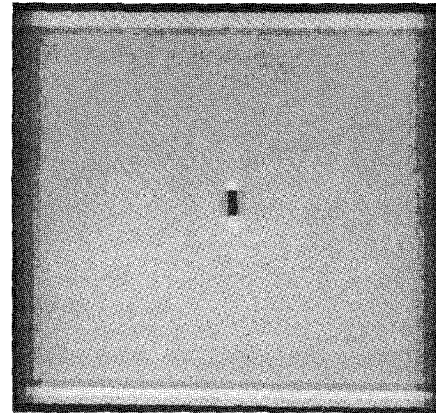


Fig. 12

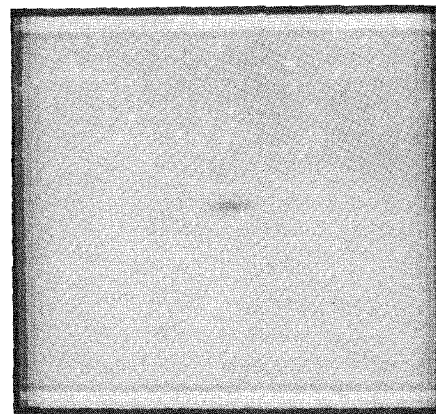


Fig. 13

Plaçons nous dans le cas d'une largeur d'émetteurs-récepteurs de 1 mm (fig. 12 et 13). Pour la figure 12 la distance à partir du plan des émetteurs est de 1 cm (précédemment la transparence se trouvait à égale distance des émetteurs et des récepteurs). L'image

obtenue correspond à un point centré, et se présente sous la forme d'un segment vertical de 3 pixels de long et de 1 pixel de large. L'influence de la diffraction suivant la largeur est beaucoup moins importante car nous sommes proches des émetteurs, le faisceau ultrasonore n'a pas encore pu beaucoup s'élargir, donc la plus grande partie de l'énergie ultrasonore incidente est absorbée par le point objet. Pour ce qui concerne les effets de diffraction dans le sens de la longueur, leur importance vient de ce que le point objet est situé relativement loin du plan récepteur, ce qui aboutit bien à un allongement de l'image dans le sens de la longueur. Si maintenant nous nous plaçons près du plan des récepteurs, ce qui est le cas de la figure 13, nous obtenons une image ayant la forme d'un segment horizontal assez flou. Les effets de diffraction jouent inversement par rapport au cas précédent: près des récepteurs, le champ suivant la largeur a subi un élargissement important, et seule une fraction peu importante de l'énergie ultrasonore sera affectée par le point objet. Par contre dans le sens de la longueur, la distance entre le point objet et les récepteurs n'est pas suffisante pour permettre un élargissement important du faisceau.

Les images 14 et 15 correspondent au cas 2 mm. Pour la figure 14 nous sommes proches des émetteurs, le point objet est nettement visualisé, mais là encore nous voyons apparaître un effet relativement impor-

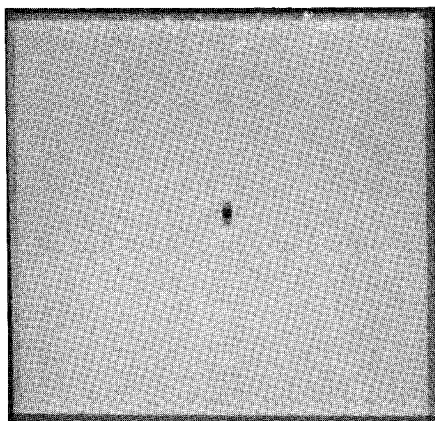


Fig. 14

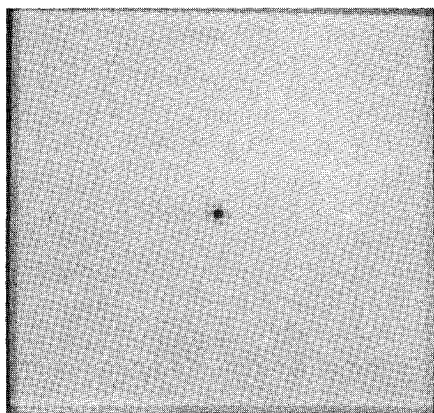


Fig. 15

tant de diffraction suivant la longueur. Si nous nous plaçons près du plan récepteur, comme dans la figure 15, nous voyons qu'il n'y a pas de différence notable avec le cas d'un point objet situé au milieu.

Conclusion

Nous voyons que la modélisation complète du système est possible avec la méthode des spectres angulaires. Le gros avantage d'une telle approche est l'utilisation de la transformée de Fourier rapide, ce qui nous permet d'obtenir une synthèse d'image en quelques minutes sur un système classique (IRIS 80) en temps partagé. Cette rapidité permet une bonne interactivité de la méthode d'étude du système d'imagerie, nous obtenons rapidement des images synthétiques après une modification quelconque des paramètres importants du système. Les résultats présentés, dans des cas simples mais présentant un intérêt pour la réalisation du système, ont permis d'orienter la mise en œuvre du prototype du système. Cette souplesse d'utilisation est obtenue au prix d'approximations qui restreignent la généralité de la méthode: transparences séparables (ce problème pouvant être résolu par l'utilisation d'une FFT bidimensionnelle), caractère plan de la transparence, hypothèse de vibration en piston du traducteur-émetteur, modèle quadratique de la réception..., pour toutes ces raisons il ne faut sans doute pas chercher à faire « dire » plus qu'il est possible au modèle. Nous n'avons modélisé qu'une partie de la réalité (les effets dus aux différents phénomènes de diffraction) mais une première expérimentation à partir d'une maquette du système (fréquence de 1 MHz, 100 points d'image) semble confirmer nos calculs; il n'en reste pas moins que seule l'étude d'un prototype à 12 MHz, en cours de réalisation, pourra les valider complètement et peut-être nous aider à les affiner. Il ne s'agit pas d'un modèle de connaissance, mais plutôt d'un modèle de représentation nous permettant une sorte de conception assistée de notre système d'imagerie.

Manuscrit arrivé le 27 juillet 1984.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MAGINNESS et PLUMMER, A cardiac dynamics visualisation system, *Ultrasonic symposium*, 1973, p. 4-6.
- [2] TAKAGI, KAWASHIMA, Solid state image sensor, *Acoustical Holography*, 1972, p. 215-236.
- [3] ERIKSON, ZULEEG, Integrated acoustic array, *Acoustical Holography*, 1972, p. 423-445.
- [4] BERNARD, *Thèse de Docteur-Ingénieur*, ENST, janvier 1984.
- [5] ALAIS, Imagerie et holographie ultrasonores, *Rev. de Phys. appl.*, 11, n° 5, septembre 1976.
- [6] GOODMAN, *Introduction à l'optique de Fourier*, Masson, 1972.