

Contribution

à l'imagerie ultrasonore

quantitative

Contribution to quantitative ultrasonic imaging



Bernard DUCHÊNE

Groupe d'Électromagnétisme, Laboratoire des Signaux et Systèmes, CNRS-ESE, Plateau du Moulon, 91190 GIF-SUR-YVETTE

Chercheur au Groupe d'Électromagnétisme du Laboratoire des Signaux et Systèmes à l'École Supérieure d'Électricité. Docteur de 3<sup>e</sup> cycle (1981). Prépare actuellement une thèse de Doctorat d'État. Ses sujets d'intérêt sont essentiellement les problèmes de diffraction inverse. Ses travaux portent actuellement sur l'imagerie ultrasonore basée sur le principe de tomographie par diffraction et sur la caractérisation d'objets enfouis dans des milieux inhomogènes.

Dominique LESSELIER

Groupe d'Électromagnétisme, Laboratoire des Signaux et Systèmes, CNRS-ESE, Plateau du Moulon, 91190 GIF-SUR-YVETTE

Dominique LESSELIER est chargé de Recherche CNRS au Groupe d'Électromagnétisme du Laboratoire des Signaux et Systèmes, Gif-sur-Yvette. Il est Ingénieur Diplômé de l'École Supérieure d'Électricité (1975), Docteur d'État ès Sciences Physiques (1982). Il a mené des études sur la diffraction inverse dans le domaine temporel, le rayonnement de structures métalliques épaisses, et lors d'un séjour à l'Université de Californie à Los Angeles, USA, sur la théorie vectorielle du transfert radiatif. Il poursuit actuellement ses recherches sur l'imagerie ultrasonore dans le domaine biomédical, le diagnostic électromagnétique du sous-sol, et l'application aux simulateurs EMP et à la diffraction par des objets inhomogènes de méthodes itératives de résolution.

Walid TABBARA

Groupe d'Électromagnétisme, Laboratoire des Signaux et Systèmes, CNRS-ESE, Plateau du Moulon, 91190 GIF-SUR-YVETTE



Professeur à l'Université Pierre-et-Marie-Curie. Son activité de recherche concerne les problèmes dits de diffraction inverse et de caractérisation de milieu. Il s'intéresse au développement d'algorithmes de reconstruction de profils de permittivité, de célérité d'ondes ultrasonores et de reconstruction d'objets parfaitement conducteurs. Actuellement ses travaux sont orientés vers : 1<sup>o</sup> l'étude d'un dispositif d'imagerie utilisant le principe de la tomographie par diffraction; 2<sup>o</sup> le diagnostic de milieux stratifiés à partir de mesures dans les puits de forage.

## RÉSUMÉ

Nous présentons dans une première partie un procédé d'imagerie utilisant la méthode dite de tomographie par diffraction. Des résultats expérimentaux sur fantômes illustreront les performances de cette approche et permettront d'analyser les différentes étapes de la méthode. L'image formée est une carte de la densité des sources induites dans l'objet par l'onde incidente. Cette densité est le produit du champ de pression dans l'objet par une fonction simple  $f(C, \alpha)$  de la célérité du son  $C$  et de l'atténuation  $\alpha$  dans le milieu constituant l'objet. Dans la deuxième partie, nous décrivons un processus itératif permettant d'isoler cette fonction  $f(C, \alpha)$  et d'en extraire les valeurs des paramètres. Des résultats obtenus par simulation mettront en évidence les possibilités de ce procédé.

## MOTS CLÉS

Ultrasons, imagerie.

## SUMMARY

We first present an imaging technique based on the diffraction tomography approach. Experimental results on phantoms will be used to analyse this method at its various stages and illustrate its capabilities. The image is a map of the density of the sources induced in the object by the incident wave. This density is the product of the pressure field in the object by a simple function  $f(C, \alpha)$  of the sound speed  $C$  and attenuation  $\alpha$  in the object. We then present an iterative algorithm that isolates  $f(C, \alpha)$  and allows the determination of  $C$  and  $\alpha$ . This approach will be discussed through results obtained by numerical simulation.

## KEY WORDS

Ultrasound, imaging.

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction
  2. Imagerie qualitative
  3. Imagerie quantitative
  4. Conclusion
- Bibliographie

## 1. Introduction

Dans les méthodes d'imagerie dites tomographiques, on cherche à former l'image d'une section d'un objet à partir de mesures effectuées suivant un segment de droite. L'image est la carte d'un paramètre physique caractéristique de l'objet, et les mesures sont en général celles d'un champ « diffusé » par l'objet. Il s'agit donc d'établir une relation entre ce paramètre et le champ; celle-ci est obtenue en étudiant l'interaction du champ incident avec l'objet. Dans la grande majorité des cas, on fait l'hypothèse d'une propagation rectiligne du champ à travers l'objet. Le milieu constituant ce dernier agit alors soit comme un atténuateur sur l'intensité du champ incident (on reconstruit dans ce cas le coefficient d'atténuation du milieu), soit

comme une ligne à retard (l'image est alors la carte de la vitesse de l'onde dans le milieu). Tout effet de diffraction est alors négligé. Cette hypothèse est peu vérifiée dans l'interaction d'une onde ultrasonore avec un milieu biologique. Pour prendre en compte les phénomènes de diffraction, la méthode dite de tomographie par diffraction a été introduite [1, 4]. Dans le cas des ondes ultrasonores, les études menées jusqu'à présent concernent des objets constitués de milieux peu diffringents. On peut alors introduire les approximations de Born et de Rytov qui conduisent à de grandes simplifications dans les calculs.

Afin d'étendre cette approche à des milieux arbitraires, nous présentons une variante de la méthode de tomographie par diffraction dans laquelle aucune hypothèse *a priori* n'est faite sur le mode d'interaction du champ incident avec l'objet étudié. Nous montrons que l'image est en fait la carte de la densité des sources induites dans l'objet par le champ incident. Des exemples d'images de cibles sur fantômes, obtenues à partir de données expérimentales, seront présentées. Nous montrerons, sur des données simulées numériquement, qu'il est possible de quantifier cette image en extrayant les valeurs des paramètres physiques du milieu : atténuation et célérité du son. La précision des résultats et leur sensibilité au bruit présent dans les données seront examinées.

## 2. Imagerie qualitative

Le schéma de principe d'un dispositif d'imagerie utilisant la méthode de tomographie par diffraction est

représenté sur la figure 1. Pour chaque position de l'objet, définie par l'angle  $\theta$ , on relève le champ ultrasonore sur une ligne de mesure de longueur  $L$  telle que  $L/2d > \sqrt{3}$ , où  $d$  est la distance du centre de rotation au milieu de la ligne de mesure. Cette relation entre  $L$  et  $d$  assure, dans l'application étudiée ici, une contribution négligeable à la formation de l'image des valeurs du champ prises à l'extérieur de ce segment. Le champ est mesuré en amplitude et phase. Ces données sont celles « d'une vue de l'obstacle ».

où  $p_0(x, y)$  représente le champ incident. On peut montrer que :

$$(2.3) \quad \psi(x, y) = [P_0(x, y)]^{-1} \iint_D \varphi(x', y') \times p_0(x', y') G(x, x', y, y') dx' dy',$$

où :

$$(2.4) \quad G(x, x', y, y') = -\frac{i}{4} H_0^2(k_0 |(x-x')^2 + (y-y')^2|^{1/2}),$$

est la fonction de Green de l'espace libre. En exprimant celle-ci sous la forme intégrale et en remarquant que l'intégrale sur le domaine  $D$  peut être étendue à l'infini,  $\varphi(x', y')$  étant nul en dehors du domaine  $D$ , on établit [4] que pour l'angle de vue  $\theta=0$  on a :

$$(2.5) \quad \hat{\varphi}(\gamma, \beta) = 2i(k_0^2 - \gamma^2)^{1/2} \hat{\psi}(\gamma, d) e^{i\beta d},$$

$$(2.6) \quad \beta = -k_0 + (k_0^2 - \gamma^2)^{1/2},$$

$$|\gamma| \leq k_0.$$

où  $\hat{\varphi}(\gamma, \beta)$  est la transformée de Fourier de  $\varphi(x', y')$  et  $\hat{\psi}(\gamma, d)$  celle de  $\psi(x, d)$ ,  $\psi(x, d)$  représentant le champ diffracté normalisé mesuré sur une ligne  $y=d$ .

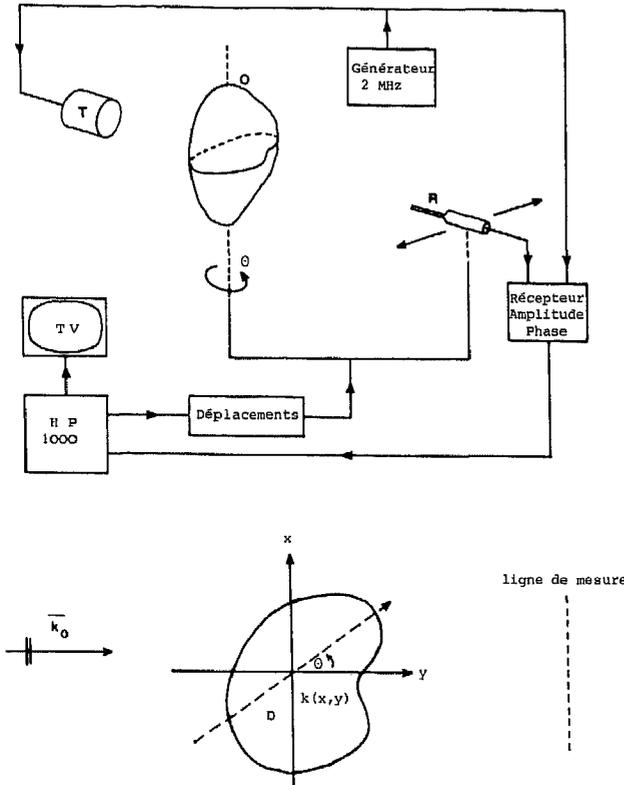
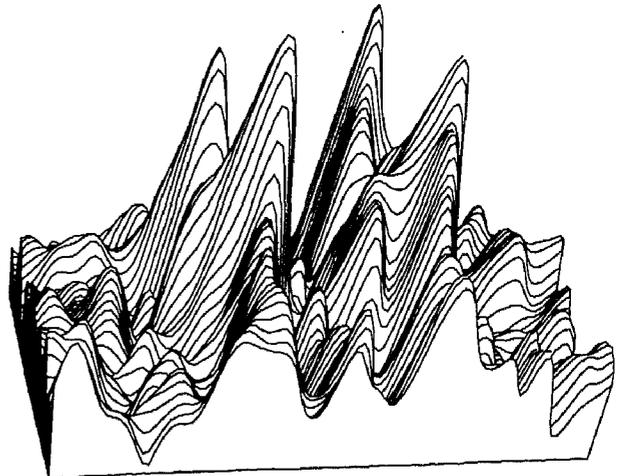


Fig. 1. — Le montage expérimental et la représentation dans un plan de section droite de l'objet.



L'image obtenue représente la carte des sources induites dans l'objet par l'onde incidente qui ont pour expression, en négligeant les variations de densité :

$$(2.1) \quad J(x', y') = (k^2(x', y') - k_0^2) p(x', y'),$$

$$k(x', y') = \frac{\omega}{C(x', y')} - i\alpha(x', y'); \quad k_0 = \frac{\omega}{C_0},$$

où  $P(x', y')$ ,  $C(x', y')$  et  $\alpha(x', y')$  représentent respectivement le champ ultrasonore, la célérité du son et l'atténuation dans l'objet,  $C_0$  représentant la célérité du son dans le milieu environnant celui-ci étant supposé sans pertes. Si l'on pose :

$$(2.2) \quad \psi(x, y) = (p(x, y) - p_0(x, y)) / p_0(x, y),$$

$$\varphi(x', y') = J(x', y') / p_0(x', y'),$$

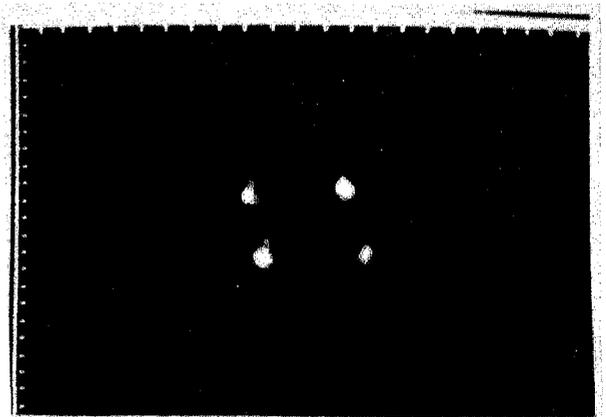


Fig. 2. — L'image de quatre fils de nylon ( $\varnothing=0.6$  mm) distants de 4 mm reconstruite à partir de quatre vues.

On notera que  $\hat{\varphi}(\gamma, \beta)$  n'est connu que sur un demi-cercle de rayon  $k_0$ . L'équation (2.5) permet de calculer  $\hat{\varphi}(\gamma, \beta)$ , et par transformation de Fourier inverse fournit une information partielle sur  $\varphi(x, y)$ , car  $\hat{\varphi}(\gamma, \beta)$  n'est pas connue dans tout le plan spectral. La réalisation de plusieurs vues permet de palier à cet inconvénient et de reconstruire la fonction  $\varphi(x, y)$  et d'en déduire  $J(x, y)$ .

La figure 2 représente l'image de quatre fils de nylon de  $\varnothing$  0.6 mm formant les sommets d'un carré de 4 mm de côté et illuminés par le faisceau d'un transducteur de  $\varnothing$  5 cm émettant à 2 MHz. Quatre vues, une tous les 90°, ont été utilisées pour la formation de l'image.

### 3. Imagerie quantitative

Dans ce deuxième volet de l'étude nous nous proposons d'examiner la possibilité de déterminer les paramètres  $C(x, y)$  et  $\alpha(x, y)$  définis dans (2.1) à partir de la connaissance de  $J(x, y)$ . On peut ainsi caractériser le milieu formant l'objet et former une image indépendante de la répartition du champ à partir de la carte de ces paramètres. Ces paramètres permettent aussi d'accéder indirectement à des quantités d'intérêt pratique, telle la répartition des températures dans l'objet. On peut ainsi envisager l'utilisation de cette technique dans le contrôle de l'hyperthermie.

La détermination de  $C(x, y)$  et  $\alpha(x, y)$  se fait au moyen d'un processus itératif qui définit deux suites  $\{k_i(x, y)\}$  et  $\{p_i(x, y)\}$  au moyen de l'équation :

$$\begin{aligned}
 p_{i+1}(x, y) &= \sum_{\theta} p_{0, \theta}(x, y) \\
 &+ \int_D (k_i^2(x', y') - k_0^2) p_{i+1}(x', y') \\
 &\quad \times G(x, x', y, y') dx' dy', \\
 (3.1) \quad i &= 1, 2, \dots, n, \quad (x, y) \in D, \\
 p_1(x, y) &= \sum_{\theta} p_{0, \theta}(x, y), \\
 k_1(x', y') &= J(x', y')/p_1(x', y'), \\
 k_{i+1}(x', y') &= J(x', y')/p_{i+1}(x', y').
 \end{aligned}$$

D est la section droite de l'objet par le plan de propagation de l'onde incidente,  $p_{0, \theta}(x, y)$  le champ incident pour la position d'angle  $\theta$  de l'objet. La limite de la suite  $\{k_i(x, y)\}$  désignée par  $k^*(x, y)$  permet d'accéder aux paramètres recherchés :

$$\begin{aligned}
 (3.2) \quad C^*(x, y) &= \frac{\omega}{R_e(k^*(x, y))}, \\
 \alpha^*(x, y) &= -I_m(k^*(x, y)).
 \end{aligned}$$

Pour illustrer cette approche nous avons considéré le cylindre infini dont la section droite est représentée

sur la figure 3. L'application de (3.1) et (3.2) conduit aux résultats de la figure 4 où  $C^*(x, y)$  et  $\alpha^*(x, y)$  sont représentés sur un axe de cette section. Le processus converge rapidement et fournit des résultats d'une précision acceptable. L'étude du comportement des résultats vis-à-vis des erreurs sur  $J(x, y)$  a montré une bonne stabilité de  $C^*(x, y)$  et une assez grande sensibilité de  $\alpha^*(x, y)$  à ces erreurs.

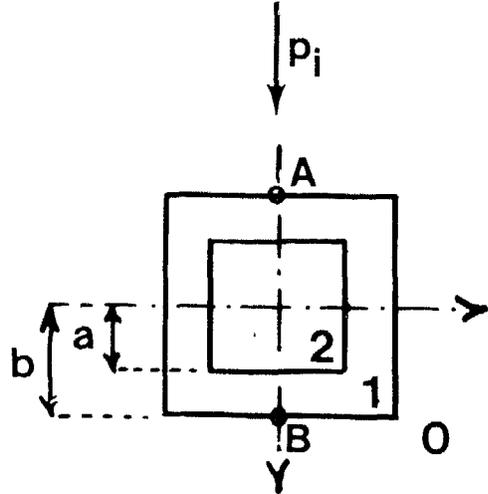


Fig. 3. — L'objet test.  $C_0=1470$  m/s,  $C_1=1560$  m/s,  $C_2=1540$  m/s,  $a/b=3/5$ ,  $\alpha_0=0$  dB/m,  $\alpha_1=20$  dB/m,  $\alpha_2=20$  dB/m,  $k_0 b=7$ .

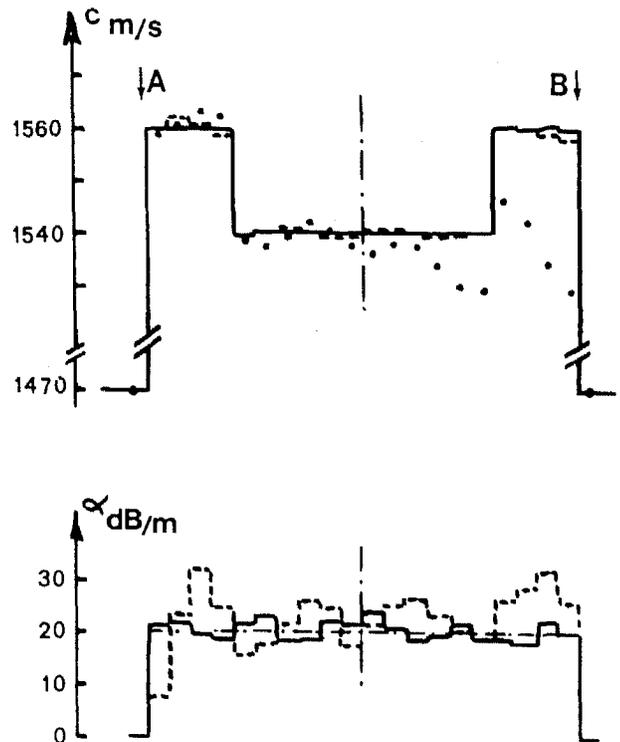


Fig. 4. — Reconstruction des profils de célérité et d'atténuation : ... 1 itération (approx. de Born), ---- 4 itérations, ——— 7 itérations - - - - profil exact.

L'étude systématique de ce procédé est en cours, avec des données (valeurs des champs diffractés) simulées et par la suite les reconstructions des profils de célérité et d'atténuation seront réalisées à partir de relevés expérimentaux.

#### 4. Conclusion

Dans cet article nous avons présenté des résultats numériques et expérimentaux concernant une méthode d'imagerie ultrasonore basée sur un processus de tomographie par diffraction. Celui-ci permet d'obtenir une image d'un objet en tenant compte des effets de diffraction particulièrement importants dans le cas de l'imagerie ultrasonore où les inhomogénéités de l'objet étudié ont des dimensions de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Les hypothèses sur la nature peu diffringente de l'objet (hypothèse de Born ou Rytov) généralement introduites préalablement à l'utilisation de cette méthode, ne sont pas nécessaires à l'obtention d'une représentation qualitative de l'objet, qui devient satisfaisante à partir d'un nombre de vues très restreint. L'image représentée est la carte des sources fictives induites à l'intérieur de l'objet, quantités qui dépendent non seulement des paramètres de celui-ci mais également du champ. Un processus itératif permet alors, en négligeant les variations de densité, d'extraire des sources induites certains des paramètres de l'objet, tels que la célérité des ondes de compression et l'atténuation. Contrairement à un processus de Neumann où seule la pression

serait modifiée à chaque itération, aucune hypothèse sur la nature de l'objet n'est *a priori* nécessaire pour une convergence rapide de ce processus qui fournit des résultats d'une précision et d'une stabilité (en ce qui concerne la célérité) vis-à-vis du bruit acceptables. La méthode d'imagerie, ici présentée dans le cas d'une onde incidente plane et de mesures en transmission, peut être étendue au cas de sources ponctuelles ou de mesures en réflexion. Elle ouvre donc de larges perspectives d'utilisation, dans le domaine biomédical, par exemple, où elle est actuellement en cours d'évaluation, ainsi que dans la caractérisation d'objets enterrés où une étude par simulation est en cours de réalisation.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. K. MUELLER *et al.*, A new approach to acoustic tomography using diffraction techniques, In *Acoustical Imaging*, 8, A. F. Metherell éd., Plenum Press, 1980, p. 615-628.
- [2] A. DEVANEY, A filtered back propagation algorithm for diffraction tomography, *Ultrasonic Imaging*, 4, 1982, p. 336-350.
- [3] M. KAVEH, M. SOUMEKH et J. F. GREENLEAF, Signal processing for diffraction tomography, *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, SU-31, n° 4, 1984, p. 230-240.
- [4] B. DUCHÊNE, D. LESSELIER et W. TABBARA, A diffraction tomography approach to acoustical imaging and media characterization, *Journal of the Optical Society of America (A)*. A paraître (Nov. 1985).