

Exploitation de l'amplitude et de la phase**en analyse spectrale****du signal échographique**

Use of the amplitude and phase in ultrasonic spectral analysis

Noëlle MERCIER

Université de Compiègne, Division Acoustique et Vibrations, BP n° 233, 60206 COMPIÈGNE CEDEX

Noëlle MERCIER est Maître Assistant au Département de Génie Mécanique de l'Université de Compiègne. Elle a obtenu un Doctorat de 3^e Cycle à Paris-VI sur le contrôle non destructif de matériaux par ultrasons au cours de laquelle elle a en particulier mis au point une méthode permettant de classer des échantillons métalliques en fonction de leur granulométrie par la mesure de l'atténuation des ultrasons. Actuellement elle achève une thèse de Doctorat es-Sciences Physiques sur la caractérisation de défauts par analyse spectrale du signal échographique et plus particulièrement par l'exploitation de la phase.

Jean-François DE BELLEVAL

Université de Compiègne, Division Acoustique et Vibrations, BP n° 233, 60206 COMPIÈGNE CEDEX

J.-F. de BELLEVAL est Professeur à l'Université de Compiègne et responsable de la Division Acoustique et Vibrations. Il est ancien élève de l'École Polytechnique et Docteur ès-Sciences Physiques. Il a consacré sa thèse à l'étude de l'émission infra-rouge locale d'un jet chaud et aux relations entre cette émission et le rayonnement acoustique du jet. La recherche actuelle est principalement orientée vers le Contrôle Non Destructif de matériaux par ultrasons, en particulier sur la modélisation, la caractérisation et la réalisation de transducteurs, l'imagerie ultrasonore et le traitement du signal.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la caractérisation de défauts par spectroscopie ultrasonore nous exploitons l'amplitude et la phase des composantes spectrales du signal échographique. L'existence d'une information supplémentaire contenue dans la phase et non dans l'amplitude se traduit par la présence de déphaseurs purs dans la fonction de transfert correspondante. Une méthode a été mise au point permettant de remonter à la répartition dans le plan complexe des pôles et des zéros de la fonction de transfert du système échographique. Cette répartition n'étant pas d'interprétation aisée, il semble intéressant de l'étudier dans le cas de systèmes simples. Nous présentons les résultats d'une simulation concernant l'évolution dans le plan complexe des zéros de la fonction de transfert dans le cas d'une ligne source composée de N sources ponctuelles équidistantes les unes des autres et excitées simultanément par une impulsion.

MOTS CLÉS

Ultrasons, spectroscopie ultrasonore, fonction de transfert, contrôle non destructif, phase spectrale, traitement de signal.

SUMMARY

To improve the detection of flaws by ultrasonic spectroscopy the amplitude and phase of the spectral analysis of the echographic signals are exploited. The existence of additional information, contained in the phase and not in the amplitude, appears as pure phase shifting in the corresponding transfer function. A method has been developed in order to determine the distribution, in the complex plane, of the poles and zeros of the transfer function of the echographic system. Interpreting this distribution is difficult so, it has been studied for a few simple cases. The results of a simulation are presented for the case of a line source composed of N equidistant point sources excited simultaneously by an impulse. The evolution, in the complex plane, of the zeros of the transfer function is calculated.

KEY WORDS

Ultrasound, ultrasonic spectroscopy, transfer function, non destructive evaluation, spectral phase, signal processing.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction
 2. Analyse théorique
 - 2.1. Fonction de transfert et réponse en fréquence du système échographique
 - 2.2. Influence sur la réponse en fréquence des pôles et des zéros
 - 2.3. Détermination des pôles et des zéros
 3. Résultats expérimentaux
 4. Simulation dans le cas du champ sonore émis par une ligne source
 5. Conclusion
- Bibliographie

1. Introduction

L'exploitation de la phase spectrale d'un signal échographique présente quelques difficultés du fait qu'elle est liée à l'origine des temps du signal reçu. Au lieu de la définir par rapport à un signal de référence [1], il semble plus judicieux d'étudier le retard de groupe du signal échographique (ou la dérivée de la phase qui lui est proportionnelle) [2, 3]. L'existence d'une information supplémentaire contenue dans la phase et qui n'existe pas dans l'amplitude se traduit par la présence de déphaseurs purs dans la fonction de transfert du système.

La connaissance de la phase et de l'amplitude spectrale permet de déterminer la répartition dans le plan complexe des pôles et des zéros de cette fonction de transfert. Les résultats expérimentaux n'étant pas d'interprétation aisée [4] nous présentons des résultats obtenus à partir de la simulation d'une ligne source

composée de N sources ponctuelles équidistantes et excitées simultanément par une impulsion.

2. Analyse théorique

2.1. FONCTION DE TRANSFERT ET RÉPONSE EN FRÉQUENCE DU SYSTÈME ÉCHOGRAPHIQUE

Le système échographique utilisé est un système de transmission tel qu'on le définit en théorie du signal. C'est un système qui satisfait aux principes de linéarité, continuité et d'invariance par translation temporelle. On peut l'envisager comme un filtre linéaire à une seule entrée et une seule sortie où l'entrée est l'impulsion d'excitation du transducteur et la sortie est le signal échographique capté par le transducteur. En théorie du signal, les filtres linéaires considérés habituellement sont régis par des équations différentielles à coefficients constants. Dans ce cas, la fonction de transfert $H(p)$ est une fonction rationnelle de p qui s'exprime comme le rapport de deux polynômes [5] (elle est alors entièrement déterminée par la position de ses pôles et de ses zéros dans le plan complexe). Une telle écriture de $H(p)$ sous-entend que l'origine des temps est choisie naturellement au moment où le système est excité et comme la ligne à retard est exclue de la catégorie des filtres linéaires envisagés la fonction de transfert ne contient pas de terme de retard pur du type e^{-pt_0} . Dans le cas du système échographique, le choix de l'origine des temps est arbitraire aussi trouve-t-on souvent un terme e^{-pt_0} dans la fonction de transfert du système échographique.

Le système échographique est également stable et causal. Il en résulte que les pôles sont à partie réelle négative et que les zéros sont distribués symétriquement par rapport à l'axe des réels.

Du fait de la causalité, la réponse en fréquence $H(j\omega)$ d'un tel système est tel que sa partie réelle et sa partie imaginaire sont transformées de Hilbert l'une de l'autre. Par contre, la liaison entre l'amplitude et la phase de cette réponse est beaucoup moins forte. On

peut montrer en fait qu'il existe une infinité de systèmes stables de fonction de transfert $H_0(p)$, $H_1(p)$, ... qui possèdent la même réponse en amplitude $|H(j\omega)|$ et qui ne diffèrent que par la présence de facteurs de la forme $(p-p_n)/(p+p_n^*)$ appelés « déphaseurs purs ». La fonction de transfert de ce type de facteur possède un zéro à partie réelle positive et un pôle symétrique de ce zéro par rapport à l'axe des imaginaires (fig. 1). Parmi cette infinité de systè-

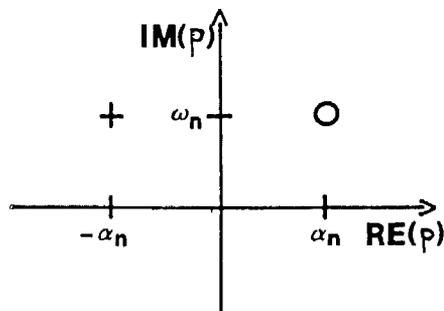


Fig. 1. — Pôle et zéro de la fonction de transfert du déphaseur pur.

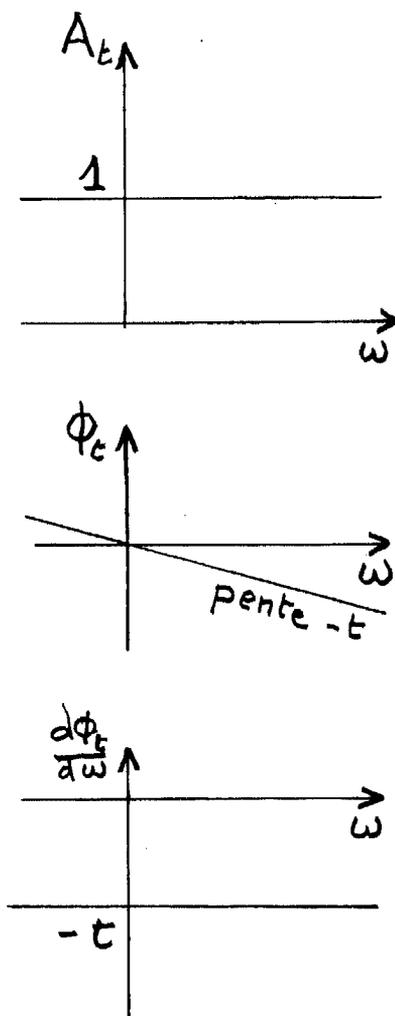


Fig. 2. — Réponse en fréquence du translateur.

mes stables, il en existe un dont la fonction de transfert ne contient pas de facteurs « déphaseurs purs » (c'est-à-dire n'a pas de zéros à partie réelle positive) et ce système est unique. On dit qu'il est à déphasage minimal. Sa fonction de transfert est analytique dans D^+ ($\text{Re } p > 0$) et n'y possède aucun zéro [6, 7, 8, 9].

La fonction de transfert du système physique peut se décomposer en un produit de trois facteurs :

$$H(p) = H_{t_0}(p) H_d(p) H_m(p).$$

Le premier facteur est un translateur (retard pur) :

$$H_{t_0}(p) = e^{-pt_0}.$$

Le retard de groupe correspondant est :

$$\tau_t = -d\varphi_{t_0}/d\omega = +t_0.$$

La réponse en fréquence correspondante est présentée figure 2.

Le deuxième facteur est la fonction de transfert de déphaseurs purs (passe tout) du type :

$$H_d(p) = \prod_n \frac{p-p_n}{p+p_n^*}.$$

Où p_n est un zéro à partie réelle positive de la fonction de transfert $p_n = \alpha_n + j\omega_n$ ($\alpha_n \neq 0$).

Le retard de groupe correspondant est :

$$\tau_d(\omega) = -\frac{d\varphi_d}{d\omega} = \sum_n \frac{2/\alpha_n}{1 + ((\omega - \omega_n)/\alpha_n)^2}.$$

La réponse en fréquence correspondant à un déphaseur pur est présentée figure 3.

Le troisième facteur correspond à la fonction de transfert du système à déphasage minimal associé.

La réponse en fréquence du système échographique s'écrira donc :

$$H(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi_R(\omega)} = A_m e^{j(\varphi_m + \varphi_d + \varphi_t)},$$

où φ_m est la phase minimale du système.

La phase spectrale s'écrira :

$$(1) \quad \varphi_R = \varphi_m + \varphi_d + \varphi_t.$$

2.2. INFLUENCE SUR LA RÉPONSE EN FRÉQUENCE DES PÔLES ET DES ZÉROS

La présence d'un pôle ou d'un zéro de la fonction de transfert a une influence sur la réponse en fréquence du système (fig. 4). Le pôle (simple) provoque un maximum d'amplitude et une variation de phase de $-\Pi$. L'existence d'un pôle est lié au phénomène de résonance.

Le zéro provoque un minimum d'amplitude et une variation de $+\Pi$ ou $-\Pi$ selon que la partie réelle du zéro est négative ou positive. En acoustique ce type de réponse en fréquence s'observe par exemple

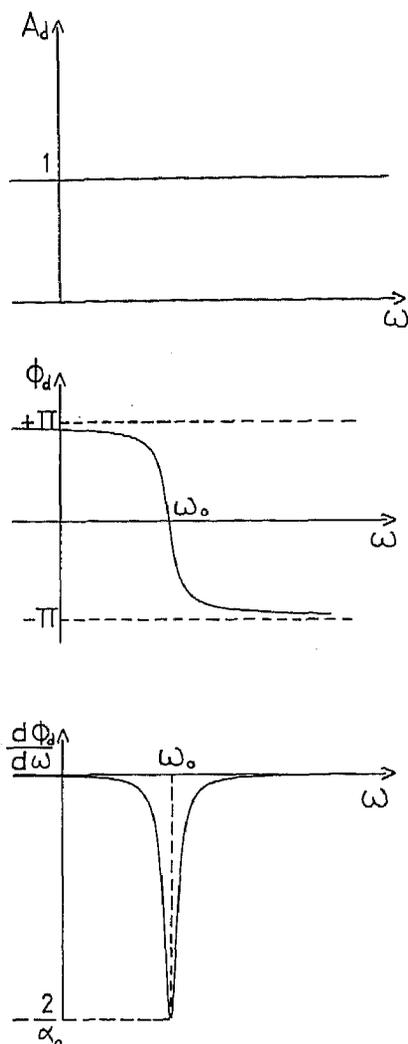


Fig. 3. — Réponse en fréquence du déphaseur pur.

lorsqu'on est en présence des phénomènes d'interférences.

2. 3. DÉTERMINATION DES POLES ET DES ZÉROS

La dérivée de la phase par rapport à la fréquence sera constituée d'une succession de pics positifs (contribution des zéros à partie réelle négative) et de pics négatifs (contribution des zéros à partie réelle positive et des pôles) illustrés par la figure 4.

Chaque pic est associé à un zéro ou à un pôle. La position (α_n, ω_n) de ces zéros ou pôles est déduite de l'amplitude du pic $(1/\alpha_n)$ et de son abscisse (ω_n) .

Il n'est pas possible de déterminer si un pic négatif correspond à un zéro à partie réelle positive ou à un pôle. Or nous connaissons la contribution des zéros à partie réelle positive. En effet d'après l'expression de la phase selon la formulation (1) la fonction :

$$\frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{d\varphi_R}{d\omega} - \frac{d\varphi_m}{d\omega},$$

présente uniquement des pics négatifs (du type de celui présenté fig. 3) qui permettent de calculer la position des zéros à partie réelle positive. En retranchant à la dérivée de la phase la contribution des zéros à partie réelle positive on obtient une fonction :

$$\frac{d\varphi'}{d\omega} = \frac{d\varphi_R}{d\omega} - \frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi_R}{d\omega} - \frac{d\varphi_m}{d\omega} \right),$$

qui présente des pics positifs (contribution des zéros à partie réelle négative) et de pics négatifs (contribution des pôles).

Notons que $d\varphi'/d\omega$ s'exprime également par :

$$\frac{d\varphi'}{d\omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi_R}{d\omega} + \frac{d\varphi_m}{d\omega} \right).$$

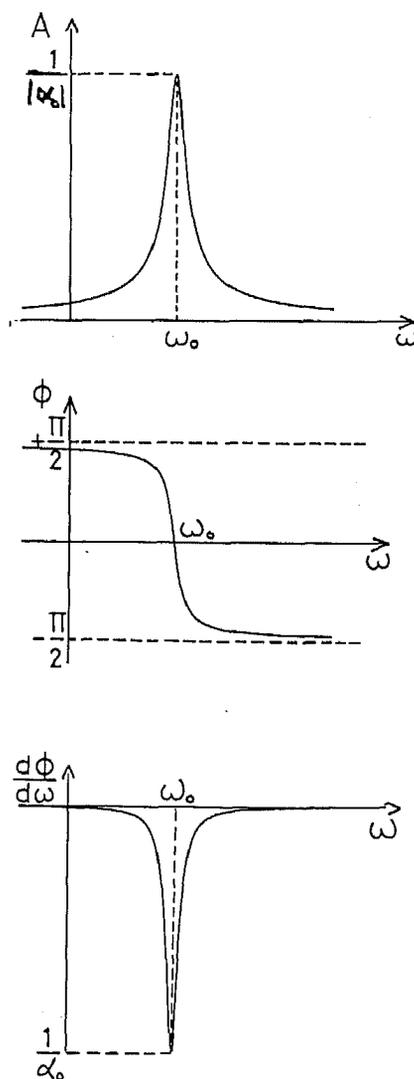
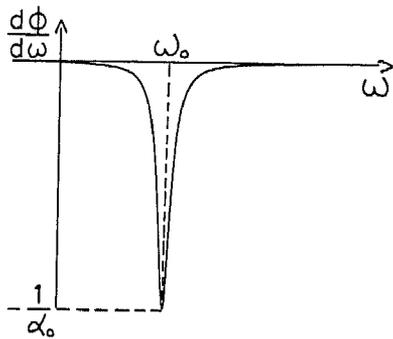
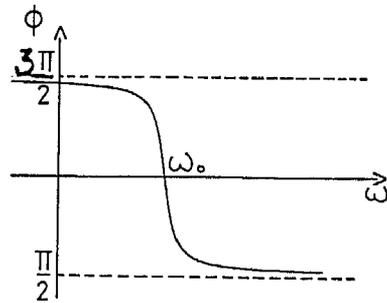
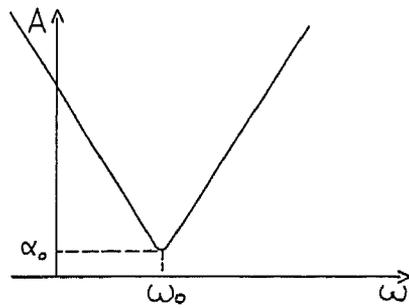


Fig. 4. — Influence sur la réponse en fréquence des pôles et des zéros de la fonction de transfert.



(b) Présence d'un zéro à partie réelle positive.

Fig. 4.

3. Résultats expérimentaux

Nous avons appliqué la méthode décrite précédemment à des cas expérimentaux. La figure 5 présente la répartition des zéros à partie réelle positive dans le cas d'une échographie sur un plan réfléchissant pour des angles d'incidence de 0 et 4°. Le transducteur utilisé est un transducteur plan dont la fréquence nominale est de 5 MHz et le diamètre de 6 mm. La distance transducteur cible est de 50 mm.

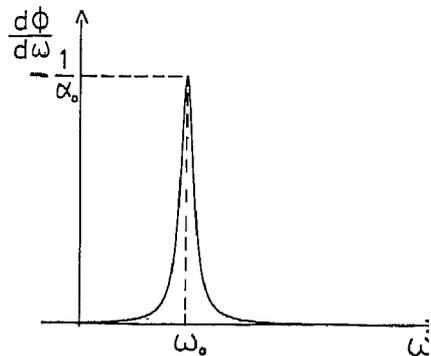
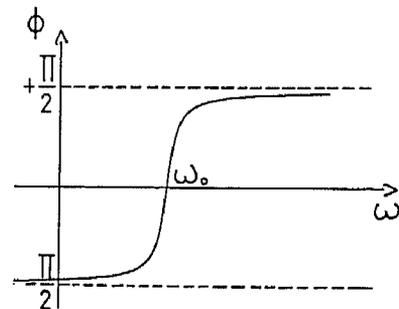
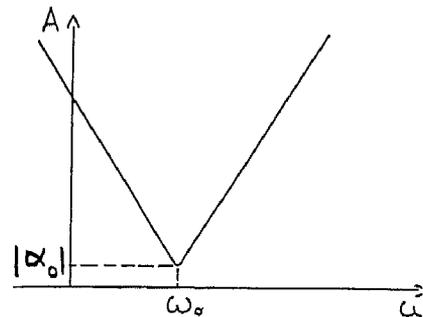
La figure 6 présente la répartition des zéros à partie réelle positive dans le cas d'une échographie sur une cible circulaire de 1 mm de diamètre dans les mêmes conditions expérimentales.

4. Simulation dans le cas du champ sonore émis par une ligne source

Pour une meilleure compréhension des résultats expérimentaux, nous avons étudié la répartition dans le plan complexe des zéros et des pôles de la fonction de transfert de quelques systèmes simples. Nous présentons ici les résultats obtenus dans le cas d'une ligne source composée de N sources ponctuelles séparées les unes des autres par une distance d et excitées simultanément par une impulsion (fig. 7). Nous pouvons considérer ce système comme un système de transmission dont l'entrée est l'excitation impulsionnelle et la sortie la pression au point d'observation $M(z, x)$.

La fonction de transfert s'écrit (N étant fini) :

$$H(p, M) = K \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i} e^{-p(r_i/c)}$$



(c) Présence d'un zéro à partie réelle négative.

Fig. 4.

où r_i est la distance du point M au point source S_i et c la vitesse de propagation des ondes. Le signal temporel en M est à support borné; la fonction $H(p, M)$ n'a pas de pôles.

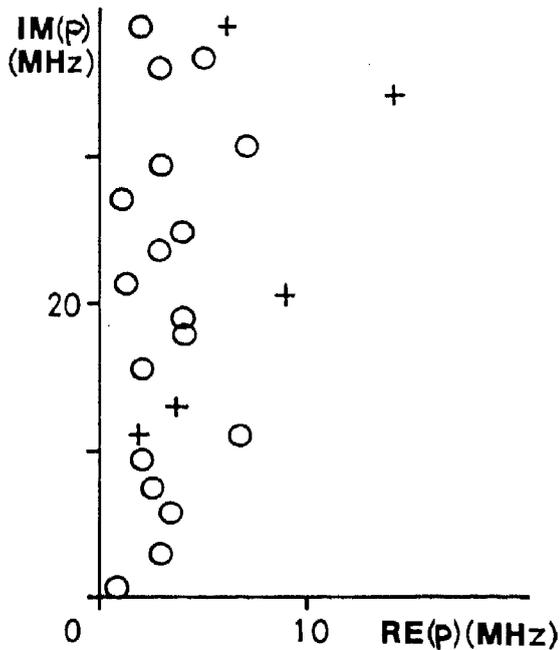


Fig. 5. — Répartition des zéros à partie réelle positive pour une échographie sur un plan réfléchissant [$+(i=0^\circ)$; $0(i=4^\circ)$].

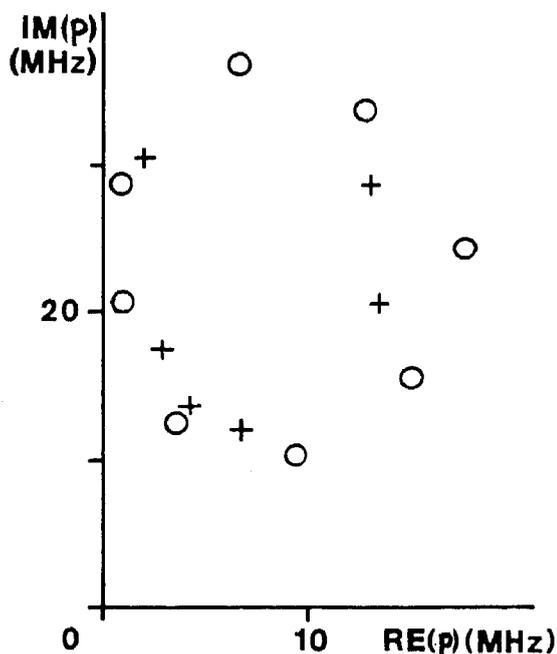


Fig. 6. — Répartition des zéros à partie réelle positive pour une échographie sur une cible circulaire de 1 mm de diamètre [$+(i=0^\circ)$; $0(i=4^\circ)$].

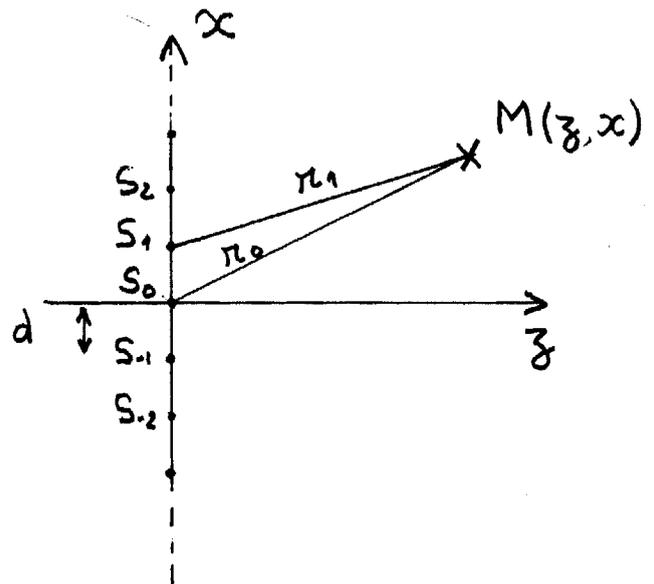


Fig. 7. — Ligne à N sources.

Supposons que la ligne source émet dans l'eau ($c=1500$ m/s) et examinons tout d'abord le cas où $N=10$ et où les sources sont espacées de $d=0,3$ mm. La figure 8 présente l'amplitude de la réponse en fréquence lorsque le point d'observation est sur l'axe des z à une distance $z=3$ mm.

La figure 9 présente la dérivée de la phase réelle $d\phi_R/df$ ainsi que la contribution des zéros à partie réelle négative $(d\phi_R/df) + (d\phi_m/df)$ et des zéros à partie réelle positive $(d\phi_R/df) - (d\phi_m/df)$. On constate qu'à chaque minimum d'amplitude correspond effectivement un zéro. Pour calculer la partie réelle de chacun des zéros à partir des courbes représentatives de $(d\phi_R/df) \mp (d\phi_m/df)$ il est nécessaire d'évaluer le terme correspondant au retard pur en choisissant un point de référence pour chacune des courbes. Cette référence est différente pour les deux courbes, ceci est dû au fait que la pente à l'origine de la phase minimum n'est pas nulle. L'origine des courbes représentatives de $(d\phi_R/df) \mp (d\phi_m/df)$ sont bien sûr symétriques par rapport à l'origine de la dérivée de la phase $d\phi_R/df$. Par contre les points de référence choisis ne sont pas forcément symétriques par rapport à l'origine de la dérivée de la phase.

La figure 10 présente la répartition des zéros dans le plan complexe. Il existe une infinité de zéros. Dans la bande de fréquence étudiée (0–40 MHz) on en compte huit dans le demi plan supérieur dont quatre sont à partie réelle positive.

Les figures 11 et 12 présentent l'amplitude de la réponse en fréquence et la distribution des zéros obtenue en un autre point d'observation M ($z=60$ mm, $x=9$ mm).

On observe une différence très marquée dans la répartition des zéros dans la bande de fréquence étudiée pour ces deux points d'observation. On distingue en

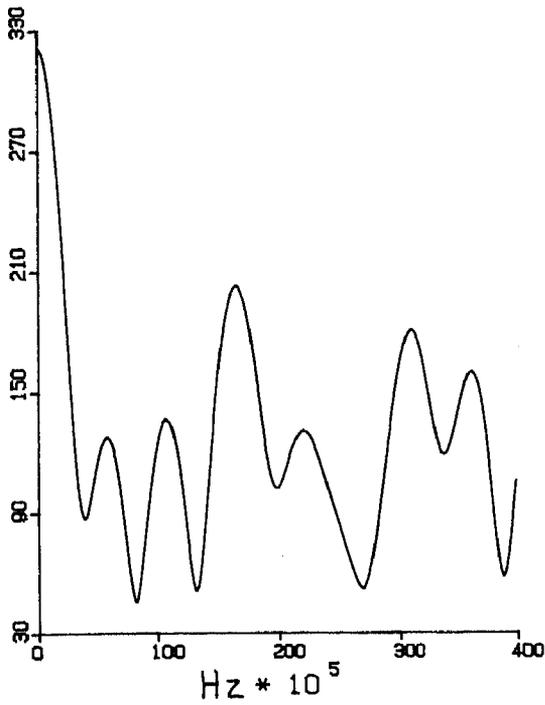


Fig. 8. — Amplitude de la réponse en fréquence d'une ligne source non focalisée ($N=10$, $d=0,3$ mm, $z=3$ mm, $x=0$).

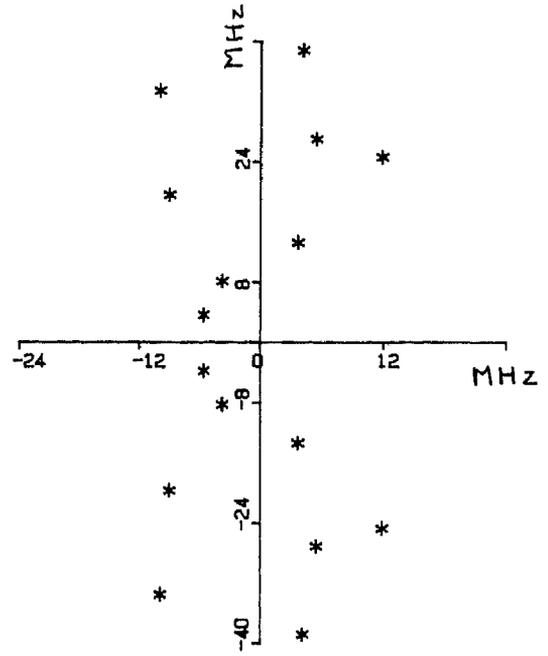


Fig. 10. — Répartition dans le plan complexe des zéros pour une ligne source non focalisée ($N=10$, $d=0,3$ mm, $z=3$ mm, $x=0$).

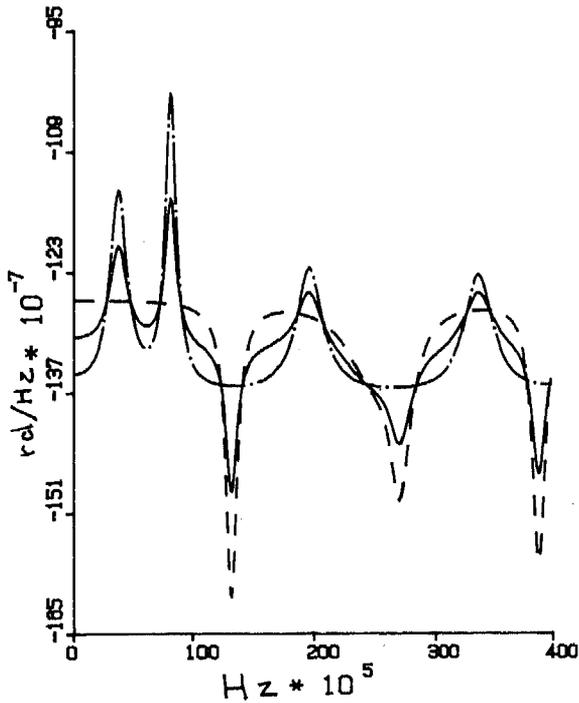


Fig. 9. — Dérivée de la phase et contribution des zéros à partie réelle positive et à partie réelle négative pour une ligne source non focalisée ($N=10$, $d=0,3$ mm, $z=3$ mm, $x=0$).

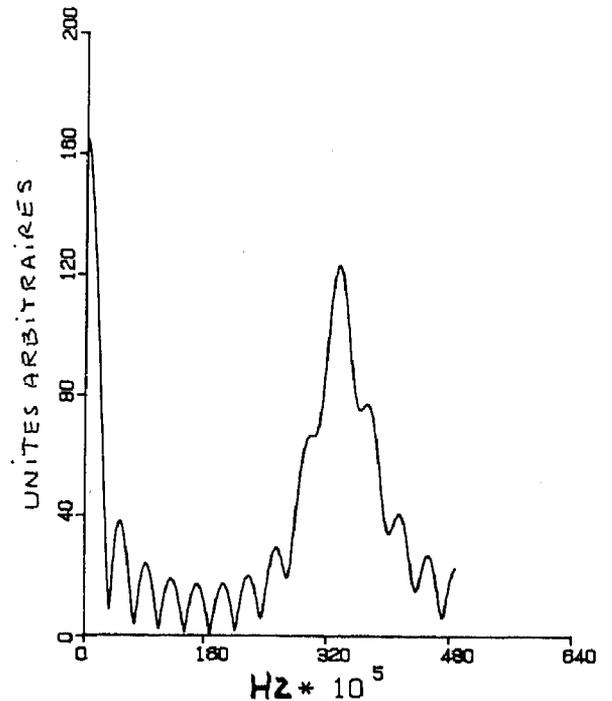


Fig. 11. — Amplitude de la réponse en fréquence d'une ligne source non focalisée ($N=10$, $d=0,3$ mm, $z=60$ mm, $x=9$ mm).

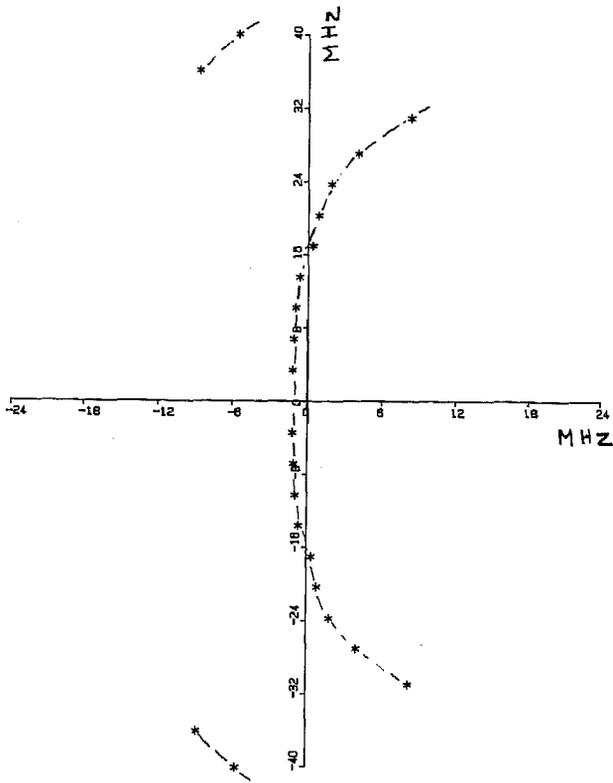


Fig. 12. — Répartition des zéros dans le plan complexe pour une ligne source non focalisée ($N=10$, $d=0,3$ mm, $z=60$ mm, $x=9$ mm).

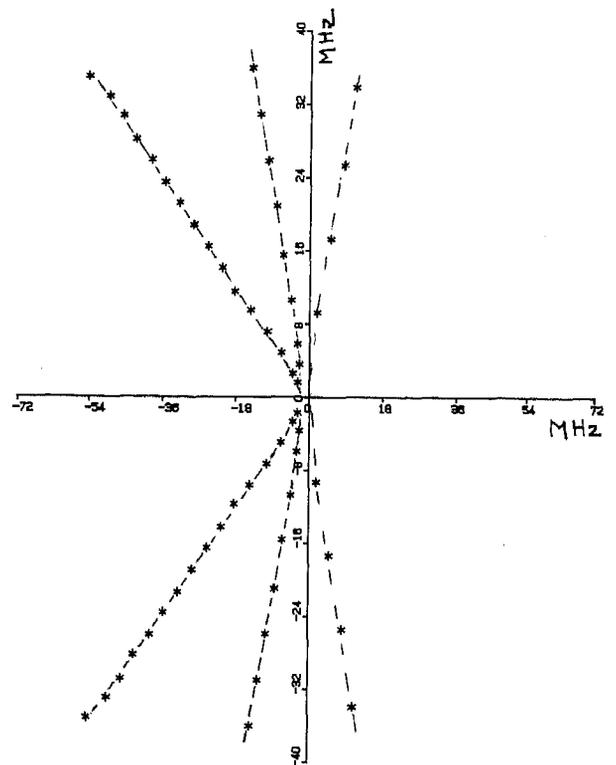


Fig. 13. — Évolution des trois premiers zéros sur l'axe des z dans le cas d'une ligne source non focalisée ($N=10$, $d=0,3$ mm, $x=0$).

fait des zones pour lesquelles il existe le même nombre de zéros dans la bande de fréquence considérée mais répartis différemment suivant le point d'observation.

Pour voir si les zéros évoluaient dans le plan complexe suivant un certain type de trajectoire, nous avons étudié l'apparition et le déplacement des trois premiers zéros lorsque le point d'observation se déplace sur l'axe des z en se rapprochant de la ligne source. Les résultats obtenus sont présentés dans le cas d'une ligne composée de 10 sources espacées de $d=0,3$ mm (fig. 13) et dans le cas d'une ligne composée de 19 sources espacées de $0,015$ mm (fig. 14).

Le relevé est effectué tous les 2 mm; dans le premier cas, le premier relevé est effectué à 30 mm dans le second cas, à 28 mm, ces distances étant les plus grandes (elles correspondent à la partie imaginaire la plus grande).

On constate que les zéros évoluent selon des trajectoires particulières selon le cas envisagé.

De façon générale, le nombre de zéros est lié à la modulation de l'amplitude spectrale, plus la modulation est élevée plus le nombre de zéros est important. A chaque minimum d'amplitude il y a existence d'un zéro et réciproquement puisque dans le cas de la ligne source il n'existe aucun pôle. Dans ce cas de simulation et toujours à cause de la non existence de

pôles, on aurait pu pour la détection des zéros se passer des courbes représentatives de $(d\varphi_R/df \mp (d\varphi_m/df))$ et les extraire directement de la dérivée de la phase $d\varphi_R/df$. Par contre, dans la pratique, même en l'absence de pôles, on détecte mieux les zéros à partie réelle positive car la courbe représentative de $(d\varphi_R/df) - (d\varphi_m/df)$ est beaucoup moins affectée par le bruit que celle de $d\varphi_R/df$ et $(d\varphi_R/df) + (d\varphi_m/df)$.

5. Conclusion

Beaucoup de travaux ont été effectués dans le but de caractériser des défauts dans des matériaux au moyen d'analyse spectrale du signal échographique ultrasonore. La plupart de ces travaux n'exploitent pas les informations contenues dans la phase.

Nous avons mis au point une méthode qui permet à partir des variations de la phase et de l'amplitude en fonction de la fréquence de déterminer la répartition dans le plan complexe des pôles et des zéros d'une fonction de transfert. Cette répartition semble être un paramètre beaucoup plus facilement exploitable que

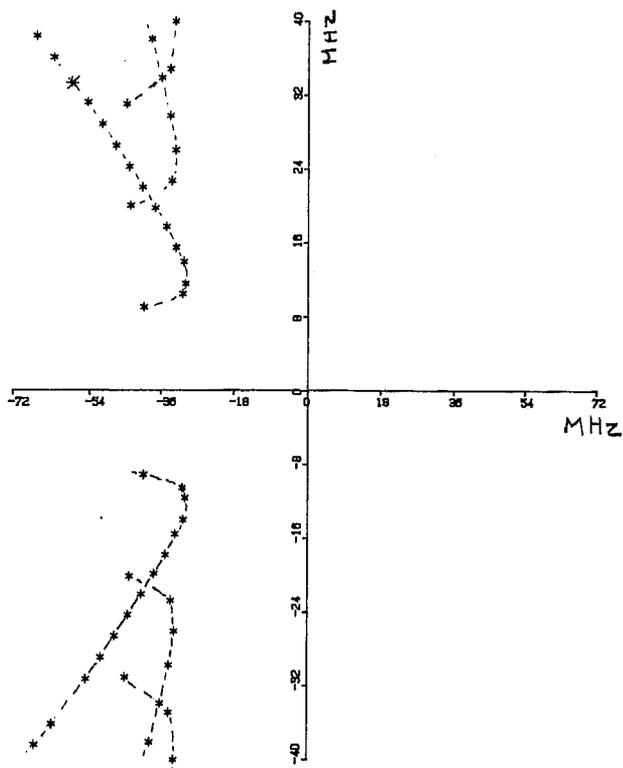


Fig. 14. — Évolution des trois premiers zéros sur l'axe des z dans le cas d'une ligne source non focalisée ($N=19$, $d=0,15$ mm, $x=0$).

ces variations de phase et d'amplitude. Nous avons appliqué cette méthode à des signaux provenant de différentes cibles. L'interprétation des résultats obtenus n'étant pas aisée, nous avons étudié cette répartition dans le cas de quelques systèmes simples notamment dans le cas d'une ligne source.

Les paramètres obtenus semblent bien adaptés aux méthodes de reconnaissance de formes qui permettront une classification de cibles ou de défauts. Cette méthode dont nous avons montré l'utilité en échographie ultrasonore peut trouver des applications très différentes dans d'autres domaines.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. NABEL et E. NEUMANN, Evaluation of flaw indications by ultrasonic pulse amplitude and phase spectroscopy, *Eight world conference on non destructive testing*, Cannes, 1976.
- [2] N. MERCIER et J. F. DE BELLEVAL, Use of the phase of the signal in Ultrasonic spectral analysis to evaluate flaws, *Ultrasonics International*, 1981.
- [3] N. MERCIER, D. LECURU et J. F. DE BELLEVAL, Problèmes posés par l'utilisation de la phase en spectroscopie ultrasonore, Congrès Euromech 154, Bordeaux, 1982, *Rev. d'Acoustique*, 16, n° 64, 1983.
- [4] N. MERCIER et J. F. DE BELLEVAL, Phase information in ultrasonic spectroscopy, *IEEE Ultrasonic Symposium*, Atlanta, 1983.
- [5] BODE, *Network analysis and feedback amplifier design*, Van Nostrand Company Inc., 1945.
- [6] E. ROUBINE, *Introduction à la théorie de la communication*, Masson, Paris.
- [7] J. C. GILLES, P. DECAULNE et M. PELLEGRIN, *Dynamique de la commande linéaire*, Dunod Paris.
- [8] M. BELLANGER, *Traitement numérique du signal*, Masson, Paris.
- [9] B. PICINBONO, *Éléments de théorie du signal*, Dunod Université, Paris.