

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS



NICE du 20 au 24 MAI 1985

COMMENT EXTRAIRE DE L'INFORMATION DE LA PHASE D'UN SIGNAL ; APPLICATION A L'ECHOGRAPHIE ULTRASONORE

Noëlle MERCIER ; Jean-François de BELLEVAL

UNIVERSITE DE COMPIEGNE - DIVISION ACOUSTIQUE ET VIBRATIONS INDUSTRIELLES - B.P. 233 - 60206 COMPIEGNE CEDEX

RESUME

Le Contrôle Non Destructif de matériaux par échographie ultrasonore (détection et caractérisation de défauts) n'exploite généralement qu'une très petite partie des informations disponibles en n'utilisant que l'amplitude de l'écho lié à un défaut. Depuis de nombreuses années un certain nombre de chercheurs ont essayé de tirer plus d'informations en effectuant une analyse spectrale du signal détecté, généralement par l'utilisation de l'amplitude spectrale seule. Nous nous sommes attachés à exploiter également les informations contenues dans la phase.

Le système échographique utilisé en Contrôle Non Destructif peut être considéré comme un système de transmission caractérisé par une fonction de transfert. L'existence d'une information supplémentaire contenue dans la phase et non dans l'amplitude se traduit par la présence de déphaseurs purs dans cette fonction de transfert.

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 ces variations de phase et d'amplitude. Nous avons appliqué cette méthode à des cas expérimentaux et nous présentons la répartition des zéros à partie réelle positive obtenue pour une échographie sur un plan réfléchissant.

Les résultats expérimentaux n'étant pas d'interprétation aisée, il a semblé intéressant d'étudier en simulation cette répartition dans le cas de systèmes plus simples. Nous présentons le cas de deux sources ponctuelles excitées de manière impulsionnelle et placées dans un milieu homogène. La fonction de transfert considérée est celle qui relie l'excitation des sources à un point récepteur du milieu de propagation. L'interprétation des résultats de cette simulation nous permet de mieux définir un temps de transfert. Nous présentons ensuite le cas de N sources équidistantes disposées suivant une droite, ces sources sont excitées simultanément ou avec une loi de retard.

Cette méthode que nous avons développée pour le Contrôle Non Destructif par échographie ultrasonore peut s'appliquer évidemment à tout système que l'on peut caractériser par une fonction de transfert.

SUMMARY

Non destructive testing of materials by means of ultrasonic echography (flaw detection and characterisation) generally uses only the amplitude of the received echoes. For many years attempts have been made to extract more information by spectral analysis of the detected signal mostly only using the spectral amplitude. The main purpose of our investigation was to evaluate information contained in the phase.

The echographic system used can be considered as a transmission system with characteristics described by its transfer function. The supplementary information in the phase is shown in the form of pure dephasers in the transfer function.

A method has been developed using the variations of phase and amplitude to determine the distribution of the poles and zeros of the transfer function in the complex plane. This distribution seems to be easier to exploit than the variations of phase and amplitude. The method has been applied to experimental cases and is illustrated with an example of the distribution of the zeros with a positive real part in the case of an echography on an infinite plane.

This distribution is difficult to interpret and so it has been studied by simulating a few simple cases. The case of two impulsive point sources placed in an homogeneous medium is presented. The system can be considered as a transmission system with the impulsive excitation as input and the pressure at the observation point as output. The interpretation of these simulation results permits a transfer time to be defined. The case of a line source is then presented composed of N equidistant point sources excited by an impulsion either simultaneously or with a variable delay.

This method could also be applied to other systems characterized by a transfer function and it is not limited to ultrasonic echography.



COMMENT EXTRAIRE DE L'INFORMATION DE LA PHASE
D'UN SIGNAL ; APPLICATION A L'ECHOGRAPHIE ULTRASONORE

I - INTRODUCTION

L'échographie ultrasonore est un procédé couramment utilisé en contrôle non destructif. A de rares exceptions près qui sont des cas particuliers, la phase n'est pas prise en compte, la difficulté étant la présence d'un terme relatif à la propagation de l'onde entre le transducteur et le défaut. Le paramètre que nous avons choisi d'exploiter est la phase spectrale du signal. Le phénomène de propagation se traduit alors par une rotation rapide entre $-\pi$ et $+\pi$ (variation de phase linéaire en fonction de la fréquence). De ce fait, on ne peut choisir comme origine des temps le moment où le système est excité. Pour surmonter cette difficulté, l'idée a été d'étudier non pas la phase elle-même mais le retard de groupe du signal échographique (ou la dérivée de la phase qui lui est proportionnelle) [1,2].

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 la fonction de transfert du système échographique [3]. 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 excitées simultanément par une impulsion ou avec une loi de retard.

2 - DETERMINATION DES POLES ET DES ZEROS DE LA FONCTION DE TRANSFERT DU SYSTEME ECHOGRAPHIQUE

Le fait d'avoir envisagé le système échographique utilisé comme un système de transmission où l'entrée est l'impulsion d'excitation du transducteur et la sortie le signal échographique capté par le transducteur a permis de caractériser ce système par une fonction de transfert et d'en déduire une expression de la phase spectrale ϕ_r [4] sous la forme :

$$\phi_r = \phi_t + \phi_d + \phi_m$$

où ϕ_t est la phase d'un translateur (retard pur), ϕ_m la phase minimale du système et ϕ_d la phase de déphaseurs purs

$$\phi_d = \sum_n \arg \left[\frac{-\alpha_n + j(\omega - \omega_n)}{\alpha_n + j(\omega - \omega_n)} \right]$$

(α_n, ω_n) étant les coordonnées dans le plan complexe des zéros à partie réelle positive de la fonction de transfert du système échographique. (Nous pouvons noter que dans certains cas où la propagation s'accompagne d'une déformation de la forme temporelle de l'onde, le temps de transfert n'est pas aisément défini dans le domaine temporel, le terme ϕ_t parfaitement mesurable peut permettre de mieux définir ce temps).

L'originalité de la méthode de détermination des pôles et des zéros [3] réside dans le fait que le paramètre principal exploité est le retard de groupe. En effet, on peut montrer que la dérivée de la phase par rapport à la fréquence $d\phi_r/d\omega$ est constituée d'une succession de minimums (contribution des pôles et des zéros à partie réelle positive) et de maximums (contribution des zéros à partie réelle négative) dont les coordonnées ($\omega_n, 1/\alpha_n$) sont directement reliées à la partie réelle α_n et à la partie imaginaire ω_n des pôles et des zéros. Si on note ϕ_m la phase minimale du système, la courbe représentative de $(d\phi_r/d\omega) - (d\phi_m/d\omega)$ ne présente que des minimums dont les coordonnées permettent d'obtenir la position des zéros à partie réelle positive ce qui lève

l'indétermination. Quant à la courbe représentative de $(d\phi_r/d\omega + d\phi_m/d\omega)$ elle ne contient que la contribution des zéros à partie réelle négative et des pôles.

Nous avons appliqué cette méthode de détermination des pôles et des zéros à des cas expérimentaux pour lesquels on constate que la courbe $(d\phi_r/d\omega) - (d\phi_m/d\omega)$ est beaucoup moins perturbée par le bruit que celle de $d\phi_r/d\omega$ et de $(d\phi_r/d\omega) + (d\phi_m/d\omega)$. La figure 1 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° .

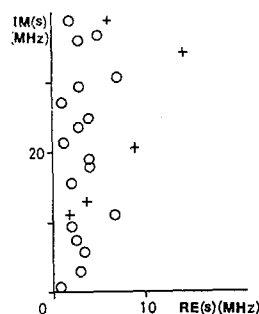


Figure 1 - Répartition des zéros à partie réelle positive pour une échographie sur un plan réfléchissant [$+(i=0^\circ)$; $o(i=4^\circ)$]

Le transducteur utilisé est un transducteur plan dont la fréquence nominale est de 5MHz et le diamètre 6mm. La distance transducteur cible est de 50mm. Un fait remarquable est que l'on obtient une information pour des plages de fréquence beaucoup plus larges que celles étudiées classiquement lorsqu'on exploite uniquement l'amplitude spectrale du signal.

3 - SIMULATION DANS LE CAS DU CHAMP SONORE EMIS 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 placées dans un milieu homogène séparées les unes des autres par une distance d et excitées par une impulsion soit simultanément soit avec une loi de retard [5] permettant de créer une onde focalisée en F (fig. 2).

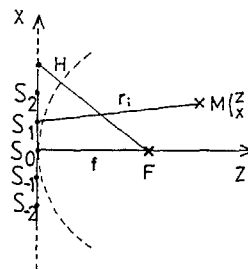


Figure 2 - Principe de la ligne source

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 $M(z, x)$. Dans le cas de l'onde focalisée, cette pression s'écrit :

COMMENT EXTRAIRE DE L'INFORMATION DE LA PHASE
D'UN SIGNAL ; APPLICATION A L'ECHOGRAPHIE ULTRASONORE

$$p(M) = K \sum_1 (1/r_1) \exp [-jk(r_1 - \sqrt{f^2 + x_1^2} + f)]$$

où r_1 est la distance du point M au point source S_1 , x_1 l'ordonnée du point source S_1 et f la distance focale.

3.1 - Cas ou $N = 2$

Nous allons étudier plus particulièrement le cas de deux sources ponctuelles excitées simultanément qui permet d'une part d'approfondir la notion de système à déphasage minimal dans le domaine de l'acoustique et d'autre part d'expliquer de façon simple que la présence d'un zéro est liée au phénomène d'interférence.

La fonction de transfert $H(s,M)$ est la transformée de Laplace de la réponse impulsionnelle :

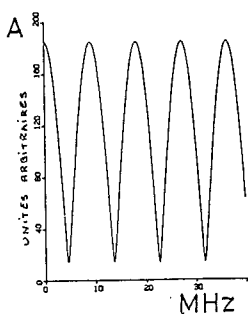
$$H(s,M) = K [(1/r_1) \exp(-sr_1/c) + (1/r_2) \exp(-sr_2/c)]$$

où c est la vitesse de propagation des ondes dans le milieu envisagé. Le signal temporel est à support borné, la fonction $H(s,M)$ n'a pas de pôles. La position des zéros est :

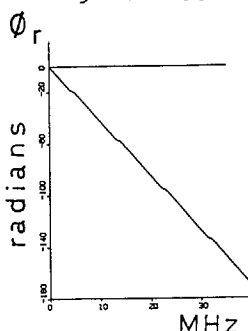
$$\begin{cases} \alpha_n = c \text{Log}(r_1/r_2) / (r_2 - r_1) \\ \omega_n = (2n+1)\pi c / (r_2 - r_1) \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

On constate qu'il existe une infinité de zéros répartis sur une droite parallèle à l'axe des imaginaires et équidistants entre eux de $\Delta\omega = 2\pi c / (r_2 - r_1)$. Si $r_1 = r_2$ (M est sur l'axe des z) $\Delta\omega$ est infini et les zéros sont à l'infini si $r_1 \neq r_2$, α est toujours négatif. Les zéros sont donc à partie réelle négative. Néanmoins, le système n'est pas à déphasage minimal. La figure 3 présente l'amplitude de la phase de $p(M)$ pour des valeurs particulières de $d=0,3\text{mm}$, $z=0,9\text{mm}$, $x=0,6\text{mm}$, $c=1500\text{m/s}$. L'amplitude passe par des minimums pour des valeurs discrètes de la fréquence :

$$\omega_n = (2n+1)\pi c / (r_1 - r_2) \quad n = 0, 1, 2, \dots$$



a) AMPLITUDE



b) PHASE

Figure 3 - Représentation spectrale dans le cas où $N=2$, $d=0,3\text{mm}$, $z=0,9\text{mm}$, $x=0,6\text{mm}$, $c=1500\text{m/s}$

Quant à la phase elle est bien constituée comme l'indique la théorie [3] de la superposition d'un terme linéaire en fonction de la fréquence et de variation relativement rapide de π au niveau des minimums d'amplitude, ces variations étant dues à la présence d'un zéro (α, ω) dans la fonction de transfert. La figure 4 représente la phase minimale ϕ_m du système et la figure 5 la dérivée de la phase réelle $\frac{d\phi_r}{d\nu}$ et de la phase minimale $\frac{d\phi_m}{d\nu}$.

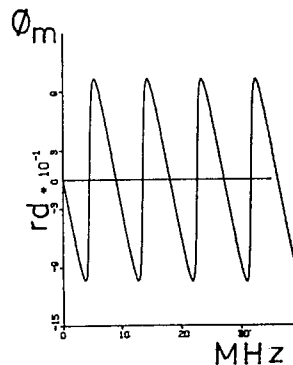


Figure 4 - Phase minimale ($N=2$, $d=0,3\text{mm}$, $z=0,9\text{mm}$, $x=0,6\text{mm}$, $c=1500\text{m/s}$)

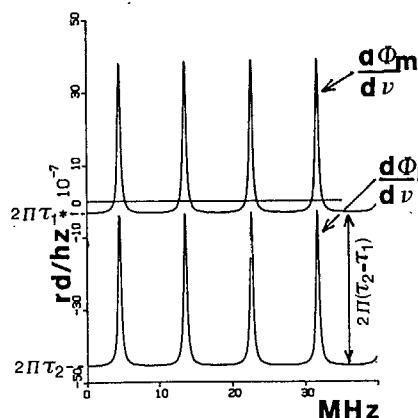


Figure 5 - Dérivée de la phase réelle et de la phase minimale ($N=2$, $d=0,3\text{mm}$, $z=0,9\text{mm}$, $x=0,6\text{mm}$, $c=1500\text{m/s}$)

On constate que la différence entre phase réelle et phase minimale est un terme retard pur tel que $(d\phi_r/d\nu) - (d\phi_m/d\nu) = 2\pi(\tau_2 - \tau_1)$. Pour mettre en évidence l'effet des zéros on peut retrancher à la phase réelle le terme $\phi_t = 2\pi\tau_2$ correspondant au retard pur ce qui donne une phase dont la pente est nulle à l'origine (fig. 6) avec des variations rapides de π au niveau des minimums d'amplitude. Pour les filtres linéaires régis par des équations différentielles à coefficients constants [6,7,8] la phase minimale n'inclut pas de terme retard pur. Une telle phase en acoustique ne correspond pas à une réponse impulsionnelle causale. Pour obtenir une réponse impulsionnelle causale, il faut rajouter un terme de retard pur (l'équivalent est un filtre à déphasage linéaire [9]). Le retard le plus petit qui le permet est le retard τ_1 , représenté sur la figure 5 et le système correspondant est alors à déphasage minimal.



COMMENT EXTRAIRE DE L'INFORMATION DE LA PHASE
D'UN SIGNAL ; APPLICATION A L'ECHOGRAPHIE ULTRASONORE

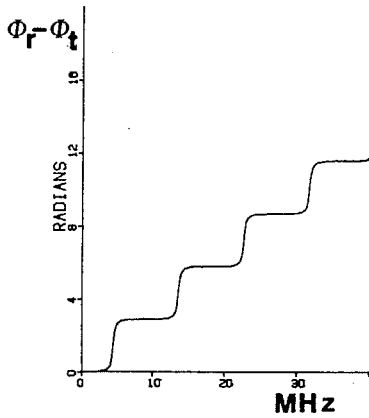


Figure 6 - Phase réelle à laquelle on a retranché le terme correspondant au retard pur (N=2 d=0,3mm z=0,9mm x=0,6mm c=1500m/s).

On connaît le système d'interférence créé par deux sources ponctuelles excitées sinusoidalement de façon synchrone et en phase. L'amplitude de pression est minimale aux points pour lesquels la différence de marche est égale à un multiple impair de la demi longueur d'onde. Ces points se répartissent sur des hyperboles telles que $r_2 - r_1 = (2n+1)\lambda/2$. Cette expression peut être écrite en terme de pulsation sous la forme $\omega_n = (2n+1)\pi c / (r_2 - r_1)$. On retrouve l'expression de la pulsation des zéros obtenue précédemment. Les hyperboles sont donc le lieu des points pour lesquels on a zéro de la fonction de transfert à la pulsation ω_n . Les points vibrant avec la même constante de phase se répartissent sur des ellipses d'égal phase (fig.7).

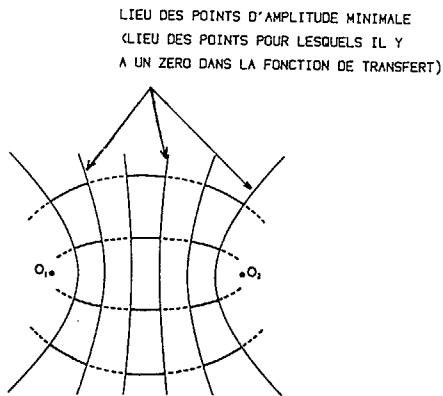


Figure 7 - Ellipses d'égal phase dans le cas où N=2

Les points situés sur les parties pleines des ellipses vibrent en phase. Ceux qui sont sur les pointillés vibrent également en phase mais leur mouvement est en opposition de phase avec celui des précédents. Lorsqu'on décrit une ellipse d'équiphasse, la phase change brusquement de π lorsqu'on coupe une ligne d'amplitude minimale. Il y a alors présence d'un zéro dans la fonction de transfert. Notons enfin que dans le cas où on peut négliger la décroissance en $1/r$ dans l'expression de la pression, le terme linéaire en fonction de la fréquence correspond au retard pur et $\phi_t = \omega(r_1 + r_2) / 2c$.

Nous avons montré ainsi sur un exemple simple que l'existence des zéros est liée au phénomène d'interférence.

3.2 - Cas où N = 30

Nous avons étudié la répartition des zéros (il n'existe pas de pôles) dans le cas d'une ligne constituée de 30 sources lorsque $d = 0,2\text{mm}$ et que le point M est sur l'axe des z ($x=0$). La figure 8 présente la répartition obtenue lorsque M est à une distance $z=7\text{mm}$ pour une ligne source non focalisée.

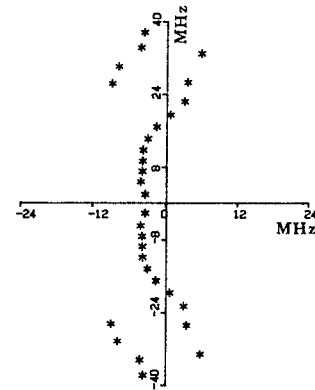


Figure 8 - Répartition des zéros dans le cas d'une ligne source non focalisée (N=30 d=0,2mm z=7mm x=0)

Dans la bande de fréquence étudiée (sauf pour les très basses fréquences inférieures à un MHz) M se trouve dans la zone de "champ proche" du champ émis par la ligne source. Dans cette zone il y a de nombreuses interférences ce qui explique le grand nombre de zéros obtenus. Notons que dans ce cas, l'exploitation seule de la dérivée de la phase $d\phi_r/d\omega$ ne permettrait pas de séparer les zéros à partie réelle positive de ceux à partie réelle négative. Par contre les courbes représentatives de $(d\phi_r/d\omega - d\phi_t/d\omega)$ et $(d\phi_r/d\omega + d\phi_t/d\omega)$ a permis de les séparer (fig. 9 et 10). Au fur à mesure que la fréquence augmente les zéros qui apparaissent sont des zéros à partie réelle négative.

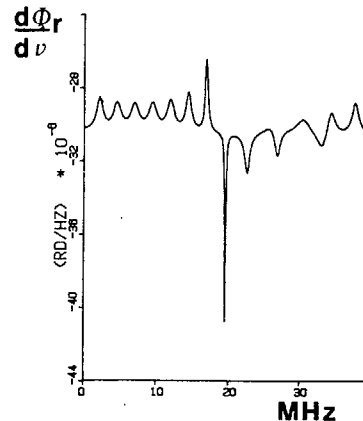


Figure 9 - Dérivée de la phase réelle pour une ligne source non focalisée (N=30 d=0,2mm z=7mm x=0)



COMMENT EXTRAIRE DE L'INFORMATION DE LA PHASE
D'UN SIGNAL ; APPLICATION A L'ECHOGRAPHIE ULTRASONORE

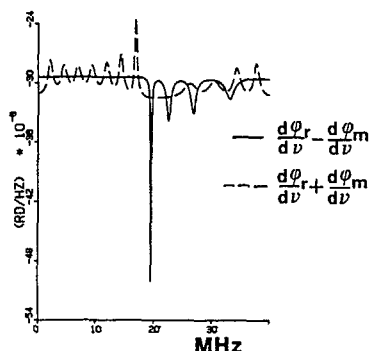


Figure 10 - Courbes représentatives ($\frac{d\phi_r}{d\nu} - \frac{d\phi_m}{d\nu}$) et de ($\frac{d\phi_r}{d\nu} + \frac{d\phi_m}{d\nu}$) pour une ligne source ($N=30$ $d=0,2\text{mm}$ $z=7\text{mm}$ $x=0$ non focalisée)

Au fur à mesure que la fréquence augmente les zéros qui apparaissent sont des zéros à partie réelle négative.

La figure 11 présente la répartition obtenue dans le cas d'une ligne source focalisée ($f=17\text{mm}$) lorsque le point M se trouve avant le point focal ($z=7\text{mm}$). De même que précédemment, au fur et à mesure que la fréquence augmente les zéros qui apparaissent sont des zéros à partie réelle négative.

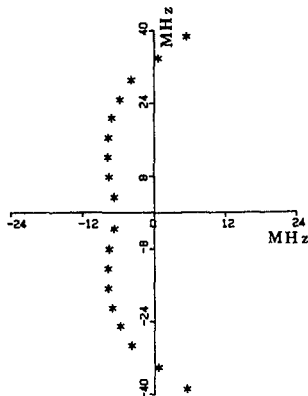


Figure 11 - Répartition des zéros dans le cas d'une ligne source focalisée avant le point focal ($N=30$ $d=0,2\text{mm}$ $z=7\text{mm}$ $x=0$ $f=17\text{mm}$)

La figure 12 présente la répartition obtenue dans le cas d'une ligne source focalisée ($f=17\text{mm}$) lorsque le point M se trouve après le point focal ($z=27\text{mm}$). Les zéros cette fois sont à partie réelle positive (notons la valeur importante de leur partie réelle). Ils sont beaucoup moins nombreux que dans le cas précédent. Toutefois lorsque le point M s'éloigne de la ligne source, d'autres zéros à partie réelle positive apparaissent, puis enfin des zéros à partie réelle négative, l'amplitude cependant devient de plus en plus faible.

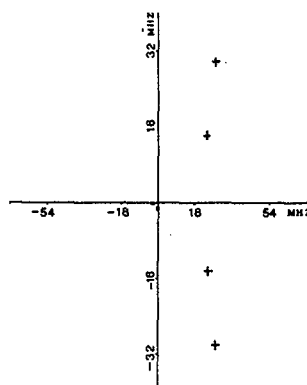


Figure 12 - Répartition des zéros dans le cas d'une ligne source focalisée après le point focal ($N=30$ $d=0,2\text{mm}$ $z=27\text{mm}$ $x=0$ $f=17\text{mm}$)

4 - CONCLUSION

Nous avons, en échographie ultrasonore, étudié la phase comme paramètre principal malgré la difficulté que présentait la présence d'un terme relatif à la propagation entre le transducteur et le défaut. Cette étude a permis de mettre au point une méthode qui permet à partir du retard de groupe du signal de déterminer la répartition dans le plan complexe des pôles et des zéros de la fonction de transfert. Nous avons appliqué cette méthode à des signaux provenant de différentes cibles et étudié la répartition dans quelques cas simples et montré que la présence d'un zéro est lié au phénomène d'interférence. La répartition des zéros est un paramètre facilement exploitable et semble bien adapté aux méthodes de reconnaissance de formes qui permettront une classification des défauts.

REFERENCES

- [1] N. MERCIER, J.F. de BELLEVAL - Use of the phase of the signal in Ultrasonic spectral analysis to evaluate flaws. Ultrasonics International 1981
- [2] N. MERCIER, D. LECURU, J.F. de BELLEVAL - Problèmes posés par l'utilisation de la phase en spectroscopie ultrasonore. Congrès Euromech 154 - Bordeaux 1982 - Revue d'Acoustique - N° 64-1983
- [3] N. MERCIER, J.F. de BELLEVAL - Exploitation de l'amplitude et de la phase en analyse spectrale du signal échographique. Deuxième Colloque sur la diffusion des Ondes Ultrasonores - Paris VII - Décembre 1984 (à paraître dans la Revue Traitement du Signal)
- [4] N. MERCIER, J.F. de BELLEVAL - Phase information in ultrasonic spectroscopy. I.E.E.E. Ultrasonic Symposium Atlanta 1983
- [5] J.F. de BELLEVAL, M. FINK, N. MERCIER - Focusing of ultrasonic waves at obliqueness incidence by a linear array of transducers. Ultrasonics International 1979
- [6] BODE - Network analysis and feedback amplifier design - Van Nostrand Company - Inc. 1945
- [7] J.C. GILLES, P. DECAULNE, M. PELLEGRIN - Dynamique de la commande linéaire - DUNOD



COMMENT EXTRAIRE DE L'INFORMATION DE LA PHASE
D' UN SIGNAL ; APPLICATION A L'ECHOGRAPHIE ULTRASONORE

- [8] E. ROUBINE - Introduction à la théorie de la Communication MASSON
- [9] J. MAX - Méthodes et Techniques de traitement de Signal - Tome 1 MASSON