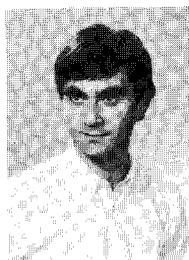


Analyse spectrale
en contrôle non destructif
par ultrasons

Spectral analysis in non destructive evaluation



Bernard BALIGAND

Framatome, B.P. n° 13, Centre d'Essais Non Destructifs, 71380 SAINT-MARCEL

Bernard Baligand a soutenu une thèse de doctorat de 3^e cycle de l'INPG (1985) en traitement du signal. Après avoir étudié le filtrage de Widrow au CEPHAG où il obtient son DEA (1982), il a travaillé un an au LETI (CENG) comme scientifique du contingent. Il travaille depuis 1983 au Centre d'Essais Non Destructif de Framatome et est chargé actuellement du développement et de l'application du traitement du signal en contrôle non destructif (détection et caractérisation de défauts).



Michel GROZELLIER

Framatome, B.P. n° 13, Centre d'Essais Non Destructifs, 71380 SAINT-MARCEL

Diplômé de l'Institut de Chimie et Physique Industrielle de Lyon, Michel Grozellier est Responsable de la section Traitement du Signal au Centre d'Essais Non Destructifs de Framatome.

Il travaille notamment à l'amélioration de la détection ultrasonore des indications dans les matériaux à forts bruits de structure, et à la caractérisation automatique des défauts détectés.

RÉSUMÉ

Une approche nouvelle en contrôle non destructif par ultrasons est proposée. Elle met en œuvre l'analyse spectrale autorégressive (AR) des signaux d'échographie ultrasonore appliquée aux composants nucléaires.

L'objectif poursuivi est d'améliorer le rapport signal sur bruit en modélisant la partie bruit de structure afin de l'éliminer par blanchiment.

Le bruit de structure qui perturbe la détection des indications est de nature transitoire. Il est découpé en petites tranches supposées stationnaires. Pour chaque tranche, on compare l'analyse spectrale obtenue par corrélogramme et par modèle AR (Burg et Marple). Les problèmes de calibration spectrale propres aux modèles AR ont conduit à examiner la stationnarité à l'aide du corrélogramme.

Une représentation de l'évolution spectrale en fonction de la profondeur et du déplacement de la sonde montre clairement la stationnarité du signal lors d'une inspection à profondeur constante et met en évidence la non-stationnarité lorsqu'on observe les tranches à différentes profondeurs.

MOTS CLÉS

Analyse spectrale, contrôle non destructif, ultrasons, corrélogramme, modèles autorégressifs (AR).

SUMMARY

A new approach in NDE (Non Destructive Evaluation) by Ultrasound is proposed. It is the implementation of the autoregressive spectral analysis (AR) of the Ultrasonic echographic signals applied to Nuclear components. The purpose is to improve the signal to noise ratio by modeling the structural noise to cancel it by witness technic.

The structural noise that disturb detection is of transient nature. It is parted in small sections supposed to be stationary. For each section, the spectral analysis obtained by correlogram and AR models (Burg and Marple) is compared. The spectral agibration problem of AR model induce us to use correlogram to examine the stationarity.

A spectral representation versus depth and moving of the probe clearly shows the stationarity of the signal during inspection at constant depth and shows the non-stationary when the various sections are observed at different depths.

KEY WORDS

Spectral analysis, non destructive evaluation, ultrasound correlogram, autoregressive models (AR).

TABLE DES MATIÈRES

- 1. Introduction**
- 2. Physique du problème. Description**
- 3. Comparaison de deux méthodes d'analyse spectrale**
 - 3.1. Méthodes de Fourier
 - 3.2. Méthodes autorégressives
 - 3.2.1. Justification de l'emploi du modèle
 - 3.2.2. Le modèle AR
 - 3.2.3. Techniques d'estimation des coefficients du modèle
 - 3.3. Résultats expérimentaux
- 4. Étude de la stationnarité en profondeur et pour des déplacements latéraux dans le matériau**
- 5. Conclusion**
- Bibliographie**

cela étudié la stationnarité du bruit en réalisant l'analyse spectrale à l'aide de différentes méthodes.

Après avoir décrit le problème physique, on compare deux méthodes d'analyse spectrale : analyse de Fourier et méthodes paramétriques. Ceci permet de présenter l'évolution du spectre en fonction de la profondeur et lorsque la sonde se déplace latéralement en utilisant le corrélogramme.

L'étude faite sur les modèles paramétriques autorégressifs est motivée par l'idée de blanchir le bruit de structure à l'aide d'un modèle prédicteur-soustracteur et ainsi d'améliorer le rapport signal sur bruit.

2. Physique du problème

Dans le domaine du contrôle non destructif, la technique ultrasonore est couramment utilisée pour la recherche des défauts de structure au sein de pièces mécaniques. L'opération est réalisée par une sonde à la fois émettrice et réceptrice excitée par une impulsion. Les impulsions réfléchies par les discontinuités situées sur le trajet du faisceau sont numérisées et traitées.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Les acquisitions sont réalisées sur bloc d'acier inoxydable représentatif de la texture des coudes moulés de la tuyauterie primaire (des cuves de réacteurs PWR). Dans ce bloc [fig. 1 (a)], cinq réflecteurs dont trois génératrices de trou T_1 , T_2 , T_3 et deux entailles RI, RE ont été usinés.

Le sondage est réalisé en immersion dans l'eau (couplant) avec des ondes longitudinales à 45° dans l'acier, à l'aide d'un transducteur à bande fréquentielle large [fig. 1 (d)] (conditions acoustiques quasi optimales).

La figure 1 (b) est donnée pour une position de sonde lorsque l'on cherche à détecter le réflecteur T_3 . De

1. Introduction

Le sondage par technique ultrasonore des matériaux à structure cristallographique grossière type austénitique fait apparaître un bruit de structure sur les échographies. Il s'agit d'un bruit de réverbération non stationnaire sur une durée d'observation T de $41 \mu s$, de produit $B.T=46$ et parfaitement reproductible pour une position de sonde.

L'objectif poursuivi est l'amélioration de la détection de défauts dans les aciers austénitiques. On a pour

APPLICATIONS

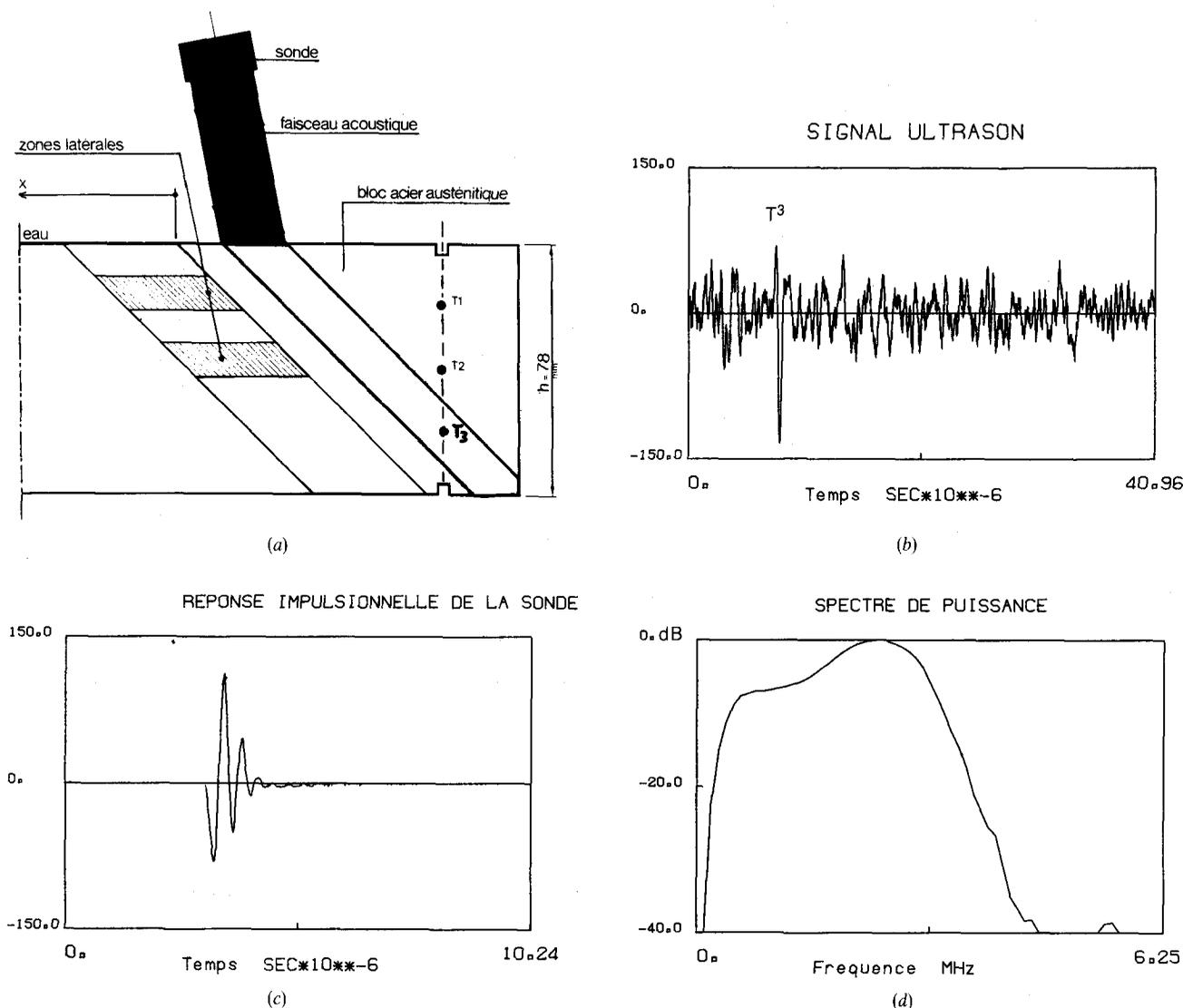


Fig. 1. — Caractéristiques de l'échographie.

plus, sont représentées des zones latérales correspondant à des tranches échographiques de même profondeur et obtenues quand la sonde se déplace parallèlement à la surface du bloc.

Le signal observé [fig. 1 (b)] est constitué d'un signal certain (réflexion de T_3) et de la somme des ondes réfléchies par les grains de structure situés sur le trajet acoustique.

Les échographies sont numérisées sur 512 points à 12,25 MHz et découpées en tranches supposées stationnaires de N points ($N=64$) décalées de n points ($n=16$). A chaque tranche une moyenne nulle est imposée.

Le spectre de puissance [fig. 1 (d)] est le module carré de la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle de la sonde [fig. 1 (c)]. Celle-ci est obtenue en immersion dans l'eau sur réflecteur parfait plan placé perpendiculairement à l'axe du faisceau acoustique.

3. Comparaison de deux méthodes d'analyse spectrale

Globalement, le problème d'analyse spectrale se pose lorsqu'il s'agit d'estimer une densité spectrale de puissance (DSP), $\gamma_X(\nu)$ de N échantillons connus d'un signal X .

Mathématiquement, la DSP est calculée à partir d'une infinité d'échantillons du signal.

Or, ne disposant que de N points, il est nécessaire de faire des hypothèses sur les points en dehors de la fenêtre d'observation :

(a) L'hypothèse la plus classique consiste à estimer la fonction de corrélation sur les N points du signal; les autres points sont mis à zéro. Cela conduit aux métho-

des mettant en œuvre la transformée de Fourier (corrélogramme, périodogramme moyenné).

(b) Le second type d'hypothèse revient à extrapoler la fonction de corrélation en dehors de son support par des valeurs qui maximisent le flux d'entropie du signal [méthode MEM (MEM : Maximum Entropy Method)]. Maximiser l'entropie du signal consiste à contraindre le moins possible le signal en dehors de son support connu.

Pour un processus gaussien, la méthode MEM revient à maximiser la fonction :

$$H = \int_{-\infty}^{+\infty} \log \gamma_X(v) dv$$

On montre que les méthodes MEM sont équivalentes aux méthodes par prédiction linéaire [1]. Cela nous conduit aux méthodes paramétriques dites autorégressives.

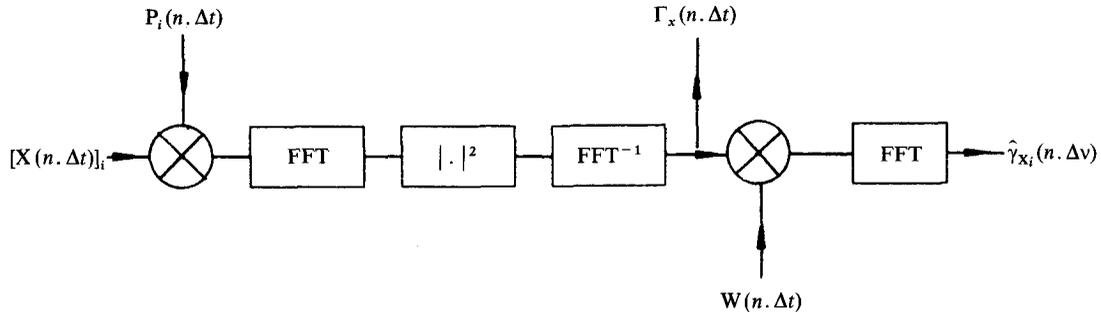


Fig. 2.

P_i : fenêtre de pondération temporelle (Tuckey); i : tranche n° i ; Γ_X : autocorrélation de X ; W : fenêtre de Hamming à la puissance 4.

Les statistiques d'estimation spectrale sont fixées par les fenêtres de pondération W et P . On définit sa « puissance de moyennage » comme le produit du temps d'intégration T_i par la bande équivalente du bruit blanc B_e . Dans l'hypothèse de processus gaussiens, la variance de l'estimation vaut :

$$\text{Var}(\hat{\gamma}_X(v)) = \gamma_X^2(v) / B_e \cdot T_i$$

Dans notre cas, le calcul conduit à : $B_e \cdot T_i \# 5$.

3.2. MÉTHODES AUTORÉGRESSIVES

3.2.1. Justification de l'emploi du modèle

Le théorème de Wold indique que tout processus aléatoire et stationnaire X_n peut s'écrire sous forme discrète :

$$x_n = r_n + s_n \quad (n \text{ appartient à } \mathbb{Z})$$

où r_n et s_n sont des processus stationnaires et décorrés :

– r_n est totalement prédictible soit :

$$r_n = \sum_{i=1}^p a_i \cdot r_{n-i}$$

3.1. MÉTHODES DE FOURIER

Périodogramme moyenné et corrélogramme sont deux techniques courantes. La première fait la moyenne des FFT complexes du processus découpé en n tranches. La seconde utilise le théorème de Wiener-Khintchine : autocorrélation et DSP forment une paire de transformée de Fourier.

Pour une séquence courte (64 points), nous avons préféré employer le corrélogramme pour des raisons de temps de calcul qui sont inférieurs à ceux du périodogramme.

Pour diminuer les effets d'extrémités des séquences, on les force à zéro par une fenêtre de pondération temporelle. Une fenêtre de Tuckey (convolution entre une fenêtre de Hamming de 16 points et une fenêtre rectangulaire de N points) est préférée aux autres par la perte d'informations minimale qu'elle implique aux extrémités.

L'estimateur du spectre DSP d'une séquence X_n est obtenu comme suit :

s_n est aléatoire et non totalement prédictible soit :

$$s_n = \sum_{i=1}^q b_i \cdot e_{n-i}$$

où e_n est blanc et normalisé.

D'après cette décomposition, tout processus aléatoire sera décrit par le modèle à base des coefficients a_i et b_i : ce qui permet de concevoir un modèle ARMA (Autoregressive Moving Average). Dérivé du modèle ARMA, le modèle AR seul amène à une solution d'équations linéaires. C'est le plus simple et le plus utilisé.

3.2.2. Modèle AR

Le signal échantillonné X_n est modélisé par la sortie d'un filtre autorégressif de longueur p excité par un bruit blanc.

$$X(n) = \sum_{i=1}^p a(i) \cdot X(n-i) + b(n)$$

- $b(n)$ est un bruit blanc centré de puissance σ_b^2 ;
- $a(i)$ sont les coefficients du filtre.

APPLICATIONS

Les p coefficients $a(i)$ et la puissance du bruit résiduel (innovation) σ_b^2 permettent d'estimer la DSP de X_n par la formule (cf. fig. 3).

$$\gamma_X(l, \Delta\nu) = \frac{\sigma_b^2 \cdot T_e}{\left| 1 - \sum_{k=1}^p a(k) \cdot \exp(-2j\pi \cdot l \cdot \Delta\nu \cdot k \cdot T_e) \right|^2}$$

- $\Delta\nu$ est la résolution fréquentielle;
- T_e est le pas d'échantillonnage.

L'amplitude des pics fréquentiels indique des valeurs inexactes. Ils doivent être calibrés. On montre [4] que pour les fréquences pures bruitées, cette amplitude est proportionnelle au carré du rapport signal sur bruit et au carré de l'ordre du modèle.

Le choix de l'ordre p du modèle est guidé par le critère « Final Predictive Error » qui est minimal pour l'ordre optimal.

$$FPE(p) = \frac{N+p}{N-p} \cdot E_p$$

avec

$$E_p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X(n) - \hat{X}(n))^2$$

On montre, en pratique (§ 3.3), qu'il est nécessaire de surestimer l'ordre du modèle pour obtenir une meilleure représentation spectrale. Le modèle AR ainsi construit possède une fonction de transfert en z , $1/A(z)$ où :

$$z = \exp(2j\pi \nu T_e)$$

Les valeurs complexes qui annulent $A(z)$ sont les pôles du modèle. Les pôles sont déterminés par un programme qui utilise la méthode de Laguerre. S'ils sont situés à l'intérieur du cercle unité, ils garantissent la stabilité du modèle. Par ailleurs, des études [5] sur la propriété des pôles révèlent que si leur position voisine le cercle unité, le modèle identifie des résonances, si au contraire ils sont distribués uniformément à l'intérieur du cercle unité, le modèle identifie du bruit.

3.2.3. Techniques d'estimation des coefficients du modèle

Nous comparons l'estimée spectrale obtenue par modèle AR au corrélogramme. Deux méthodes de calcul des coefficients sont données :

- (1) méthode de corrélation proposée par Burg [2];
- (2) méthode de covariance ou des moindres carrés proposée par Marple [3].

La dernière méthode minimise l'erreur de prédiction par rapport à l'ensemble des p coefficients. Elle est dite optimale comparativement à celle de Burg qui minimise l'erreur de prédiction (bruit résiduel) par rapport au dernier coefficient.

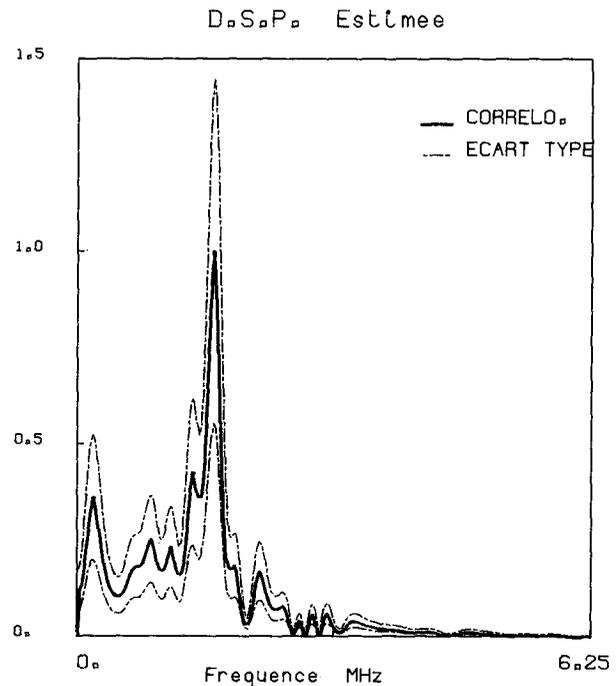


Fig. 3. - Limite de l'écart-type pour le corrélogramme de la tranche 1.

3.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX : ANALYSE DU BRUIT SEUL

Le choix de la longueur de la séquence doit être fait de telle manière que cette dernière soit stationnaire. Cette mesure n'ayant pas de solution simple, la longueur est choisie supérieure à la durée de la réponse impulsionnelle de la sonde (cf. fig. 1) soit $T = 5,12 \mu s$ (soit $N = 64$), donnant ainsi un produit $B \cdot T \# 6$. Ce produit BT indique le nombre maximal de degrés de liberté du signal et impose de ne pas dépasser cette valeur pour le $B_e \cdot T_i$ du corrélogramme de façon à ne pas interpréter plus d'information qu'il n'en existe. On donne (cf. fig. 3) l'estimation spectrale obtenue par corrélogramme sur la première tranche de longueur 64. On constate des oscillations dues à la fenêtre de pondération $P(t)$ utilisée, toutefois plus faible que dans le cas d'une fenêtre rectangulaire.

D'autre part, l'estimateur présente une variance. Dans l'hypothèse où la séquence est gaussienne, nous illustrons sur la figure 3 la limite de la somme de ces deux erreurs en utilisant la formule de la variance. Cette limite est l'écart-type ε de l'estimateur avec :

$$\varepsilon = \hat{\gamma}_X \pm \hat{\gamma}_X / \sqrt{5}$$

Sur plusieurs tranches de profondeur, la méthode du corrélogramme est comparée aux méthodes autorégressives.

Pour les différentes tranches de profondeur, l'estimation spectrale obtenue par corrélogramme est comparée à celle obtenue par modèles AR (Burg, Marple).

ANALYSE SPECTRALE EN CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR ULTRASONS

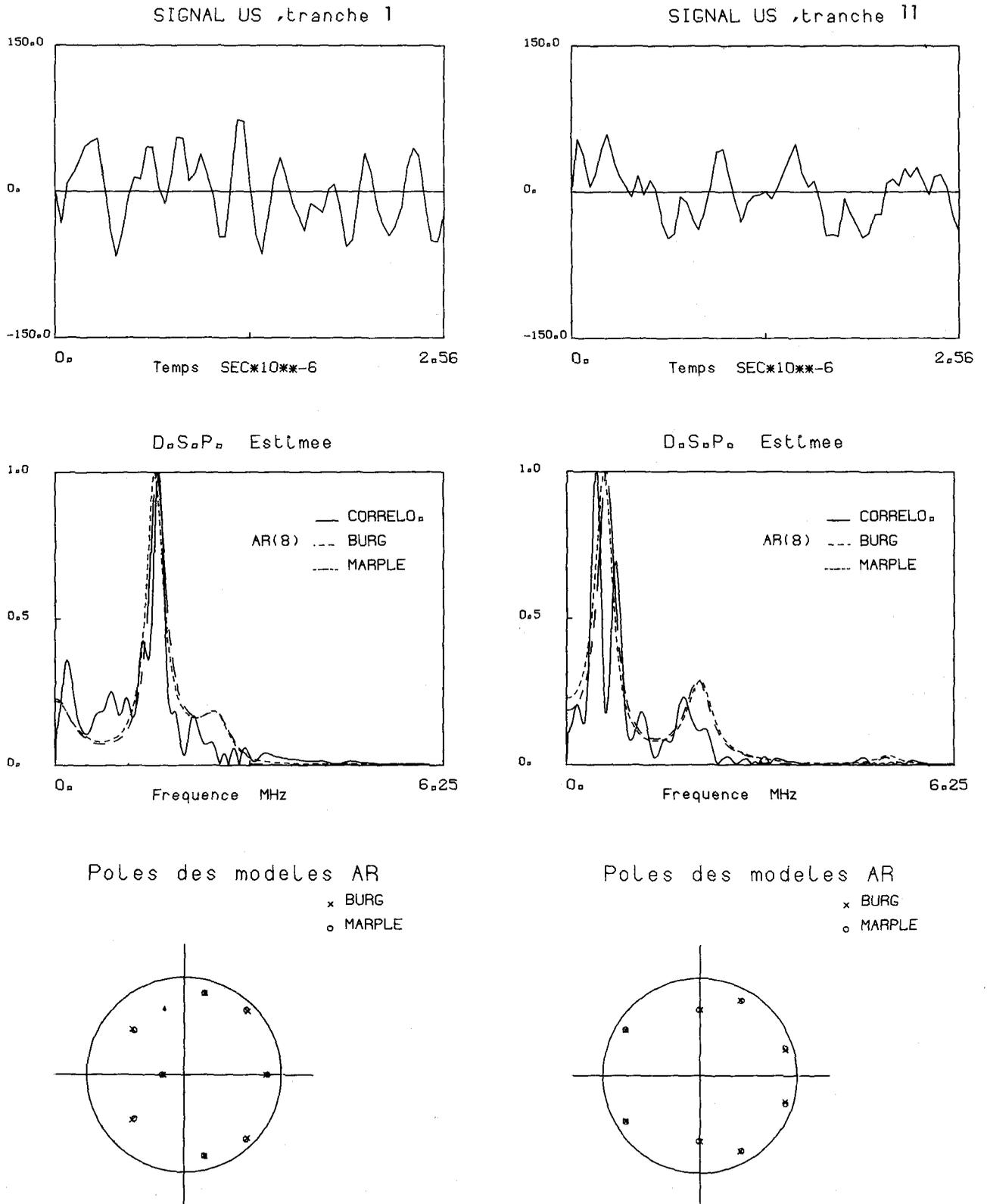


Fig. 4. - Détail de l'analyse spectrale pour deux tranches de différentes profondeurs.

APPLICATIONS

Sur la figure 4, les spectres ont été normalisés. On donne les pôles du modèle AR correspondant.

Pour appliquer les méthodes paramétriques dans de bonnes conditions, il est nécessaire de ne pas suréchantillonner le signal afin de minimiser l'ordre p des modèles. Cela a conduit à retenir des tranches de longueur en puissance deux immédiatement supérieure à la limite de Shannon soit $N=64$ points à la fréquence de 12,25 MHz.

La figure 4 présente l'analyse spectrale pour deux tranches de profondeurs différentes.

Interprétation

— L'analyse spectrale par corrélogramme fait apparaître des résonances (pics de la DSP) et des interférences (minimum sur la DSP).

— L'analyse spectrale par modèle autorégressif AR identifie en priorité les modes propres (résonances) du système. Le choix de l'ordre du modèle est déterminant sur le résultat. Le critère FPE donne un ordre optimal $p=6$ mais avec un décalage des pics fréquentiels important et une moins bonne résolution par rapport au corrélogramme. Ceci est considérablement réduit en surestimant l'ordre du modèle à $p=8$.

— On constate que les pôles de plus grands modules n'engendrent pas obligatoirement les pics fréquentiels les plus importants sur la DSP. Cela s'explique par

l'estimateur spectral qui contient à la fois les pôles et leurs inverses.

$$\gamma_x(z) = \frac{\sigma_b^2}{A(z) \cdot A^*(1/z^*)}$$

Avec : $\gamma_x(z)$, la DSP en z d'un processus AR de fonction de transfert en z , $1/A(z)$; z^* , le conjugué de z avec $z = \exp(2j\pi \nu T_e)$.

— On vérifie que parmi les quatre paires de pôles, ceux dont le module est supérieur à 0,85 correspondent aux maxima de la DSP.

— L'étude comparative des algorithmes de Burg et Marple appliqués aux signaux ultrasonores donne souvent des résultats similaires sur les coefficients et les pôles du modèle. Le caractère optimal de Marple amène cependant des biais moins importants. En revanche, la méthode de Burg possède l'avantage d'être toujours stable.

4. Étude de la stationnarité en profondeur et pour des déplacements latéraux dans le matériau

L'analyse spectrale faite pour différentes tranches échographiques montre qu'il est possible de valider un modèle AR par tranche. Afin de proposer un seul

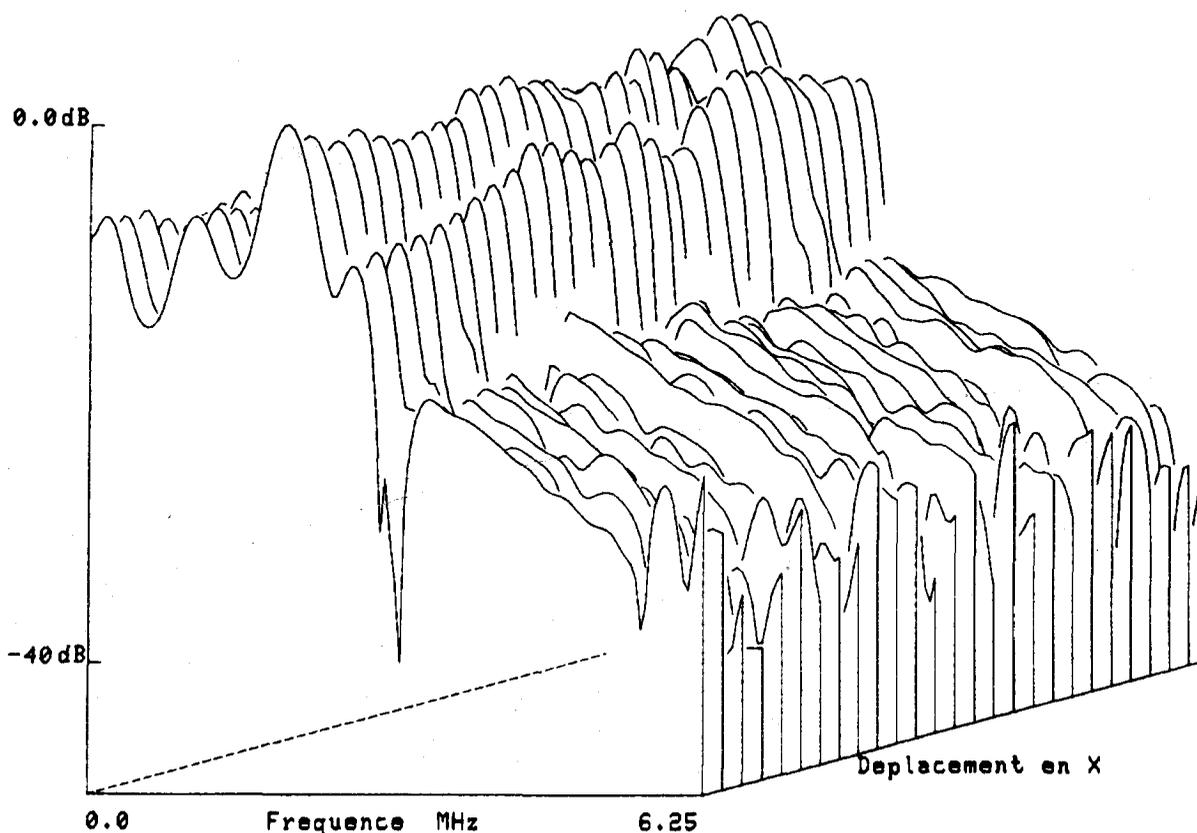


Fig. 5. — On constate une reproductibilité des motifs $\gamma_{x_i}(n, \Delta v)$.

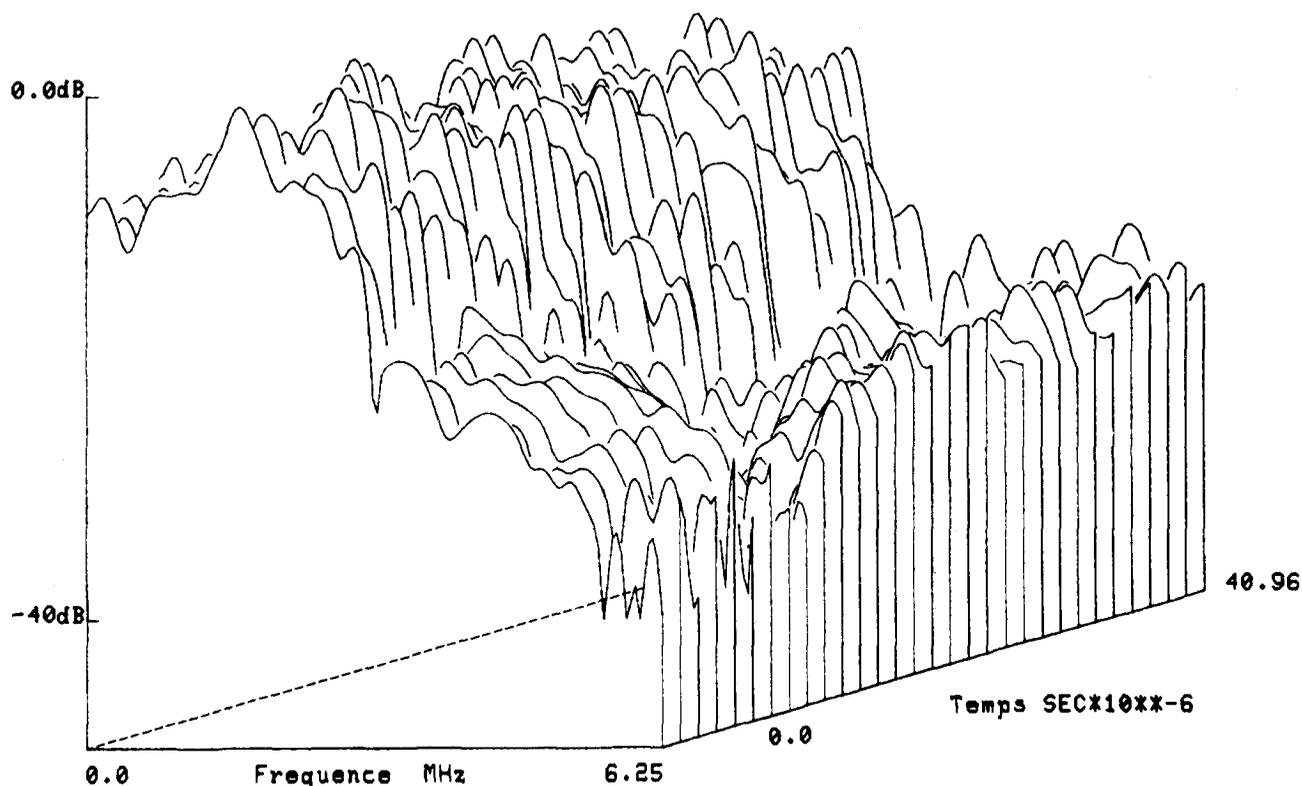


Fig. 6. — On constate que les motifs $\gamma_{x_i}(n, \Delta v)$ présentent des formes irrégulières.

modèle pour différentes tranches de même profondeur, il est nécessaire de vérifier la stationnarité latérale.

Nous cherchons donc à analyser cette stationnarité dans le domaine fréquentiel en calculant les spectres de tranches adjacentes (même profondeur).

Différentes approches ont été envisagées; en particulier une technique consistant à blanchir chaque tranche par le spectre moyen du bruit. Les résultats montrent cependant qu'une représentation conjointe fréquence-temps et fréquence-déplacement est plus explicite. Par ailleurs, l'estimation faite par corrélogramme ne pose pas de problème de calibration, ce qui a conduit à utiliser cette technique plutôt que les modèles AR pour examiner la stationnarité.

La figure 5 présente l'évolution du spectre obtenu par corrélogramme lorsque la sonde se déplace parallèlement à la surface du bloc. La longueur des séquences est de 64 points à 12,25 MHz et correspond ainsi à une profondeur de 15 mm dans le matériau.

Ceci s'observe pour une zone de profondeur comprise entre 0 mm et 30 mm, où la taille moyenne des grains de structure \bar{D} est inférieure au millimètre. Au-delà de cette zone, la reproductibilité disparaît, la taille des grains étant supérieure au millimètre.

On présente (fig. 6) l'évolution du spectre en fonction de la profondeur pour 32 tranches de 64 points du

signal échographique bruit seul. Le taux de recouvrement de chaque tranche est de 75%.

La partie due à la variance de l'estimation est illustrée par la figure 3. Ce qui permet d'en déduire une non-stationnarité des signaux en fonction de la profondeur dans le matériau. La stationnarité latérale n'est donc assurée que dans les zones proches de la surface où $\bar{D} < 1$ mm. Cette zone où $\bar{D} < \lambda$ (λ longueur d'onde) est la zone de Rayleigh.

Théoriquement, cette stationnarité devrait s'étendre au cas $\bar{D} > 1$ mm en augmentant λ , ceci est expérimentalement impossible en raison des limites fréquentielles de la sonde.

5. Conclusion

L'analyse spectrale appliquée au domaine du Contrôle Non Destructif par ultrasons est un outil précieux pour l'aide à l'interprétation des échographies. En étudiant l'évolution du spectre par petites tranches supposées stationnaires, nous montrons comment il est possible de caractériser le bruit de réverbération dû à la structure et perturbant le sondage.

On confirme ainsi la non-stationnarité du signal en profondeur dans le matériau. Par contre, la stationnarité est assurée pour des zones de même profondeur où la taille des grains est inférieure à λ .

APPLICATIONS

L'étude comparative des méthodes d'analyse spectrale sur les signaux ultrasons permet de dégager les points suivants :

– On a montré les limites d'une méthode de Fourier (corrélogramme) sur des séquences courtes (64 points) qui se traduit par une variance élevée.

– Les résultats de l'analyse spectrale autorégressive montrent qu'elle est applicable au Contrôle Non Destructif par ultrasons.

Pour des tranches de durée au moins supérieure à la Réponse Impulsionnelle de la sonde, les méthodes paramétriques AR détectent de manière fidèle les résonances. Un problème de calibration subsiste néanmoins, ce qui a fait retenir le corrélogramme pour l'analyse de l'évolution des DSP.

Ceci permet avec les résultats de stationnarité latérale d'envisager un seul modèle prédicteur-soustracteur pour des tranches de même profondeur. On espère

ainsi en blanchissant le bruit de structure, améliorer le rapport signal sur bruit.

Manuscrit reçu le 3 décembre 1985.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. PAPOULIS, Maximum Entropy and Spectral Estimation A Review, *IEEE, ASSP*, 29, n° 6, December 1981.
- [2] J. P. BURG, *A new analysis technique for time series data*, NATO, Enschede, août 1968.
- [3] S. L. MARPLE, A new autoregressive spectrum analysis algorithm, *IEEE, ASSP-28*, août 1980.
- [4] J. L. LACOUME, C. HABBA et J. L. NICOLAS, Étalonnage de l'analyse spectrale par la méthode du modèle autorégressif, *Ann. Télécom*, 36, n° 11-12, 1981, p. 579-584.
- [5] J. L. LACOUME, M. GHARBI, C. LATOMBE et J. L. NICOLAS, Close Frequency Resolution by Maximum Entropy Spectral Estimators, *IEEE, ASSP*, n° 5, October 1984.