

DECONVOLUTION DE DONNEES DU TYPE SISMIQUE
ETUDE COMPARATIVE DE CERTAINES METHODES

A. GUERCHAOUY - J. C. BALLUET - J. L. LACOUME

CEPHAG, INPG/IEG, UA 346, BP 46 - 38402 ST-MARTIN-D'HERES Cédex (FRANCE)

En sismique réflexion, une onde appelée ondelette sismique est émise dans le sol afin de détecter les réflexions se produisant sur les interfaces des couches géologiques. Les enregistrements ou traces sismiques sont formés d'une superposition de ces réflexions dans un environnement bruité et peuvent être considérés comme le résultat d'un filtrage linéaire du signal source par la réponse impulsionnelle du sol ou fonction de réflectivité. La déconvolution consiste, par une estimation de l'ondelette, à éliminer son effet sur la trace afin de restituer la fonction de réflectivité. La solution n'est pas unique et dépend des hypothèses faites a priori. Nous présentons une étude comparative de divers types de méthodes : méthodes AR, une méthode à entropie minimale ainsi qu'une méthode déterministe : la déconvolution homomorphique, à l'aide d'applications.

In seismic reflection a signal source named seismic wavelet is emitted into the earth to detect reflections on the interfaces of the geologic layers. The records or seismic traces are constituted by these overlapping reflections altered by noise and can be viewed as the filtering response to the signal source through the earth. Deconvolution try to remove this filtering effect by estimating the seismic wavelet to restore the earth impulse response or reflectivity function. Solution depends on assumptions made about wavelet or reflectivity function. We present a comparative study of several methods. AR methods, a minimum entropy deconvolution and a deterministic one : homomorphic deconvolution, with simulations.

1 - MODELISATION

La modélisation du sol consiste en un empilement de couches parallèles, caractérisées chacune par une impédance acoustique $\rho_i V_i$ (ρ_i : densité, V_i = vitesse) et délimitées par des interfaces de coefficient de réflexion r_i . L'onde utile, en se propageant dans le sol, va se réfléchir pour être captée en surface. La trace peut être considérée comme une superposition de ces réflexions caractérisées par un retard t_i et une amplitude r_i (ou $\rho_i V_i$) ; elle s'écrit :

$$x(k) = w(k) * r(k) + n(k) \quad (1-1)$$

où $w(k)$, $r(k)$ et $n(k)$ désignent l'ondelette, la réflectivité et le bruit.

2 - LES METHODES DE DECONVOLUTION CONSIDEREES

Soit une trace idéale de la forme :

$$y(k) = w(k) * r(k) \quad (2-1)$$

Notre objectif est d'obtenir $r(k)$ à partir de $y(k)$. $w(f)$ n'étant pas connu, les méthodes employées présupposent certaines hypothèses pas forcément vérifiées par le signal traité.

2-1 Les méthodes AR

Elles supposent une ondelette AR du type :

$$w(k) = -\sum_{j=1}^M a(j) w(k-j) + \delta(k) \quad (2-2)$$

où les $a(j)$ sont les coefficients du filtre AR d'ordre M. Une telle ondelette est à phase minimale et donne une trace :

$$y(k) = -\sum_{j=1}^M a(j) y(k-j) + r(k) \quad (2-3)$$

Et l'erreur de prédiction équivaut à la séquence réflectivité lorsque les $a(j)$ sont parfaitement connus.

2-1-1 Estimation par autocorrélation

Pour une ondelette AR, les $a(j)$ vérifient les équations de Yule Walker et peuvent être obtenus à

à partir des M+1 premières valeurs de l'autocorrélation $\hat{\phi}$ de l'ondelette à l'aide de l'algorithme de Levinson. Lorsque la réflectivité est blanche, on aboutit au même filtre en utilisant l'autocorrélation R de la trace à la place de celle de l'ondelette. Si R est parfaitement estimée, les $a(j)$ obtenus rendent minimale l'espérance de l'erreur quadratique de prédiction. L'estimation de l'autocorrélation peut aussi se faire par le cepstre ; l'hypothèse de réflectivité blanche n'est plus nécessaire et l'estimation repose sur le principe de séparation entre l'ondelette et la réflectivité (fig. 1).

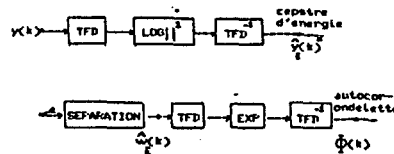


FIG 1: CEPSTRE ESTIMATION-AUTOCORRELATION DE W

2-1-2 Méthode de covariance

Si la réflectivité est blanche, les $a(j)$ obtenus rendent minimale l'erreur quadratique moyenne de prédiction sur la trace et sont solution d'équations de Yule Walker ou R est une matrice de covariance estimée qui peut ne pas être de Toeplitz. Dans le cas stationnaire, Marple [4] a obtenu un algorithme récursif en minimisant la moyenne des erreurs de prédictions progressive et rétrograde.

2-1-3 Méthode de Kalman [5]

On peut modéliser le processus AR, dans le cas stationnaire par l'équation d'état statique :

$$x(k) = x(k-1) \quad (2-4)$$

L'équation d'observation s'écrit alors :

$$y(k) = H^T(k) \cdot x(k) + r(k) \quad (2-5)$$

avec $x(k) = [a(k,1) \dots a(k,M)]^T$: vecteur filtre à l'instant k, et $H^T(k) = [y(k-1) \dots y(k-M)]$.



Le calcul du filtre est récursif et se fait en minimisant à l'instant k , compte-tenu des observations passées, l'espérance de l'erreur quadratique de prédiction. Un certain type d'ondelette non stationnaire peut être traité en rajoutant à l'équation d'état un bruit $v(k)$ blanc et centré :

$$x(k) = x(k-1) + v(k) \quad (2-6)$$

2-1-4 La méthode multi-impulsionnelle [3]

Elle traite le cas d'une réflectivité non blanche associée à une ondelette AR et de forme :

$$r(k) = \sum_{i=1}^{N1} r_i \cdot \delta(k-k_i) \quad k_i = i \Delta T \quad (2-7)$$

L'ondelette est estimée par une des méthodes précédentes et le résidu de prédiction $e(k)$ servira à l'identification du modèle de réflectivité. Le procédé est séquentiel. Un premier pic r_i est déterminé en position et en amplitude en minimisant l'écart quadratique moyen entre une trace référence $d(k)$ et une trace modèle $u(k)$. La trace $d(k)$ est obtenue en prenant comme réflectivité $e(k)$ et comme ondelette $h(k)$, celle estimée, pondérée par une porte exponentielle de facteur $\delta \ll 1$; ce facteur dit perceptuel [3] agit comme une pondération de l'erreur due au bruit blanc ou à large bande, en éloignant les pôles de l'ondelette de l'origine. La trace $u(k)$ est égale à la convolution du pic considéré par l'ondelette $h(k)$. Cela revient en fait à déterminer le pic principal dans la réflectivité, qui correspond à la position du maximum de l'intercorrélacion $C_{dh}(k)$. La contribution du pic est ensuite enlevée de la trace $d(k)$ ou de l'intercorrélacion $C_{dh}(k)$ et l'estimation peut être reprise de façon itérative jusqu'à l'obtention des $N1$ impulsions. Après cela, on procède à une réoptimisation globale des amplitudes.

2-2 Autres méthodes

2-2-1 Une méthode à entropie minimale [2]

La modélisation porte essentiellement sur la réflectivité qui est supposée à "structure simple", c'est-à-dire constituée de quelques impulsions non nulles. On cherche alors à déterminer un filtre linéaire qui, au lieu de blanchir la trace, va en donner une structure simple et cohérente avec la version initiale. Ce filtre est calculé en maximisant une norme dite de "simple structure". Nous choisirons comme norme [2] :

$$\|r\| = \sup_{F \in \mathbb{R}^M} \left\{ \max_{0 \leq i \leq N-1} |\bar{r}(i)| / \|r\|_E \right\} \quad (2-8)$$

où F est un filtre d'ordre M , \bar{r} la réflectivité estimée $\|r\|_E$ sa norme euclidienne. Le filtre est calculé en deux étapes. On détermine pour chaque i le filtre F qui maximise en sortie l'expression $|\bar{r}(i)| / \|r\|_E$ et qui s'obtient par résolution d'équations normales. Puis on choisit celui qui correspond à l'indice i pour lequel $|\bar{r}(i)| / \|r\|_E$ est le maximum maximorum.

2-2-2 La déconvolution homomorphique

La méthode considère le processus comme déterministe et repose essentiellement sur le principe de séparation entre les cepstres de l'ondelette et de la réflectivité. On définit les cepstres complexe et d'énergie de $y(k)$ par :

$$y(k) = \mathcal{F}^{-1} [\text{LOG}_C (h(k))] \quad (2-9)$$

$$Y_E(k) = \mathcal{F}^{-1} [\text{LOG} (|y(k)|)] \quad (2-10)$$

\mathcal{F} : transformée de Fourier, LOG_C : log complexe.

Le cepstre transforme le produit de convolution $w(k)*r(k)$ en la somme $\hat{w}(k) + \hat{r}(k)$. $\hat{w}(k)$ constituant la partie centrée sur l'origine (BQ = basse qu'éfrence) et $\hat{r}(k)$ la partie HQ ont, en général, tendance à la séparation. Si celle-ci est suffisante, une simple coupure permet d'isoler $\hat{w}(k)$ de $\hat{r}(k)$ et d'obtenir $w(k)$ et $r(k)$. Un des problèmes majeurs du cepstre complexe est le calcul de la phase continue ; nous avons utilisé un algorithme [1] qui donne $\hat{y}(k)$ à partir de $k \cdot \hat{y}(k)$ sans calcul directe de la phase.

Si l'ondelette est à phase minimale, son cepstre complexe est causal et s'exprime en fonction du cepstre d'énergie. La séparation est améliorée en appliquant à la trace une pondération exponentielle décroissante qui peut rendre la réflectivité à phase minimale et réduit le risque de repliement de son cepstre sur celui de l'ondelette.

3 - ETUDE DE DONNEES SYNTHETIQUES ET COMPARAISON DES RESULTATS

3-1 Données simulées (fig. 2)

Le modèle de réflectivité considéré est dit Bernouilli-Gaussien et s'exprime par le produit :

$$r(k) = A(k) \cdot q(k) \quad (3-1)$$

où $A(k)$ est un bruit blanc gaussien caractérisant l'amplitude et $q(k)$ une séquence de Bernouilli de probabilité λ (probabilité d'occurrence d'une réflexion à l'instant k). Deux réflectivités : une peu dense (1 : $\lambda = 0,025$) et une dense (2 : $\lambda = 0,125$) ont été utilisées. Quant à l'ondelette, l'étude a porté sur un éventail assez large : AR, ARMA, à phase nulle, signature marine Vapor-choc (C.G.G.).

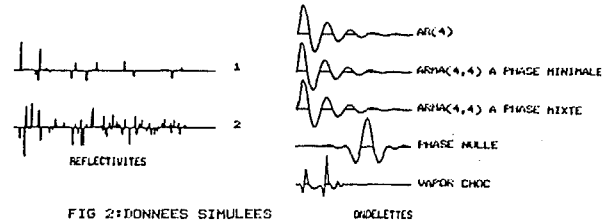


FIG 2: DONNEES SIMULEES

3-2 Résultats de l'étude sans bruit

3-2-1 Critères de choix des paramètres

La puissance d'erreur sert au choix de l'ordre du filtre AR. Le filtre de Kalman est initialisé avec $X(0)=0$ et $P(0) = \alpha I$, $\alpha > 0$ arbitrairement grand. L'ordre pour la méthode à entropie minimale est, en général, égal à celui du filtre AR. Les paramètres de la méthode multi-impulsionnelle ainsi que ceux de la déconvolution homomorphique sont choisis au vu d'un assez grand nombre de tests.

3-2-2 Procédure de comparaison de résultats

L'objectif final étant l'estimation de la réflectivité, notre souci s'est porté sur l'évaluation de l'un ou l'autre des critères :

$$\sum_k (\bar{r}(k) - r(k))^2 / \|r\|_E \quad (3-2)$$

$$\mathcal{F}^{-1} (\bar{r}(f) / r(f)) \quad (3-3)$$

où $r(f)$ et $\bar{r}(f)$ désignent les spectres des réflectivités vraie et estimée.

3-2-3 Résultats et commentaires

3-2-3-1 Ondelette AR :

Le résultat est excellent pour la réflectivité 1. En effet, pour les méthodes de prédiction, l'autocorrélacion de la trace approche bien celle de l'ondelette. Le cepstre après pondération, permet une séparation facile. La méthode multi-impulsionnelle associe parfois, à cause du procédé de "détection" des réflexions, à un pic large dans l'intercorrélacion plusieurs autres impulsions, ou au contraire ne sépare pas les réflexions trop rapprochées (fig. 3a). Pour une réflectivité plus dense (fig. 3b), les méthodes de prédiction confirment le résultat précédent. Les autres méthodes sont moins performantes ; néanmoins, on arrive à une estimation de l'ondelette encore valable par le cepstre d'énergie.

3-2-3-2 Ondelette ARMA à phase minimale : le résultat est satisfaisant car une ondelette de ce type peut être approchée par une ondelette AR.



3-2-3-3 Ondelette ARMA à phase mixte : les méthodes de prédiction n'inversent pas de manière satisfaisante une ondelette de ce type ; chaque réflexion est alors remplacée par une suite d'impulsions correspondant approximativement à la convolution de cette réflexion par la partie MA de l'ondelette (fig. 4). D'où une application hasardeuse de la méthode multi-impulsionnelle. La méthode à entropie minimale démontre son aptitude à traiter cette ondelette associée à une réflectivité peu dense. Et le cepstre, bien que la séparation ne soit pas aisée, arrive à restituer correctement la réflectivité par filtrage H.Q.

3-2-3-4 Ondelette à phase nulle : les méthodes de prédiction approchent assez bien cette ondelette (fig.5). La méthode multi-impulsionnelle donne un résultat décevant dû au résidu d'erreur dans la prédiction. La méthode à entropie minimale est légèrement supérieure et le cepstre restitue bien la réflectivité par filtrage H.Q.

3-2-3-5 Signature Vapor Choc : l'ondelette ayant une structure d'écho et une phase mixte, la déconvolution est médiocre sauf pour la méthode à entropie minimale et à un degré moindre pour le filtre de Kalman qui semble mieux estimer l'ondelette que les méthodes de corrélation-covariance, dans ce cas (fig. 6).

3-2-3-6 Ondelette AR non stationnaire : la méthode multi-impulsionnelle échoue et les autres méthodes (filtre de Kalman non compris) donnent des pics élargis (fig. 7). En effet l'ondelette estimée correspond à celle du début de la trace et les pics obtenus résultent de la convolution de chaque réflexion par la réponse impulsionnelle du filtre d'évolution de l'ondelette. La trajectoire des paramètres du filtre de Kalman évolutif ($V(k) \neq 0$) permet de suivre l'évolution du filtre et peut indiquer la présence des réflexions les plus fortes, qui semble accélérer la convergence du processus (fig. 8).

3-3 Résultats de l'étude avec bruit

L'étude est en cours et nous ne présenterons que l'influence du bruit sur la trace à ondelette AR stationnaire. Deux types de bruits seront considérés : un bruit blanc centré, puis un bruit obtenu après passage du bruit précédent à travers un filtre passe bas de Butterworth à fréquence de coupure donnée. Chaque essai sera caractérisé par un rapport signal/bruit ρ .

3-3-1 Bruit blanc : pour $\rho = 30$ dB, la méthode à entropie minimale semble mieux identifier les réflexions à cause d'un bruit de déconvolution plus faible, mais avec cependant une résolution légèrement inférieure ; en effet, la méthode favorise les pics de forte amplitude et donc les réflexions. La méthode multi-impulsionnelle estime mieux les réflexions isolées grâce au facteur γ qui compense favorablement l'effet du bruit additif. Le cepstre apparaît comme le plus sensible, cependant l'ondelette estimée est encore valable et la qualité du résultat s'explique surtout par le terme résiduel $(\bar{w}(k))^{-1} * r(k)$ (fig. 9). A $\rho = 20$ dB, le modèle AR considéré n'est plus valable pour les méthodes de prédiction ; il faut adopter à la place un modèle AR ou l'entrée est égale à la somme réflectivité + bruit filtré ou bien un modèle ARMA. La méthode à entropie minimale donne toujours un bruit de fond plus faible et la méthode multi-impulsionnelle estime encore les réflexions isolées.

3-3-2 Bruit coloré

3-3-2-1 Bruit filtré à 100 Hz : pour $\rho = 30$ dB, le résultat est égal à celui obtenu pour $\rho = 40$ dB dans le cas de bruit blanc. Pour $\rho = 25$ dB on constate de meilleures performances pour les méthodes à entropie minimale et multi-impulsionnelle pour les mêmes raisons que précédemment.

3-3-2-2 Bruit filtré à 50 Hz : pour $\rho = 30$ dB, le résultat est meilleur, à puissance du bruit égale que dans les autres cas de bruit. Pour $\rho = 15$ dB, les réflexions peuvent encore être identifiées et la résolution paraît meilleure sauf pour le cepstre.

3-3-3 Remarques

Il semble, du moins pour les méthodes AR, qu'à puissance égale, le bruit blanc est plus nocif qu'un bruit coloré. Une raison est que ce dernier modifie aussi les points voisins de l'origine dans l'autocorrélation de la trace. Plus cette modification se rapproche en forme de cette autocorrélation, plus l'effet du bruit s'identifie à un facteur d'échelle, ce qui, à la limite, ne change en rien à l'estimation du filtre.

CONCLUSION

Les méthodes de prédiction semblent être beaucoup plus sensibles à la nature de la phase de l'ondelette qu'à l'hypothèse de réflectivité blanche, d'où leur aptitude à inverser une ondelette ARMA à phase minimale. La méthode de Kalman permet en outre de suivre l'évolution du filtre et d'agir en conséquence. La méthode multi-impulsionnelle ne voit son emploi justifié qu'en cas de prédiction pas trop mauvaise ; elle précise alors la position des pics principaux mais ne permet pas parfois de séparer les réflexions trop rapprochées ou en rajoute d'autres à un pic de forte amplitude. La méthode à entropie minimale arrive à estimer une ondelette de phase quelconque en cas de réflectivité peu dense. Le cepstre est tributaire de la possibilité de séparation ; il permet, si celle-ci est possible, d'estimer une ondelette à phase mixte.

En cas de bruit, l'efficacité des méthodes semble, à puissance égale, inversement proportionnelle à la largeur de bande du bruit. La méthode multi-impulsionnelle permet de nettoyer le bruit dû à l'estimation A.R.. La méthode à entropie minimale semble robuste et le cepstre très sensible au bruit.

Nous poursuivons cette étude avec comme objectif de recenser un grand nombre de situations possibles. Ainsi, on pourra pour un signal réel, au vu des résultats obtenus, classifier cette situation et donc attribuer un degré de confiance à ces résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BEDNAR, J.B. and WATT, T.L. : Calculating the complexe cepstrum without phase unwrapping or integration. IEEE Trans. on ASSP Vol.3, n°4, 1985, p 1014-1017.
- [2] CABRELLI, C.A. : Minimum entropy deconvolution and simplicity. A non iterative algorithm. Geophysics Vol.50, n°3, 1985 p394-413.
- [3] FABRE, P. et GUEGUEN, C. : Modélisation avec entrée multi-impulsionnelle. 10e GRETSI, Mai 1985, p155-160.
- [4] MARPLE, L. : A new autoregressive spectrum analysis algorithm. IEEE Trans. on ASSP, Vol 28 n° 4, 1980, p441-454.
- [5] PRASAD, S. and MAHALANABIS, A.K. : Adaptive filter structures for deconvolution. IEEE Trans Geosci. Remote Sensing. Vol.18, n°3, 1980 p425-433.

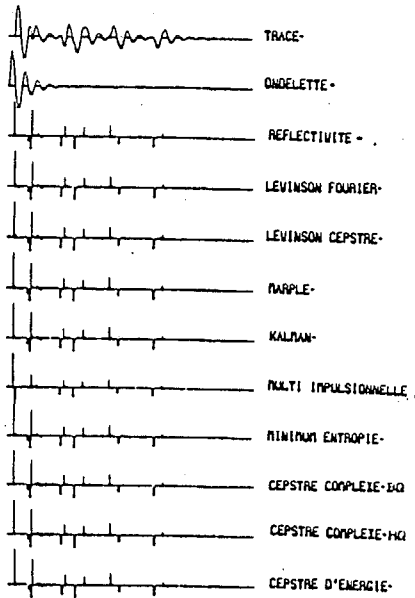


FIG 3a:TRACE AR(1) STATIONNAIRE

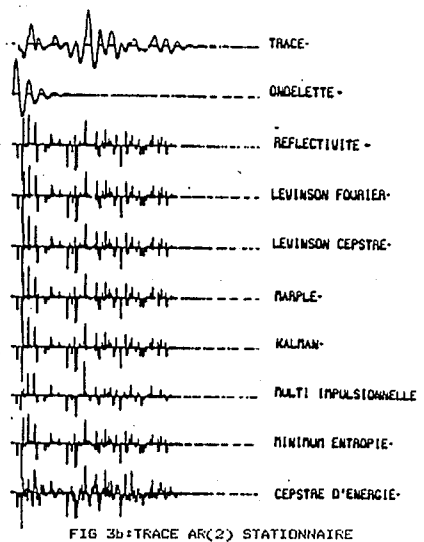


FIG 3b:TRACE AR(2) STATIONNAIRE

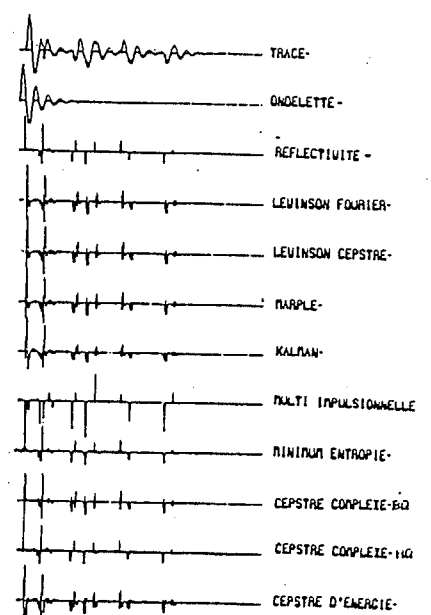


FIG 4:TRACE ARMA(1) PHASE MIXTE

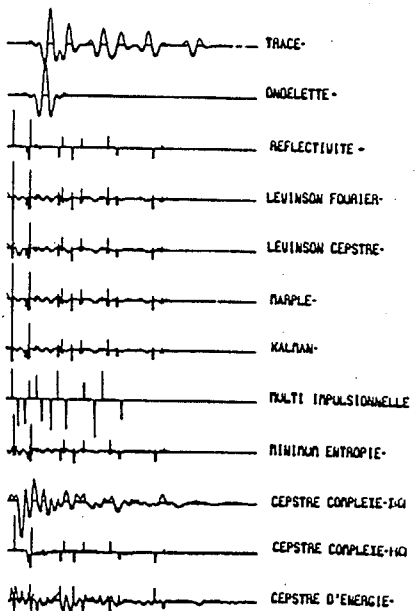


FIG 5:TRACE (1) PHASE NULLE

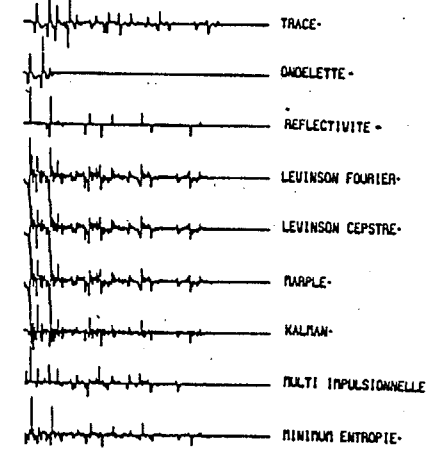


FIG 6:TRACE (1) VAPOR CHOC

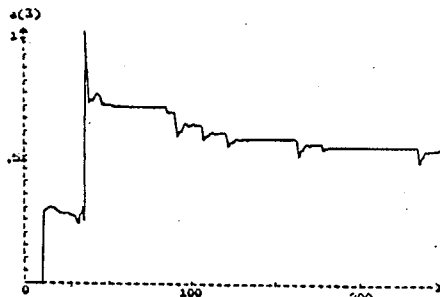


FIG 8:KALMAN: TRAJECTOIRE DE a(3)

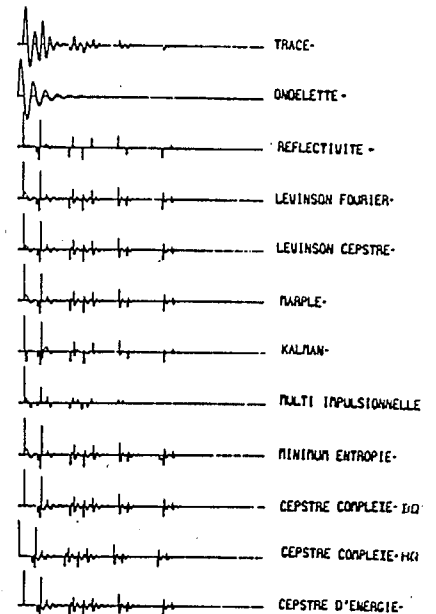


FIG 7:TRACE AR(1) NON STATIONNAIRE

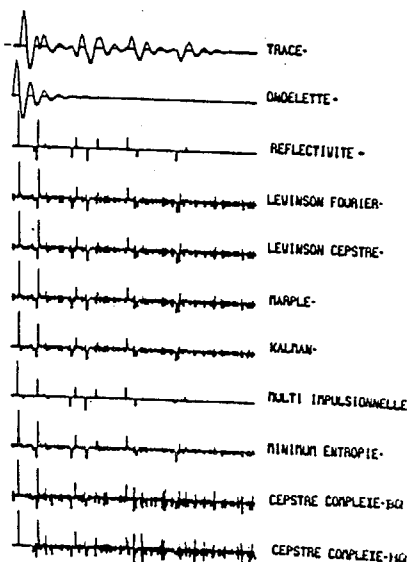


FIG 9:BRUIT BLANC S/B= 30 DB

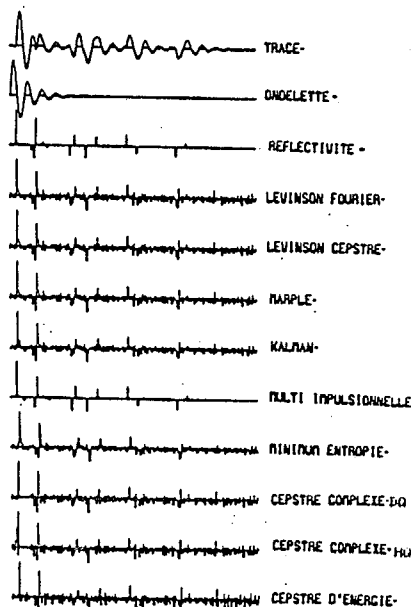


FIG 10:BRUIT FILTRE A 100 HZ. S/B= 25 DB

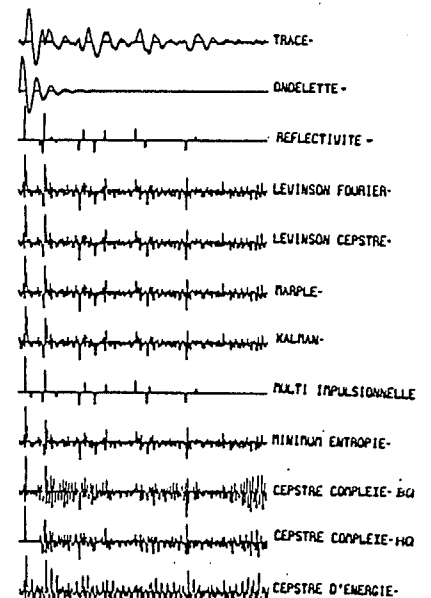


FIG 11:BRUIT FILTRE A 50 HZ. S/B= 15 DB