



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

UN PROCÉDE DE FILTRAGE AUTODIRECTIF A ENTREE MULTIPLE

par CH. HEMON

(Institut Français du Pétrole)

RESUME

Les filtres de prédiction à séries temporelles multiples permettent une nette amélioration du rapport signal/bruit. Le plus grave défaut de leur application provient du fait que le procédé classique oblige à ne considérer que l'évènement qui se produit à un même temps sur chacune des séries temporelles prises en compte comme entrée du filtre, alors que souvent un évènement corrélé d'une série à l'autre n'arrive pas au même instant sur chacune des séries. Par une modification simple de ce procédé, il est possible de tenir compte automatiquement des déphasages possibles entre les différentes séries et d'améliorer ainsi le rapport signal/bruit sans qu'il soit nécessaire que l'évènement soit en phase.

SUMMARY

Multichannel prediction filters give a large enhancement of the signal-to-noise ratio. However a serious deficiency is that the conventional procedure takes into account only the events which occur at the same time on each of the channels. Quite often there is a good correlation between events occurring at different times on the different channels. It is shown how automatically to take into account the phase shifts between the various time series and how to improve the signal-to-noise ratio even though the events are not synchronous.



UN PROCÉDE DE FILTRAGE AUTODIRECTIF A ENTREE MULTIPLE

par CH. HEMON

Dans la prospection géophysique par les méthodes sismiques, on utilise des sources d'énergie (explosion, implosion, chute de poids, etc...) pour donner naissance à des ondes acoustiques qui se propagent dans le sol suivant des lois très analogues à celles de la propagation de la lumière en optique. Les surfaces de discontinuité d'impédance acoustique donnent naissance aux phénomènes de réflexion et de réfraction classiques. Certaines particularités du sous-sol comme les lèvres de failles peuvent donner naissance à des diffractions.

Si, à la surface du sol ou de la mer, on dispose des récepteurs adaptés, on peut étudier les variations de certains paramètres en fonction du temps, par exemple : les variations de la vitesse des particules à la surface ou les variations des pressions qu'elles subissent. On peut donc enregistrer ces variations d'une manière continue. On obtient alors la représentation d'une grandeur (amplitude de la vitesse ou de la pression) en fonction du temps et l'enregistrement ainsi obtenu peut être considéré comme une série temporelle. On obtient une visualisation des séries sous différentes formes : galvanométrique, en aire variable, en densité variable. L'enregistrement numérique a, depuis quelques années, la faveur des géophysiciens car c'est celui qui permet la plus grande souplesse de traitement. On voit ainsi que les théories des séries temporelles pourront s'appliquer à ces enregistrements.

Avec une géométrie convenable de la disposition des récepteurs en surface, il est possible de suivre un événement d'un enregistrement à l'autre. Les surfaces de discontinuité d'impédance acoustique sont en effet souvent très régulières et ne présentent que par endroit des cassures brutales, voire même des disparitions complètes. Si un événement se présente sur un enregistrement à l'instant t_0 , on pourra suivre son évolution dans l'espace et définir ainsi une surface de discontinuité d'impédance acoustique qui correspond en général à une séparation entre deux couches géologiques de propriétés physiques différentes (densité, vitesse de propagation des ondes acoustiques dans cette couche). Une interprétation géologique et géophysique pourra être faite. L'événement ainsi suivi se corrèle d'un enregistrement à l'autre. Malheureusement, les enregistrements sont souvent perturbés par des bruits de nature fort différente : les uns sont organisés comme les ondes de surface, d'autres sont localement organisés comme les



bruits dus à l'explosion, d'autres enfin sont aléatoires. Un des buts du traitement géophysique est d'améliorer le rapport signal/bruit des enregistrements. Il s'agit en particulier de renforcer la corrélation de l'information utile d'un enregistrement à l'autre et, au contraire, d'essayer d'éliminer ce qui ne corrèle pas. La difficulté, en sismique, provient du fait qu'une information utile n'est pas un événement isolé; mais il en arrive presque constamment au cours du temps comme on le voit sur les enregistrements réels. On voit apparaître les possibilités d'application des théories des séries temporelles multiples. Après avoir rappelé certaines applications de ces théories, on verra comment on peut les adapter au problème posé et améliorer le procédé classique grâce à un procédé autodirectif.

I - PROCEDE CLASSIQUE

I.1 - Rappel de la théorie

On considère un ensemble de fonctions $y_p(t)$ de la même variable t , distinctes l'une de l'autre et telles que les matrices de covariance de leurs combinaisons prises deux à deux ne sont pas identiquement nulles. On suppose ces fonctions connues jusqu'à un temps t_0 et on veut déterminer par prédiction quelle est la valeur la plus probable au sens des moindres carrés suivant le critère de minimalisation de la somme des carrés des erreurs, de l'amplitude d'une de ces fonctions à l'instant $t_0 + \Delta t$. On sait que, la détermination des opérateurs de prédiction X_p se fait à partir du système matriciel :

$$\begin{array}{cccc|c|c} \Lambda_{ii} & \Lambda_{ij} & \Lambda_{ik} & \dots & X_i & \Lambda_{ii}(\dots t) \\ \Lambda_{ji} & \Lambda_{jj} & \Lambda_{jk} & \dots & X_j & \Lambda_{jj}(\dots t) \\ \Lambda_{ki} & \Lambda_{kj} & \Lambda_{kk} & \dots & X_k & \Lambda_{kk}(\dots t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} =$$

dans lequel les sous-matrices de la diagonale principale sont des matrices d'autocorrélation, les sous-matrices qui ont deux indices différents sont les matrices de covariance des séries temporelles y_p prises deux à deux; les sous-matrices X_p sont des matrices colonnes définissant l'opérateur à appliquer à la série y_p et les sous-matrices du second membre sont des matrices colonnes représentant les termes des autocorrélations à partir du temps $\dots t$. En définitive, le terme prédit sur une série y_p sera :

$$y_p(t_0 + \Delta t) = \sum_{i=1}^N \int_0^T X(x) y_i(t_0 - x) dx$$



N désignant le nombre de séries prises en compte et T la longueur en temps des opérateurs.

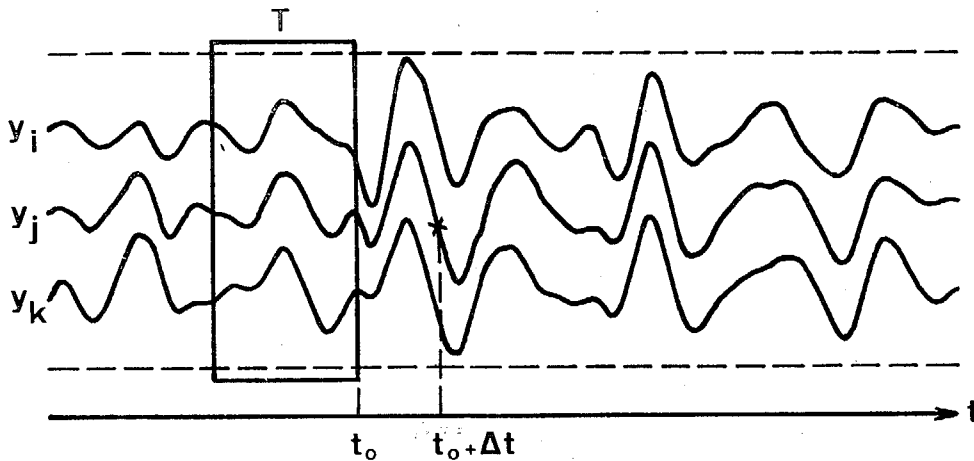
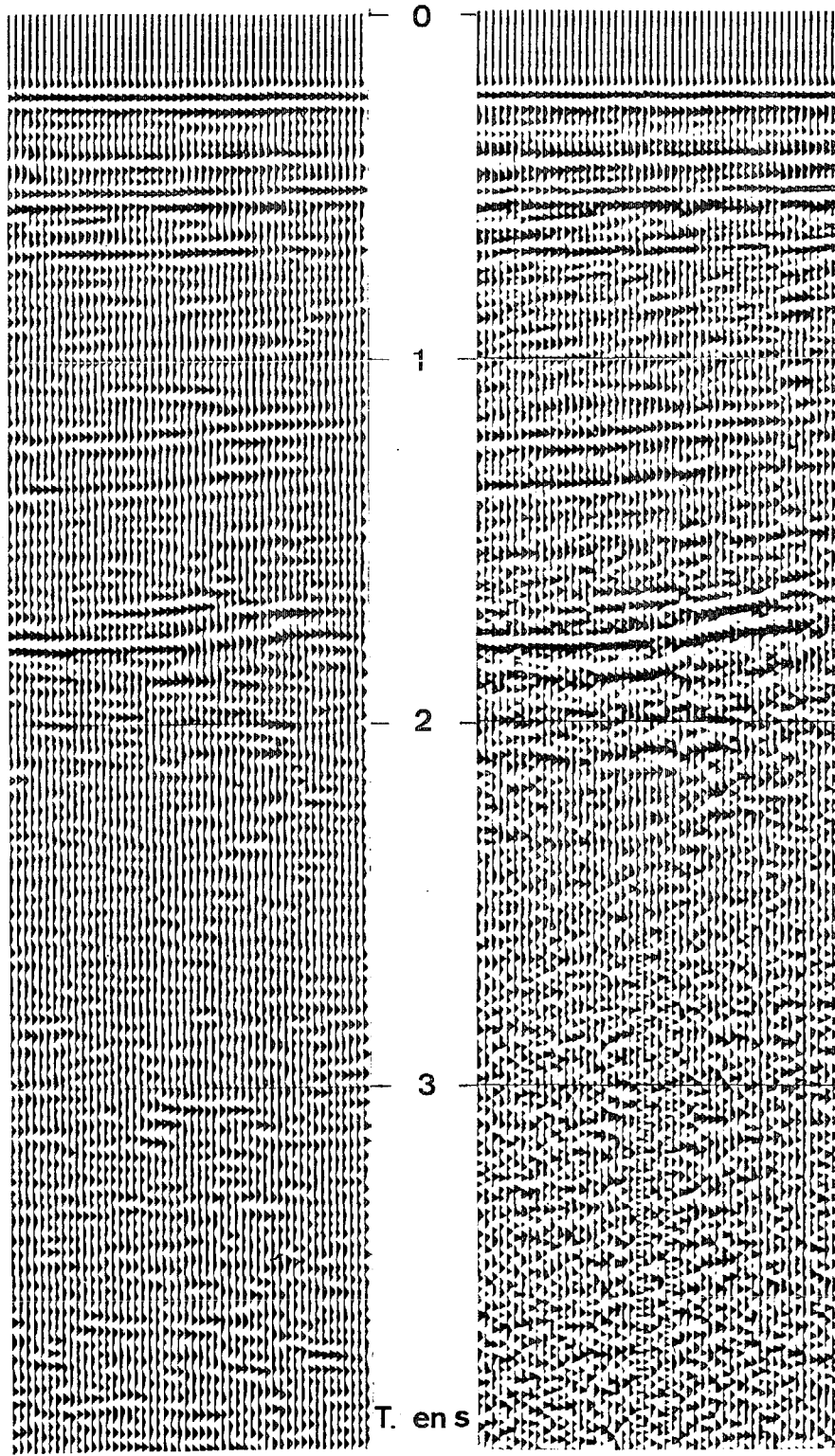


Fig. 1

La figure 1 donne une illustration schématique de la mise en oeuvre pratique du procédé. On suppose connu un secteur de m termes sur n traces (par exemple celui qui est délimité par un rectangle) et l'on détermine à partir de ce secteur connu quelle est l'amplitude probable de la série y au temps $t + \Delta t$. On fait avancer progressivement le secteur, en lui gardant la même longueur et l'on obtient ainsi une nouvelle série y' , qui résulte du filtrage de la série originale y , par le procédé indiqué. Les valeurs de cette nouvelle série ne sont jamais utilisées pour faire la prédiction des valeurs suivantes. Théoriquement, les opérateurs doivent être calculés à chaque pas. On montre cependant que l'on peut garder les mêmes opérateurs pour un intervalle de temps donné pourvu que les séries considérées soient stationnaires dans cet intervalle.

1.2 - Exemple

Un exemple (fig. 2) permet de se rendre compte de l'efficacité du procédé. Les enregistrements originaux sont représentés sur la figure 2 a et les enregistrements filtrés sont sur la figure 2 b. On voit que le rapport signal/bruit a été considérablement amélioré. Certaines corrélations ont été singulièrement renforcées, on peut même se demander quelle est la réalité des événements qui apparaissent corrélés aux temps élevés.



2 b

2 a

Fig. 2



A titre d'indication, on signalera que les séries étant considérées comme stationnaires, les opérateurs utilisés étaient indépendants du temps. Une série résultat a été obtenue à partir de cinq séries originales et la longueur en temps de la fenêtre mobile était de 20 millisecondes.

I.3 - Inconvénients du procédé

On peut déjà voir sur l'exemple précédent que certains événements qui se corrélaient bien sur les enregistrements originaux ont perdu un peu de leur énergie. C'est ce qui se passe aux environs de 1,2 seconde. Or, on remarque que ces événements ne suivent pas une ligne d'égal temps. Un exemple plus frappant obtenu avec les mêmes paramètres de traitement met ce fait en évidence (figure 3). On y constate que seuls les événements qui corrélaient d'une série à l'autre en restant parallèles aux lignes d'égal temps sont conservés, les autres ont été d'autant plus atténués que leur corrélation d'une série à l'autre s'écarte des lignes d'égal temps. Il est donc trop rigide de conserver une fenêtre rectangulaire dont les côtés sont parallèles aux lignes d'égal temps. Par contre, pour les événements qui ont été conservés, on voit qu'il y a amélioration de la corrélation. Certains décrochements décelables sur les enregistrements originaux ont disparu.

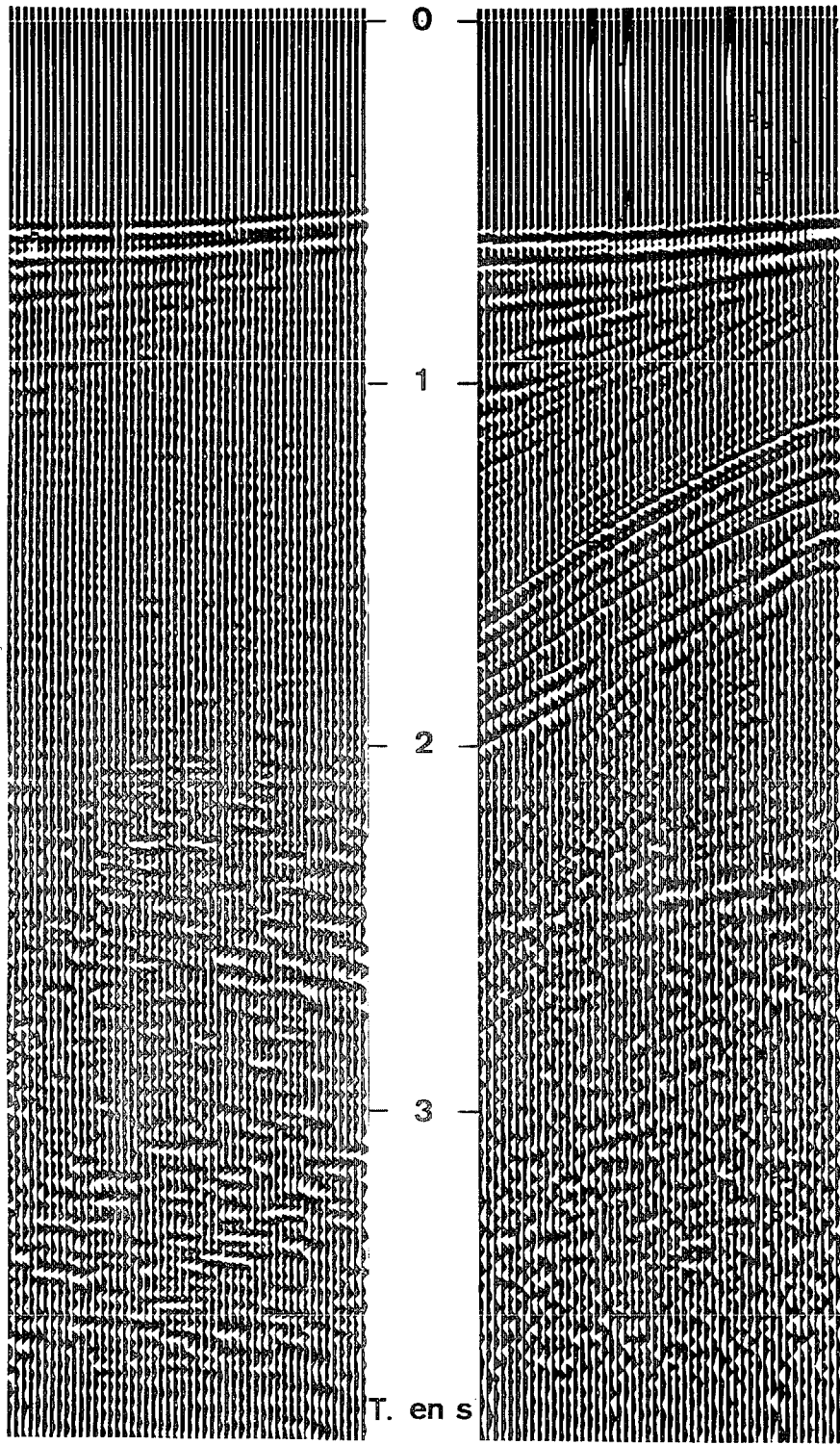
Dans la figure 3, l'opérateur a été calculé à partir du début de l'enregistrement. Si, au contraire, on détermine l'opérateur à partir des secteurs d'enregistrement compris entre 1,2 et 2,4 secondes (figure 4), on constate que les événements parallèles aux lignes d'égal temps ont disparu alors que ceux qui suivent la variation principale que l'on note entre 1,2 et 2,4 secondes ont été conservés. Dans les deux cas, on a favorisé les événements qui suivent une direction prépondérante et atténué les autres.

On se propose alors de remédier à cet inconvénient par un assouplissement de la forme de la fenêtre de manière à l'adapter à l'allure de la corrélation entre les séries prises en compte à un instant donné.

II - PROCÉDE AUTODIRECTIF

II.1 - Exposé du principe

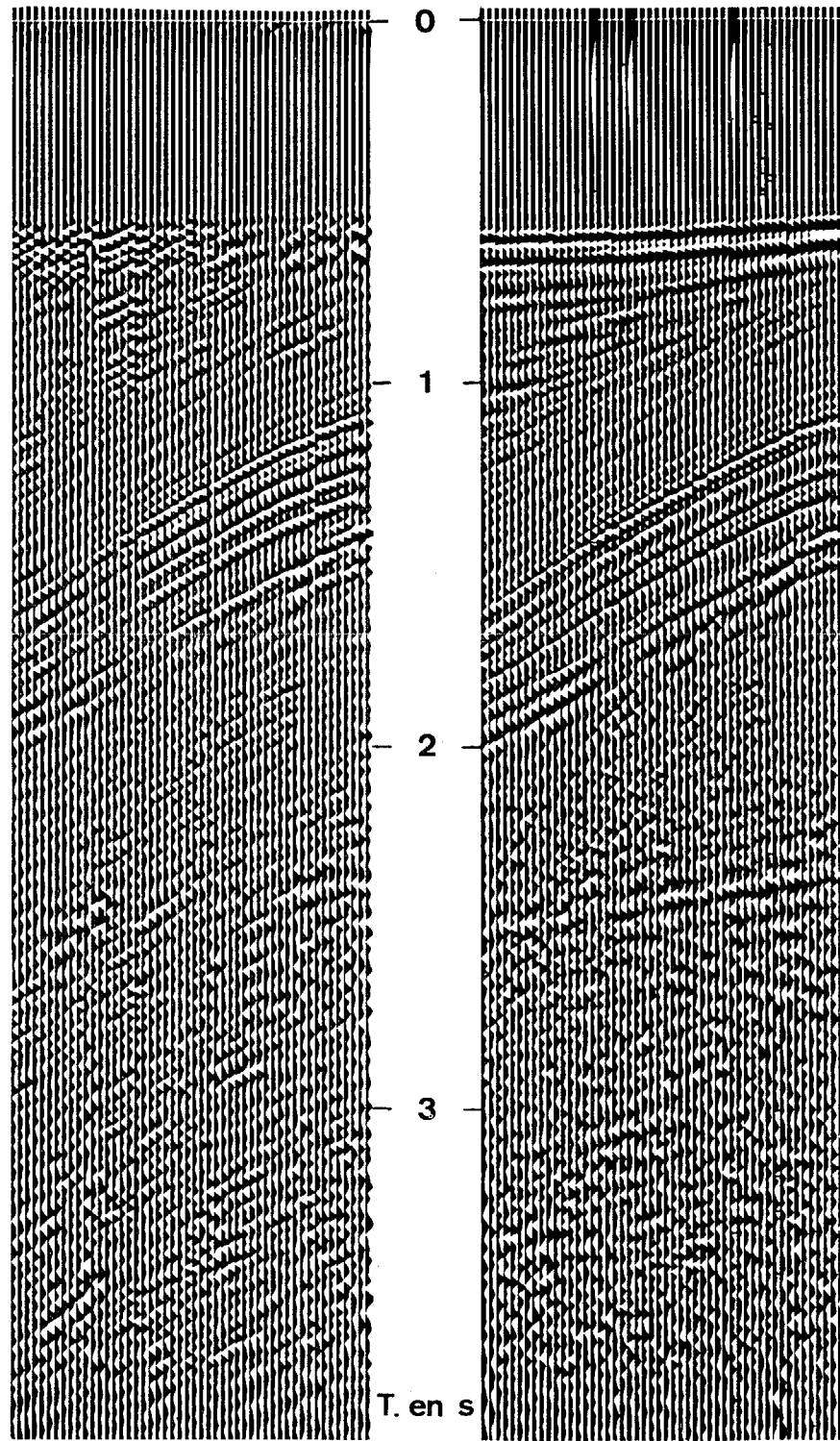
On considère que la théorie mathématique reste valable et conduit au même système d'équations, mais on suppose maintenant que les fonctions $y(t)$ sont connues sur des intervalles de temps différents d'une série à l'autre de la manière suivante. On veut, par exemple, déterminer par prédiction la valeur probable de l'amplitude de la série y_j au temps



3 b

3 a

Fig. 3



4 b

4 a

Fig. 4



$t_0 + \Delta t$, en supposant cette fonction connue jusqu'au temps t_0 . En déterminant la position du pic de la corrélation de cette série avec la série y_i , on trouve un certain décalage θ_{ji} entre ces deux séries. On supposera alors la fonction y_i connue jusqu'au temps $t_0 + \theta_{ji}$. En faisant varier i de 1 à N , N étant le nombre de séries à prendre en compte pour la prédiction de la série y_j , on calcule les valeurs θ_{ji} pour toutes combinaisons des séries deux à deux. Les corrélations étant à calculer de toute façon pour définir le système d'équation, il reste que la détermination des valeurs θ_{ji} à chaque pas, grève le temps de calcul. En reportant sur chaque série y_i le temps $t_0 + \theta_{ji}$, on fixe le bord de la fenêtre.

La largeur de la fenêtre et le nombre de séries à prendre en compte peuvent avoir les mêmes valeurs que dans le procédé classique.

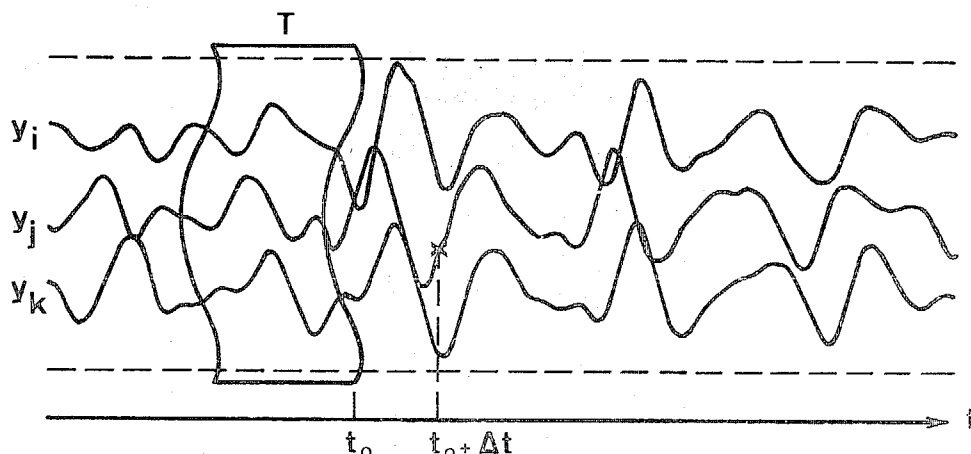


Fig. 5

La figure 5 illustre le processus de variation de la fenêtre en fonction du temps, sur deux événements distincts qui se corrélaient d'une manière différente sur les mêmes séries prises en compte. Même si les séries sont stationnaires, il est nécessaire de calculer à chaque pas les valeurs des θ_{ji} : par contre, on peut garder les mêmes opérateurs de prédiction, ce qui évite de résoudre le système d'équation à chaque pas. En fait, il est possible de se borner à calculer les θ_{ji} par secteurs. Sur les exemples présentés, on voit, en effet, que souvent l'information utile a la même allure sur des secteurs temps assez grands, il est alors inutile de calculer de nouvelles valeurs de θ_{ji} . On peut également voir que souvent ces valeurs varient progressivement ce qui permet lorsqu'on effectue les calculs à un certain pas de prendre comme valeurs initiales celles du pas précédent, on obtient alors rapidement les nouvelles valeurs sans avoir à calculer toutes les valeurs des corrélations.



Cette technique de filtrage est plus souple que celle que l'on utilise sous le nom de filtrage en vitesse apparente ou en éventail. Dans cette dernière, on se fixe une fois pour toutes des ouvertures d'angles ou des valeurs de vitesses apparentes et on conserve (ou on rejette) tout ce qui est à l'intérieur de l'éventail choisi. Il semble également que ce dernier procédé introduit des transitoires plus forts que ceux qui résultent du filtrage autodirectif présenté ici. Une étude reste à faire sur la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes.

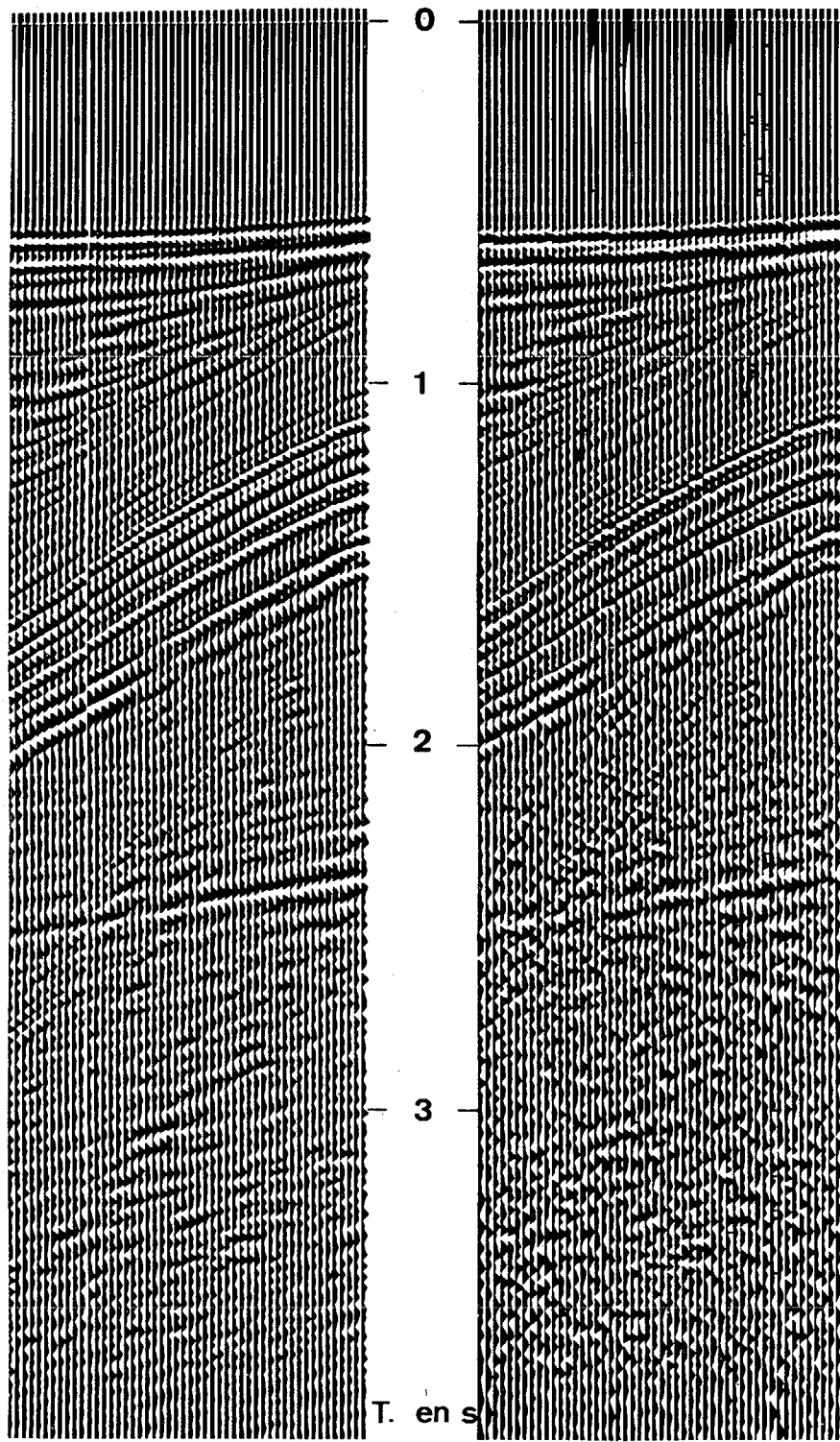
II.2 - Exemple

La figure 6 donne un exemple de traitement par le procédé autodirectif qui vient d'être décrit. Les séries originales (fig. 6 a) sont les mêmes que sur les figures 3 a et 4 a. On a procédé par secteurs de 0,2 sec. On constate une nette amélioration du rapport signal/bruit. Les bruits inorganisés, c'est-à-dire non corrélés d'une série à l'autre ont disparu, ou, plus exactement, ils ont été remplacés par des bruits localement organisés : ceci ne constitue pas nécessairement une amélioration au sens de l'interprétation géophysique. Le géophysicien aura peut-être en effet plus de difficulté à différencier le bruit du signal après le filtrage qui a été effectué. Il n'en reste pas moins que la cohérence des événements qui sont en corrélation d'une série à l'autre a été très nettement renforcée. On remarquera particulièrement l'information qui apparaît à 2,4 secondes environ, dont l'amplitude et le caractère ont été très améliorés. Par ailleurs, les décrochements que l'on voit toutes les huit séries sur les premières arrivées de l'information et qui sont dues à des approximations au cours d'un traitement précédent, ont complètement disparu. Les variations de ces premières arrivées sont très progressives et ne procèdent plus par escalier.

Il convient de noter que ce que l'on appelle enregistrements originaux (fig. 2 a, 3a, 4 a, 6 a) ne sont pas ceux qui ont été effectués sur le terrain même, mais résultent du traitement habituel qu'on réalise en géophysique : recherche de lois de vitesses, corrections dynamiques, couverture multiple, déconvolution, enlèvement de réflexions multiples, filtrage variable dans le temps.

II.3 - Difficultés rencontrées

L'exemple présenté peut être considéré comme de très bonne qualité par rapport à la qualité moyenne des enregistrements sismiques. En fait, lorsque le niveau du bruit n'est pas négligeable par rapport à celui de l'information utile, on constate que les valeurs θ_{ji} trouvées ne sont pas cohérentes entre elles. Leur mode même de calcul semble consi-



6 b

6 a

Fig. 6



dérer que ces valeurs sont indépendantes, ce qui est absolument faux. Si, par exemple, on considère trois séries y_1, y_2, y_3 , on est amené à calculer $\theta_{1,2}$; $\theta_{1,3}$ et $\theta_{2,3}$, on devrait évidemment trouver : $\theta_{1,3} = \theta_{1,2} + \theta_{2,3}$, or, malheureusement, il se trouve parfois que cette relation n'est pas vérifiée. Ceci affecte non seulement la valeur des coefficients de la matrice du système linéaire, mais aussi le mode d'application des opérateurs trouvés car on commence à les faire agir à des temps $t_0 + \theta_{ji}$ qui sont faux.

La solution de cette difficulté peut être donnée de la manière suivante. On considère la fonction $\varphi(\theta_{ji})$ définie comme une corrélation généralisée des séries y_p par la relation :

$$\varphi(\theta_{ji}) = \int_{-\infty}^{+\infty} y_j(t) y_i(t + \theta_{ji}) y_k(t + \theta_{jk}) \dots dt$$

et on détermine les valeurs des θ_{ji} qui rendent la fonction maximale. Il est inutile de calculer φ pour toutes les valeurs des θ_{ji} ; on peut appliquer des procédés d'optimisation comme celui qui fait le sujet de la thèse de doctorat de M. Vignes, on obtient ainsi des valeurs θ_{ji} cohérentes.

Une autre difficulté provient du fait que si pour une même série, on utilise des opérateurs différents de filtrage, il se pose des problèmes de norme. Rien ne prouve en effet que le module du spectre bidimensionnel de ces opérateurs a la même valeur, il en résulte que certains secteurs sont amplifiés, d'autres étant atténués, on perd donc la répartition des amplitudes de la série originale. Une simple mise en mémoire de la moyenne des valeurs absolues des amplitudes de la trace originale à laquelle on ramène la moyenne après filtrage, corrige ces sauts d'énergie. Mais ceci suppose que l'on procède par secteurs de longueur non négligeable (0,2 seconde au moins). Or il peut arriver que dans certains cas, il faille réduire la longueur des secteurs. Si, par exemple, on se trouve en présence d'un biseau, c'est-à-dire lorsque deux événements distincts de pente différente viennent interférer, on a intérêt à séparer les deux événements au maximum. Ceci amène à penser que le meilleur procédé consiste à calculer les opérateurs de filtrage pour un grand secteur. Ces opérateurs que l'on appliquera à l'ensemble de la série correspondront à un ensemble de valeurs θ'_{ji} de base. A chaque pas, il suffira de calculer les valeurs θ_{ji} et d'appliquer les opérateurs précédents avec des décalages $\theta_{ji} - \theta'_{ji}$.



CONCLUSION

Les techniques employées notamment pour la détection des explosions nucléaires par des méthodes prédictives appliquées aux séries temporelles multiples peuvent être utilisées pour améliorer le rapport signal/bruit et la cohérence des événements sur les enregistrements sismiques. L'adaptation nécessaire du procédé provient de la différence entre la nature même des phénomènes que l'on veut mettre en évidence. Sur les uns, l'information utile est isolée dans un contexte de bruit dont il faut l'extraire, mais elle est en phase sur les différentes séries, sur les autres cette information utile arrive pratiquement à chaque instant en même temps que le bruit et avec des déphasages notables d'une série à l'autre, il est alors très difficile, sur ces derniers enregistrements de faire la différence entre les caractéristiques du signal et celles du bruit. Les résultats obtenus sont encourageants comme le montrent les exemples proposés.

R E F E R E N C E S

- CLAËRBOUT, J.F., 1964, Detection of P waves from weak sources at great distances, Geophysics, Vol. 29, p.197-210.
- HEMON, CH., 1969, Quelques applications de la théorie de la prédiction au traitement des données sismiques, Geophysical Prospecting, Vol. XVII, p. 165-181.
- ROBINSON, E.A., 1954, Predictive decomposition of time series with applications to seismic exploration, Ph. Thesis, MIT, Cambridge, Mass.
- ROBINSON, E.A., 1956, Multichannel Z transforms and minimum-delay, Geophysics, Vol. 31, p. 482-500.
- TREITEL, S., 1970, Principles of digital multichannel filtering, Geophysics, Vol. 35, p. 785-811.
- WADSWORTH, G.P., ROBINSON, E.A., BRYAN, J.G., and HURLEY, P.M. 1953, Detection of reflections on seismic records by linear operators, Geophysics, Vol. 18, p. 539-586.