

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication :

2 494 450

(A n'utiliser que pour les
commandes de reproduction).

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21) **N° 80 24276**

(54) Procédé d'exploration sismique par la technique du profil sismique vertical et installation pour sa mise en œuvre.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). **G 01 V 1/28.**

(22) Date de dépôt 14 novembre 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande B.O.P.I. — « Listes » n° 20 du 21-5-1982.

(71) Déposant : Société dite : SOCIETE DE PROSPECTION ELECTRIQUE SCHLUMBERGER, société anonyme, résidant en France.

(72) Invention de : Bronislaw Seeman.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Francis Hagel, service brevets Schlumberger,
42, rue Saint-Dominique, 75340 Paris Cedex 07.

PROCEDE D'EXPLORATION SISMIQUE PAR LA TECHNIQUE DU PROFIL
SISMIQUE VERTICAL ET INSTALLATION POUR SA MISE EN OEUVRE

L'invention concerne un procédé pour l'étude des formations souterraines par la technique dite du profil sismique vertical, dans 5 lequel un détecteur d'ondes acoustiques est placé dans un puits successivement à différentes profondeurs, des ondes acoustiques sont émises au moyen d'une source en surface et les signaux produits par le détecteur sont enregistrés.

Un objectif essentiel de ces mesures est de déceler les horizons 10 réflexifs ou miroirs situés plus bas que le fond du puits, grâce à l'analyse des ondes acoustiques réfléchies par ces miroirs et remontant vers le détecteur appelées ci-après ondes remontantes.

Toutefois, les ondes détectées comprennent, en plus des ondes remontantes, les ondes qui se sont propagées directement de la source 15 au détecteur, des ondes ayant subi des réflexions multiples et des ondes parasites de diverse nature.

En regroupant tous les enregistrements en un document unique, on peut repérer des cohérences entre les différents tracés mais étant donné la multiplicité des composantes qui se superposent dans chaque 20 signal, l'interprétation de ce document est extrêmement délicate.

Un filtrage des signaux recueillis apparaît donc nécessaire pour améliorer le rapport signal/bruit et mieux mettre en évidence les ondes remontantes.

Il est bien connu, afin d'accentuer les composantes d'ondes remontantes, de décaler les signaux de façon à aligner les ondes remontantes, et d'additionner les signaux ainsi décalés. Cette technique repose sur le fait que, pour deux signaux donnés s_i et s_k , le décalage entre les temps d'arrivée des ondes remontantes est de même valeur que le décalage t_k relatif aux ondes descendantes et de sens contraire, sous réserve que le miroir ne présente pas un pendage trop accusé. Et les décalages t_k , qui représentent le temps de propagation des ondes acoustiques d'un niveau à l'autre, sont très facilement accessibles, par exemple à partir d'une diagraphie acoustique du puits indiquant la vitesse de propagation dans les formations traversées. Cependant, cette technique de sommation ne fournit pas en elle-même une réjection suffisante du bruit.

Par ailleurs, en ce qui concerne les niveaux de détection, la technique classique consiste à les choisir équidistants (voir l'ouvrage "Vertical Seismic Profiling" de E.I. Gal'perin, Society of Exploration Geophysicists, publication spéciale No.12, pages 11-12).

La demande de brevet français No. 2 432 177 prévoit de traiter deux signaux correspondant à des niveaux consécutifs en les décalant pour aligner les ondes descendantes et en les soustrayant l'un de l'autre. Sous réserve que le décalage Δt ait une valeur déterminée, égale au quart de la pseudo-période des ondes acoustiques, on obtient la suppression de la composante d'onde descendante et le renforcement de la composante d'onde remontante.

Mais ceci n'est vrai en fait que pour la fréquence correspondant à la pseudo-période ci-dessus.

De plus, le fait d'assigner une valeur constante à tous les temps Δt revient à fixer a priori les niveaux de détection, ce qui en pratique est un sérieux inconvénient, pour la raison suivante.

La qualité des signaux recueillis dépend d'une façon déterminante du couplage acoustique entre le détecteur et la formation. Le couplage acoustique est lui-même fonction de l'état du puits au niveau considéré.

Ainsi, si la mesure a lieu dans un trou découvert, le couplage détecteur-formation sera bon si le diamètre du puits est régulier et la formation compacte.

Dans un trou tubé, c'est la liaison entre le tubage et la formation- c'est-à-dire la qualité de la cimentation- qui sera déterminante.

Il est donc important, pour obtenir des signaux de détection de qualité optimale, de pouvoir choisir librement les niveaux de détection et donc de pouvoir s'écartier de la règle énoncée dans la demande de brevet précitée.

Dans la même optique, il est souhaitable de pouvoir éliminer les signaux de détection dont la qualité apparaît déficiente. Cette possibilité n'existe pas si le procédé de filtrage utilisé repose sur l'hypothèse que tous les décalages entre signaux de niveaux consécutifs sont égaux.

L'invention vise donc à améliorer le rapport signal/bruit des signaux de détection de façon à accentuer très fortement les composantes d'onde remontante et cela en autorisant un libre choix des niveaux de détection et l'élimination éventuelle des signaux de qualité déficiente.

Selon l'invention, le filtrage des signaux de détection comprend les opérations suivantes :

- prélever parmi les N signaux à traiter un groupe de n signaux $s_1 \dots s_k \dots s_n$ détectés à des niveaux $x_1 \dots x_k \dots x_n$ successifs ;
- 20 - déterminer les temps de propagation t_k des ondes acoustiques du niveau x_1 à chaque niveau x_k ;
- décaler chaque signal s_k en l'avancant du temps t_k par rapport au signal s_1 de façon à aligner les composantes d'onde descendante ;
- additionner le signal s_1 et les signaux s_k ainsi avancés pour obtenir 25 une somme z_1 ;
- décaler chaque signal s_k en le retardant du temps t_k par rapport au signal s_1 ;
- additionner le signal s_1 et les signaux s_k ainsi retardés pour obtenir une somme y_1 ;
- 30 - générer un signal u_1^* , défini comme une estimation optimale de la composante d'onde remontante pour l'ensemble des signaux $s_1 \dots s_n$, à partir des signaux y_1 et z_1 ;
- enregistrer ce signal u_1^* ;
- et répéter ces opérations pour obtenir des signaux $u_2^* \dots u_i^* \dots u_{N-n+1}^*$.

Le mode de filtrage selon l'invention n'impose aucune condition aux temps t_k et par conséquent les niveaux de détection x_k peuvent être choisis en fonction de l'état du puits de manière à obtenir un couplage acoustique optimal entre le détecteur et la formation.

5 Pour la même raison, rien n'interdit d'éliminer certains des signaux recueillis, s'il apparaît que leur qualité est insuffisante. Cette possibilité contribue à améliorer le rapport signal/bruit des signaux obtenus.

Pour déterminer les signaux u_i^* , l'invention envisage deux solutions 10 différentes.

La première consiste à passer dans le domaine des fréquences. On obtient u_i^* à partir de sa transformée de Fourier U_i^* , que l'on détermine par une relation simple à partir des transformées de Fourier Y_i et Z_i respectivement de y_i et z_i . Dans la seconde solution, on opère uniquement 15 dans le domaine des temps. On obtient alors une valeur u_i^* approchée directement à partir de y_i et z_i . Le caractère approximatif des résultats est compensé par une grande simplicité du traitement.

Une autre caractéristique avantageuse du procédé selon l'invention est qu'il permet de déterminer, tout aussi simplement, des estimations optimales d_i^* des composantes d'onde descendante. La connaissance 20 des valeurs d_i^* est nécessaire pour le traitement de déconvolution qui est appliqué de façon classique à la suite du filtrage. Au sujet de la déconvolution, on se reportera à l'article de P. Kennett et al "Vertical Seismic Profiles : Their Applications in Exploration Geophysics", Geophysical Prospecting, 1980, 28, pages 684 et suivantes.

25 L'invention sera bien comprise à la lecture de la description ci-après, faite en se référant aux dessins annexés.

Dans les dessins

- la figure 1 représente schématiquement une installation 30 d'exploration sismique pour l'obtention d'un profil sismique vertical ;
- la figure 2 montre de façon très simplifiée le trajet des ondes acoustiques descendantes et remontantes, pour deux positions différentes du détecteur ;
- la figure 3 représente sous forme de schéma-blocs un dispositif 35 selon l'invention pour le filtrage des signaux de détection ;
- la figure 4 illustre l'effet de filtrage procuré par le dispositif de la figure 3 ;

- les figures 5 et 6 montrent à titre d'exemple un PSV avant filtrage et après filtrage à l'aide d'un dispositif de la figure 3 ;
- la figure 7 représente une autre forme de réalisation du dispositif de filtrage.

5 La figure 1 représente une installation d'exploration sismique qui comprend une tour de forage 11 disposée au-dessus d'un puits 12 foré dans des formations terrestres 13.

Un appareil de fond 14 comprenant un capteur d'ondes acoustiques tel qu'un géophone est suspendu dans le puits 12 au moyen d'un câble 10 électrique 15 passant sur des poulies solidaires de la tour de forage. Le câble 15 permet de déplacer l'appareil 14 dans le puits et assure en même temps la transmission des signaux de détection produits par le capteur vers un équipement de surface 16. L'équipement de surface 16 comprend de façon classique un treuil pour enrouler le câble et des moyens 15 pour déterminer la profondeur à laquelle se trouve l'appareil de fond 14, et des moyens pour traiter et enregistrer les signaux de détection transmis par le câble 15.

L'appareil de fond 14 comprend de façon également classique un élément d'ancre 17 qui peut s'écartier de l'appareil 14 et 20 s'ancrer dans la paroi pour assurer un contact approprié entre le capteur et la paroi du puits. Cela ne se produit que lorsque l'appareil 14 est arrivé à une profondeur où une mesure doit être exécutée, l'équipement de surface 16 émettant alors un message pour commander le déploiement de l'élément d'ancre.

25 Une source d'ondes acoustiques 18 est placée à la surface, à une distance déterminée de la tête de puits. Cette source peut être constituée par tout dispositif approprié tel qu'un canon à air. La source 18 est commandée à partir de l'équipement de surface 16 pour effectuer un "tir" lorsque l'appareil de fond 14 est ancré à l'un des niveaux de 30 profondeur prévus.

Plusieurs tirs sont effectués pour chaque niveau, et l'ensemble des signaux ainsi produits sont mis en mémoire et additionnés dans l'équipement de surface 16 de manière que pour chaque niveau, on obtienne un signal dans lequel les composantes significatives soient renforcées au 35 détriment des composantes de bruit aléatoires. On conviendra dans la suite d'appeler ce signal le signal de détection.

A partir de l'ensemble des signaux de détection obtenus pour les différents niveaux, on produit des enregistrements graphiques ou traces sismiques que l'on regroupe en un document unique appelé profil sismique vertical (PSV) dont la figure 5 montre un exemple.

5 La figure 2 représente de façon très simplifiée le trajet des ondes acoustiques détectées par le capteur à deux niveaux. La référence 20 désigne un horizon réflexif ou "miroir" plus profond que le fond 22 du puits. Le miroir 20 est constitué par l'interface entre deux couches d'impédances acoustiques nettement différentes.

10 Le capteur placé en A_1 au niveau x_1 reçoit une onde acoustique qui se propage directement depuis la source, appelée onde descendante, et une onde réfléchie par le miroir 20, dite onde remontante. C'est cette onde remontante qu'il faut mettre en évidence pour pouvoir déterminer la profondeur du miroir et son coefficient de réflexion.

15 Le signal de détection $s_1(t)$ obtenu au niveau x_1 est donc la somme d'une composante d'onde descendante $d_1(t)$ et d'une composante d'onde remontante $u_1(t)$ et comprend en outre des composantes de bruit dont certaines proviennent de réflexions multiples sur des miroirs situés entre la surface et le fond du puits.

20 Le capteur placé en A_k au niveau x_k recevra de même une onde descendante et une onde remontante, mais l'onde descendante arrivera plus tard et l'onde remontante plus tôt. Le décalage t_k entre les temps d'arrivée des ondes descendantes vaut

$$t_k = \frac{x_k - x_1}{v_k}$$

25 v_k étant la vitesse moyenne de propagation des ondes acoustiques dans la tranche délimitée par les niveaux x_1 et x_k .

Le décalage t'_k entre les temps d'arrivée des ondes remontantes est égal à $-t_k$ si le miroir 20 est sensiblement horizontal. Un terme correctif doit être ajouté si le miroir 20 présente un pendage important.

30 Nous supposerons toutefois dans un premier temps qu'il n'y a pas lieu d'introduire un tel correctif.

Compte tenu de ce qui précède, le signal $s_k(t)$ obtenu au niveau x_k comprend une composante d'onde descendante

$$d_k(t - t_k)$$

et une composante d'onde remontante

$$5 \quad u_k(t + t_k)$$

Sur les diagrammes de la figure 4, réalisés à partir de données synthétiques, comme sur le profil sismique vertical de la figure 5, résultant de mesures réelles, on observe des pics correspondant aux ondes descendantes et on peut vérifier qu'ils se décalent régulièrement d'une trace à l'autre. En revanche, dans les deux cas, les composantes d'ondes remontantes ont un rapport signal/bruit trop faible pour qu'on puisse 10 les détecter.

Un filtrage des signaux recueillis est donc nécessaire pour mettre en évidence l'onde remontante avec une netteté suffisante.

15 Le principe de filtrage proposé est le suivant.

Parmi les N signaux de détection à traiter $s_1 \dots s_n$, prélevons une série de n signaux, par exemple $s_1 \dots s_k \dots s_n$ ($n \leq N$).

Posons qu'il existe des estimations u_1^* et d_1^* des composantes d'onde remontante et d'onde descendante qui sont optimales pour l'ensemble 20 des n signaux ci-dessus.

Compte tenu de ce qui précède, on peut écrire, suivant la formulation des moindres carrés, qu'il faut minimiser l'expression

$$\sum_{k=1}^n |s_k(t) - u_1^*(t + t_k) - d_1^*(t - t_k)|^2 \quad (I)$$

Dans le domaine des fréquences, l'expression (I) ci-dessus 25 devient

$$\sum_{k=1}^n |S_k - \alpha_k U_1^* - \bar{\alpha}_k D_1^*|^2 \quad (II)$$

où S_k , U_1^* et D_1^* sont les transformées de Fourier de $s_k(t)$, $u_1^*(t)$ et $d_1^*(t)$ et α_k et $\bar{\alpha}_k$ sont respectivement les opérateurs $\exp(-it_k w)$ et $\exp(it_k w)$. On a bien entendu $t_1 = 0$ et $\alpha_1 = \bar{\alpha}_1 = 1$.

En annulant les dérivées par rapport à U_1^* et D_1^* de l'expression (II) on obtient les équations

$$\sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k S_k - U_1^* \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2 - n D_1^* = 0 \quad (\text{III})$$

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k S_k - D_1^* \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 - n U_1^* = 0 \quad (\text{IV})$$

5 On en tire, en résolvant les équations (III) et (IV) en U_1^*

$$U_1^* = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot S_k - \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k \cdot S_k}{n^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2} \quad (\text{V})$$

$\bar{\alpha}_k S_k$ est la transformée de Fourier du signal $s_k(t + t_k)$, obtenu en avançant le signal $s_k(t)$ du temps t_k par rapport au signal $s_1(t)$. En décalant ainsi s_k par rapport à s_1 , on réalise l'alignement des composantes d'onde descendante. La somme $\sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k S_k$ est donc la transformée de Fourier Z_1 d'un signal $z_1(t)$ obtenu en additionnant le signal $s_1(t)$ et les signaux $s_k(t + t_k)$.

De même $\alpha_k S_k$ est la transformée de Fourier du signal $s_k(t - t_k)$ obtenu en retardant $s_k(t)$ par rapport à $s_1(t)$, ce décalage produisent l'alignement des composantes d'onde remontante.

La somme $\sum_{k=1}^n \alpha_k S_k$ est donc la transformée de Fourier Y_1 d'un signal $y_1(t)$ obtenu en additionnant le signal $s_1(t)$ et les signaux $s_k(t - t_k)$.

L'expression devient alors

$$U_1^* = \frac{n Y_1 - Z_1 \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k^2}{n^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2} \quad (\text{VI})$$

et à partir de U_1^* , on calcule u_1^* par transformation de Fourier inverse.

Les temps t_k peuvent être déterminés par simple lecture à partir d'une diagraphie acoustique du puits. Toutefois, un mode de calcul préférable consiste à détecter les pics correspondant aux premières arrivées des ondes descendantes et à mesurer le temps qui les sépare.

Le procédé ci-dessus fournit donc de façon simple une estimation optimale des composantes d'onde remontante.

On recommence ensuite ces opérations pour déterminer un signal u_2^* à partir des signaux $s_2 \dots s_{n+1}$, et ainsi de suite jusqu'au groupe 10 $s_{N-1+1} \dots s_N$. Finalement, à partir de N signaux à traiter, on obtient une série de $(N-n+1)$ signaux u_i^* .

On obtient de façon correspondante D_1^* par l'expression

$$D_1^* = \frac{nZ_1 - Y_1 \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2}{n^2 - \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2} \quad (\text{VII})$$

et on en tire la transformée de Fourier inverse d_1^* , estimation optimale 15 des composantes d'onde descendante, puis successivement tous les signaux d_i^* . Les signaux d_i^* sont nécessaires pour l'application de la déconvolution à laquelle on procède de façon classique après le filtrage.

En alignant les enregistrements des signaux u_i^* sous la forme d'un PSV, on observera que les pics correspondants sont parfaitement 20 alignés et très nets si le miroir 20 est sensiblement horizontal.

Si l'on constate que les pics sont moins nets et sont décalés l'un par rapport à l'autre, il faut supposer que le miroir 20 présente un pendage assez accusé.

Dans ce cas, on détermine les écarts ϵ_k entre la position des 25 pics et la position qu'ils occuperait en l'absence de pendage et l'on recommence les opérations précédentes en remplaçant chaque opérateur $\bar{\alpha}_k$ par un opérateur $\gamma_k = \exp(i(t_k + \epsilon_k)w)$.

Le procédé de filtrage décrit est mis en oeuvre à l'aide du dispositif de la figure 3.

30 Les signaux de détection ont été préalablement enregistrés et examinés pour que les signaux de qualité déficiente soient éliminés.

Il reste après cette sélection N signaux $s_1 \dots s_N$ que l'on inscrit dans une mémoire 30.

La mémoire 30 est commandée pour fournir une série de n signaux correspondant à des niveaux successifs. On envisagera ici le traitement 5 de la première série de signaux $s_1 \dots s_k \dots s_n$. Les signaux $s_2 \dots s_k \dots s_n$ sont appliqués à un premier circuit de décalage 31 qui les retarde respectivement des temps $t_2 \dots t_k \dots t_n$ par rapport à s_1 . Le signal $s_1(t)$ et les signaux $s_k(t + t_k)$ obtenus sont appliqués à un additionneur 32 qui délivre le signal-somme $y_1(t)$. Les signaux $s_2 \dots s_n$ sont également appliqués à un second circuit de décalage 33 qui les avance par rapport à s_1 10 respectivement des temps $t_2 \dots t_k \dots t_n$. Le signal $s_1(t)$ et les signaux $s_k(t - t_k)$ sont appliqués à un additionneur 34 qui fournit le signal-somme $z_1(t)$.

Les circuits de décalage 31 et 33 peuvent être constitués de 15 façon connue pour l'homme de l'art, par un ensemble de registres à décalage. Les temps t_k sont déterminés en mesurant l'intervalle de temps entre les premières arrivées des ondes descendantes pour les signaux s_1 et s_k et sont enregistrés dans une mémoire 35.

Des dispositifs 36 et 37 fournissant les transformées de 20 Fourier délivrent des signaux représentatifs des fonctions Y_1 et Z_1 à partir des sommes y_1 et z_1 .

Un calculateur 38 est programmé pour fournir les grandeurs U_1^* et D_1^* à partir des signaux Y_1 et Z_1 et des temps t_k , conformément aux relations (VI) et (VII) ci-dessus.

25 Un dispositif 39 fournissant la transformée de Fourier inverse délivre un signal u_1^* à partir du signal U_1^* . Le signal u_1^* est inscrit dans une mémoire 40.

Un dispositif 41 fournit de même la transformée de Fourier inverse d_1^* , qui est inscrite dans une mémoire 42.

30 Ce traitement est ensuite répété en décalant d'un niveau, c'est-à-dire avec la série de signaux $s_2 \dots s_{n+1}$, et ainsi de suite jusqu'à ce que le dernier signal de la série soit le signal s_N .

Les signaux d_i^* obtenus seront utilisés dans un traitement de déconvolution ultérieur.

Les signaux u_i^* obtenus sont appliqués à un enregistreur graphique 43 qui produit un profil sismique vertical regroupant tous les diagrammes de signaux. La figure 6 montre le profil sismique obtenu à partir des traces de départ constituant le profil sismique de la figure 5 5.

Les diagrammes de la figure 4 illustrent les résultats obtenus à l'aide du procédé de filtrage décrit ci-dessus.

Les diagrammes 4-1 à 4-11 représentent des signaux de détection correspondant à 11 niveaux successifs réalisés à partir de données 10 synthétiques. Tous les temps de propagation entre niveaux consécutifs sont égaux. On observe sur toutes les traces, à l'exception des traces 4-2, 4-5 et 4-8, des pics correspondant aux ondes descendantes. Les ondes remontantes en revanche ne peuvent pratiquement pas être distinguées du bruit.

15 Pour le filtrage, on élimine les traces 4-2, 4-5 et 4-8 dont la qualité est manifestement déficiente.

On obtient par le procédé de filtrage ci-dessus un signal u^* qui présente un pic (U) très marqué correspondant à l'onde remontante. La composante d'onde descendante (D) est au contraire très atténuee.

20 Cet exemple montre que le procédé de filtrage selon l'invention n'impose aucune condition précise en ce qui concerne les temps de propagation et donc les niveaux de détection. En particulier, il n'est nullement nécessaire que les temps de propagation entre niveaux consécutifs soient égaux.

25 Ainsi, sur la figure 4, si l'on considère uniquement les signaux effectivement utilisés, les temps de propagation entre niveaux consécutifs ne sont pas tous égaux, mais on obtient un rapport signal/bruit tout à fait satisfaisant.

Le fait que le procédé selon l'invention ne repose pas sur 30 l'hypothèse de temps de propagation égaux entre niveaux consécutifs est un avantage pratique très important.

Cela permet en premier lieu de choisir librement les niveaux de détection de façon à optimiser le couplage acoustique du détecteur avec la formation.

35 Si la mesure a lieu en trou découvert, on pourra déterminer les zones les plus favorables à l'aide d'une diagraphie de diamètre,

indiquant les zones de diamètre régulier, et d'une diagraphie acoustique indicative de la vitesse de propagation des ondes acoustiques et donc de la compacité des formations traversées.

Si l'on opère en trou tubé, le facteur déterminant pour le 5 couplage sera la qualité de la liaison du ciment au tubage. On pourra déterminer les zones favorables à l'aide d'une diagraphie telle qu'obtenue par le dispositif selon le brevet français No. 2 400 613.

La liberté dans le choix des niveaux de détection n'existe toutefois qu'à l'intérieur d'une certaine plage.

10 Au-delà d'un certain intervalle entre niveaux consécutifs, la corrélation entre traces consécutives deviendrait moins fiable. On admet généralement que cet intervalle ne doit pas dépasser environ le tiers de la longueur d'onde des ondes acoustiques (voir l'ouvrage précité de E.I. Gal'perin, page 27). Pour fixer les idées, on peut indiquer un écart 15 maximal d'environ 40 mètres.

On peut d'autre part considérer comme raisonnable un écart minimal d'environ 10 mètres.

En ce qui concerne le nombre n de signaux que l'on utilise pour déterminer chaque signal u_i^* , le choix dépend du rapport signal/bruit 20 souhaité. On préfère par commodité choisir un nombre impair, et un bon compromis entre la qualité du signal produit et la durée du traitement est obtenue avec $n = 7, 9$ ou 11 .

Une variante simplifiée du procédé de filtrage consiste à déterminer les signaux u_i^* sans passer dans le domaine des fréquences, les 25 valeurs obtenues n'étant alors que des approximations.

Si l'on part de l'expression (I) ci-dessus

$$\sum_{k=1}^n \left| s_k(t) - u^*(t + t_k) - d^*(t - t_k) \right|^2$$

et qu'on annule sa dérivée par rapport à $d^*(t)$, on obtient

$$\sum_{k=1}^n \left(s_k(t + t_k) - d^*(t) - u^*(t + 2t_k) \right) = 0 \quad (\text{VIII})$$

c'est-à-dire

$$z(t) - nd^*(t) - \sum_{k=1}^n u^*(t + 2t_k) = 0 \quad (\text{IX})$$

On obtient de façon correspondante, en annulant la dérivée de (I) par rapport à $u^*(t)$

$$5 \quad u^*(t) - \frac{1}{n} y(t) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d(t - 2t_i) = 0 \quad (\text{X})$$

En exprimant le troisième terme de cette équation à l'aide de l'équation (IX), et en reportant l'expression obtenue dans l'équation (X), on obtient

$$10 \quad u^*(t) = \frac{1}{n} y(t) - \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n z(t - 2t_k) - \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n u^*(t - 2t_i - 2t_k) \quad (\text{XI})$$

En négligeant le troisième terme, on arrive à la valeur approximative

$$10 \quad u^*(t) = \frac{1}{n} y(t) - \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n z(t - 2t_k) \quad (\text{XII})$$

Le traitement nécessaire pour déterminer les signaux u_i^* dans cette variante est extrêmement simple puisqu'il ne comporte aucune transformation de Fourier.

On obtient de façon correspondante, pour les ondes remontantes, la valeur approximative

$$15 \quad d^*(t) = \frac{1}{n} z(t) - \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n y(t + 2t_k) \quad (\text{XIII})$$

La figure 7 représente le dispositif pour la mise en oeuvre de cette variante.

Le bloc 50 sur la figure 7 regroupe l'ensemble des éléments 30-34 de la figure 3 et fournit les signaux $y_1(t)$ et $z_1(t)$.

Un circuit de décalage 51 recevant le signal $z_1(t)$ fournit les signaux décalés $z_1(t - 2t_k)$, les temps $2t_k$ étant fournis par une mémoire 52. Les signaux $z_1(t)$ et $z_1(t - 2t_k)$ sont appliqués à un additionneur 53. La somme obtenue est divisée par n^2 dans un diviseur 54.

5 Le signal $y_1(t)$ est divisé par n dans un diviseur 55, et les sorties des diviseurs 53 et 54 sont reliées à un soustracteur 56 qui fournit le signal $u_1^*(t)$ recherché, lequel est inscrit dans une mémoire 57.

Le signal $y_1(t)$ est appliqué d'autre part à un circuit de 10 décalage 61 qui fournit les signaux $y_1(t + 2t_k)$, qui sont appliqués avec le signal $y_1(t)$ à un additionneur 63 dont le signal de sortie est divisé par n^2 dans un diviseur 64.

Le signal $z_1(t)$ est divisé par n dans un diviseur 65, et un soustracteur 66 recevant les sorties des diviseurs 64 et 65 fournit le 15 signal $d_1^*(t)$ qui est inscrit dans une mémoire 67.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'exploration sismique dans lequel on filtre, pour en améliorer le rapport signal/bruit, des signaux produits par un détecteur d'ondes acoustiques placé à différentes profondeurs dans un puits, chaque signal étant produit en réponse à une émission d'ondes acoustiques à partir d'une source en surface, lesdits signaux comprenant des composantes d'onde descendante et des composantes d'onde remontante, caractérisé par le fait que le filtrage comprend les opérations suivantes :
- 5 - prélever parmi les N signaux à traiter un groupe de n signaux $s_1 \dots s_k \dots s_n$ détectés à des niveaux $x_1 \dots x_k \dots x_n$ successifs ;
- 10 - déterminer les temps de propagation t_k des ondes acoustiques du niveau x_1 à chaque niveau x_k ;
- 15 - décaler chaque signal s_k en l'avancant du temps t_k par rapport au signal s_1 de façon à aligner les composantes d'onde descendante ;
- additionner le signal s_1 et les signaux s_k ainsi avancés pour obtenir une somme z_1 ;
- décaler chaque signal s_k en le retardant du temps t_k par rapport au signal s_1 ;
- 20 - additionner le signal s_1 et les signaux s_k ainsi retardés pour obtenir une somme y_1 ;
- générer un signal u_1^* , défini comme une estimation optimale de la composante d'onde remontante pour l'ensemble des signaux $s_1 \dots s_n$ à partir des signaux y_1 et z_1 ;
- 25 - enregistrer ce signal u_1^* ;
- et répéter ces opérations pour obtenir des signaux $u_2^* \dots u_i^* \dots u_{N-n+1}^*$
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait que le signal u_1^* est obtenu par transformation de Fourier inverse de l'expression U_1^* , reliée à y_1 et z_1 par la relation

$$U_1^* = \frac{nY_1 - Z_1 \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k^2}{n^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2}$$

où Y_i et Z_i sont les transformées de Fourier de y_i et z_i et α_k et $\bar{\alpha}_k$ sont respectivement les opérateurs $\exp(-it_k w)$ et $\exp(it_k w)$.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé par le fait
 5 que l'on génère en outre un signal d_1^* , estimation optimale de la composante d'onde descendante pour l'ensemble des signaux $s_1 \dots s_n$, à partir des signaux y_1 et z_1 , par transformation de Fourier inverse du signal D_1^* obtenu conformément à la relation

$$D_1^* = \frac{nZ_1 - Y_1 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2}{n^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2}$$

- 10 4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait qu'une valeur approchée du signal u_i^* est calculée par la relation :

$$u_i^* = \frac{1}{n} y_1 - \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n z_1 (t - 2t_k)$$

- 15 5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé par le fait que l'on calcule une valeur approchée du signal d_1^* , estimation optimale de la composante d'onde descendante pour l'ensemble des signaux $s_1 \dots s_n$, à partir des signaux y_1 et z_1 , par la relation

$$d_1^* = \frac{1}{n} z_1 - \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n y_1 (t + 2t_k)$$

6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé par le fait que l'on fixe les profondeurs de détection, à l'intérieur d'une plage déterminée, de manière à optimiser le couplage acoustique entre le détecteur et la formation.

5 7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé par le fait que l'on élimine avant le filtrage les signaux de détection de qualité déficiente.

8. Installation d'exploration sismique pour la mise en œuvre du procédé selon la revendication 1, comprenant un détecteur d'ondes acoustiques et des moyens pour déplacer ce détecteur dans un puits, une source d'ondes acoustiques, des moyens pour enregistrer les signaux produits par le détecteur, lesdits signaux comprenant des composantes d'onde descendante et des composantes d'onde remontante, et des moyens pour filtrer ces signaux afin d'en améliorer le rapport signal/bruit, caractérisée par le fait que les moyens de filtrage comprennent :

10 - une mémoire (30) contenant les N signaux à traiter et commandée pour fournir une série de n signaux $s_1 \dots s_k \dots s_n$ correspondant à des niveaux successifs $x_1 \dots x_k \dots x_n$;

15 - une mémoire (35) contenant les temps de propagation t_k des ondes acoustiques du niveau x_1 à chaque niveau x_k ;

20 - un premier circuit de décalage (31) pour avancer les signaux s_k respectivement du temps t_k par rapport au signal s_1 ;

25 - un premier additionneur (32) fournit la somme z_1 du signal s_1 et des signaux s_k ainsi avancés ;

30 - un second circuit de décalage (33) pour retarder les signaux s_k respectivement du temps t_k par rapport au signal s_1 ;

- un second additionneur (34) fournit la somme y_1 du signal s_1 et des signaux s_k ainsi retardés ;

- des moyens de calcul (36-39 ; 51-55) pour déterminer à partir des signaux y_1 et z_1 un signal u_i^* , défini comme une estimation optimale de la composante d'onde pour l'ensemble des signaux $s_1 \dots s_n$;

- et des moyens d'enregistrement reliés aux moyens de calcul.

9. Installation selon la revendication 8, caractérisée par le fait que les moyens de calcul comprennent des dispositifs (36,37) reliés aux additionneurs (32, 34) et fournissant les transformées de Fourier Y_1 et Z_1 de y_1 et z_1 , un calculateur (38) fournissant la 5 grandeur U_1^* par la relation :

$$U_1^* = \frac{nY_1 - Z_1 \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k^2}{n^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2}$$

où α_k et $\bar{\alpha}_k$ sont respectivement les opérateurs $\exp(-it_k w)$ et $\exp(it_k w)$, et un dispositif (39) fournissant la transformée de Fourier inverse et délivrant le signal u_1^* à partir de U_1^* .

10 10. Installation selon la revendication 9, caractérisée par le fait que le calculateur (38) génère également un signal D_1^* conformément à la relation

$$D_1^* = \frac{nZ_1 - Y_1 \sum_{k=1}^n \alpha_k^2}{n^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \bar{\alpha}_k^2}$$

ce signal étant appliqué au dispositif (39) fournissant la transformée de Fourier inverse qui délivre un signal d_1^* , estimation optimale de la composante d'onde descendante pour l'ensemble des traces 15 $s_1 \dots s_k \dots s_n$.

11. Installation selon la revendication 8, caractérisée par le fait que les moyens de calcul comprennent un dispositif de décalage 20 (51) fournissant à partir du signal $z_1(t)$ des signaux décalés $z_1(t - 2t_k)$, un additionneur (53) fournissant la somme des signaux

$z_1(t)$ et $z_1(t - 2t_k)$, un circuit (54) divisant cette somme par n^2 , un circuit (55) divisant par n le signal y_1 et un soustracteur (56) relié aux deux circuits diviseurs (54, 55) et fournissant un signal u_1^* approché.

5 12. Installation selon la revendication 11, caractérisée par le fait que les moyens de calcul comprennent en outre un dispositif de décalage (61) fournissant à partir du signal $y_1(t)$ des signaux décalés $y_1(t + 2t_k)$, un additionneur (63) fournissant la somme des signaux $y_1(t)$ et $y_1(t + 2tk)$, un circuit (64) divisant cette somme par n^2 , un circuit (56) divisant par n le signal z_1 et un soustracteur (66) relié aux deux circuits diviseurs (64, 65) et fournissant un signal d_1^* représentant de façon approximative une estimation optimale de la composante d'onde descendante pour l'ensemble des traces $s_1 \dots s_k \dots s_n$.

1/6

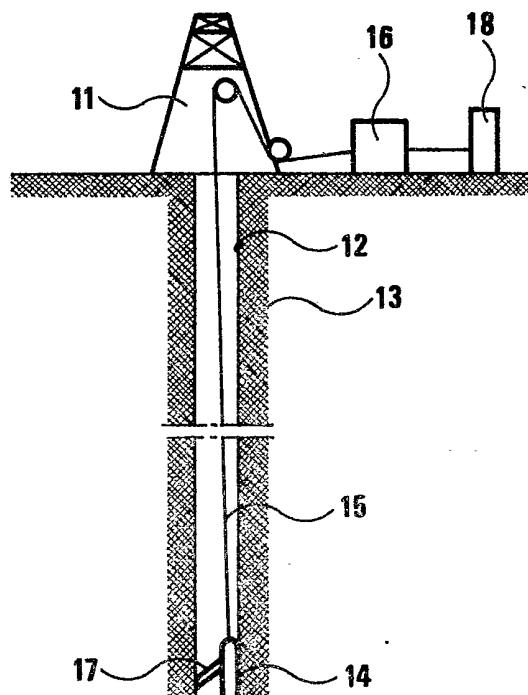


FIG. 1

18

12

FIG. 2

 x_1 ————— A_1 x_k ————— A_k

22

20



2/6

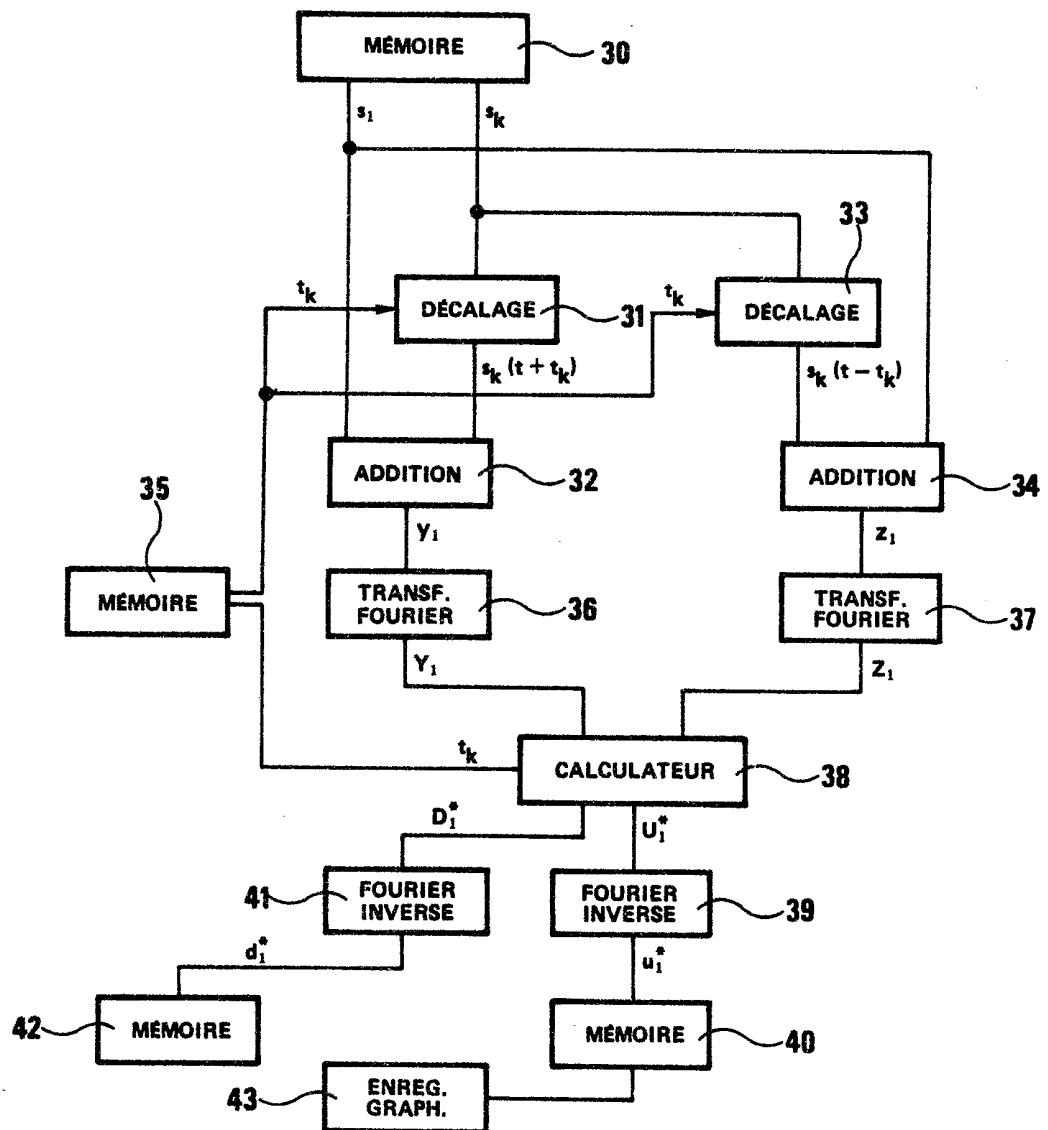


FIG.3

2494450

3/6

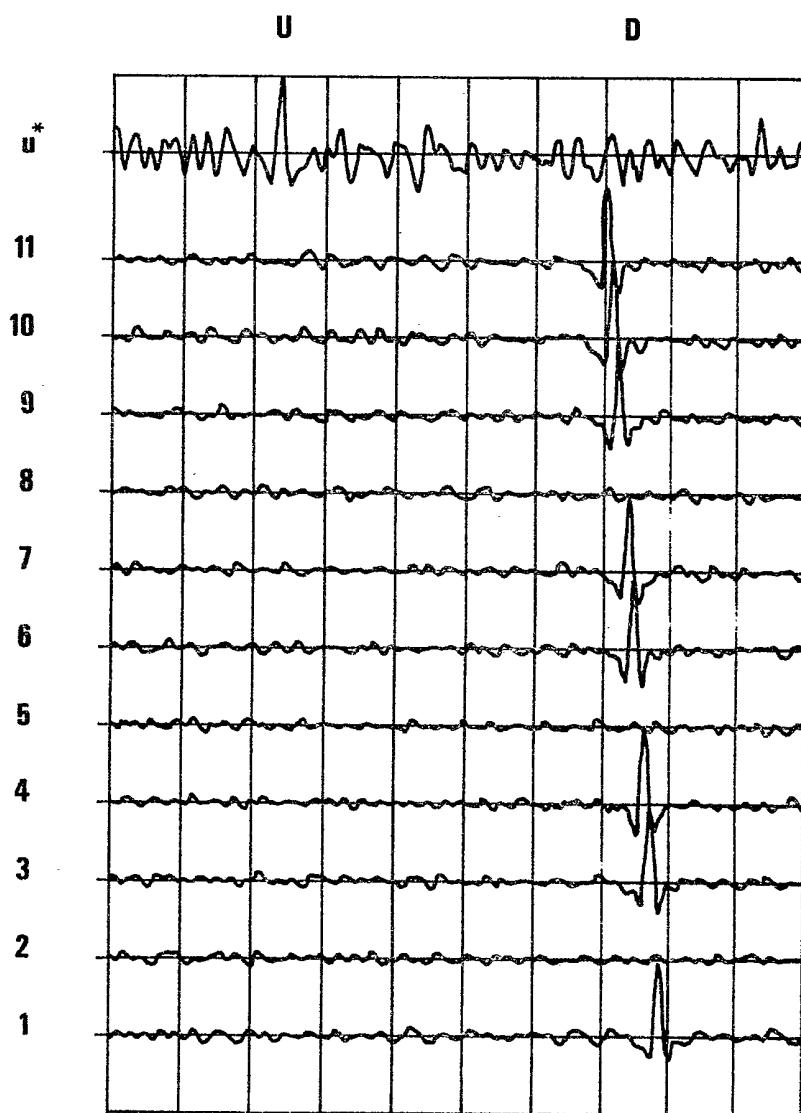


FIG. 4

2494450

4/6

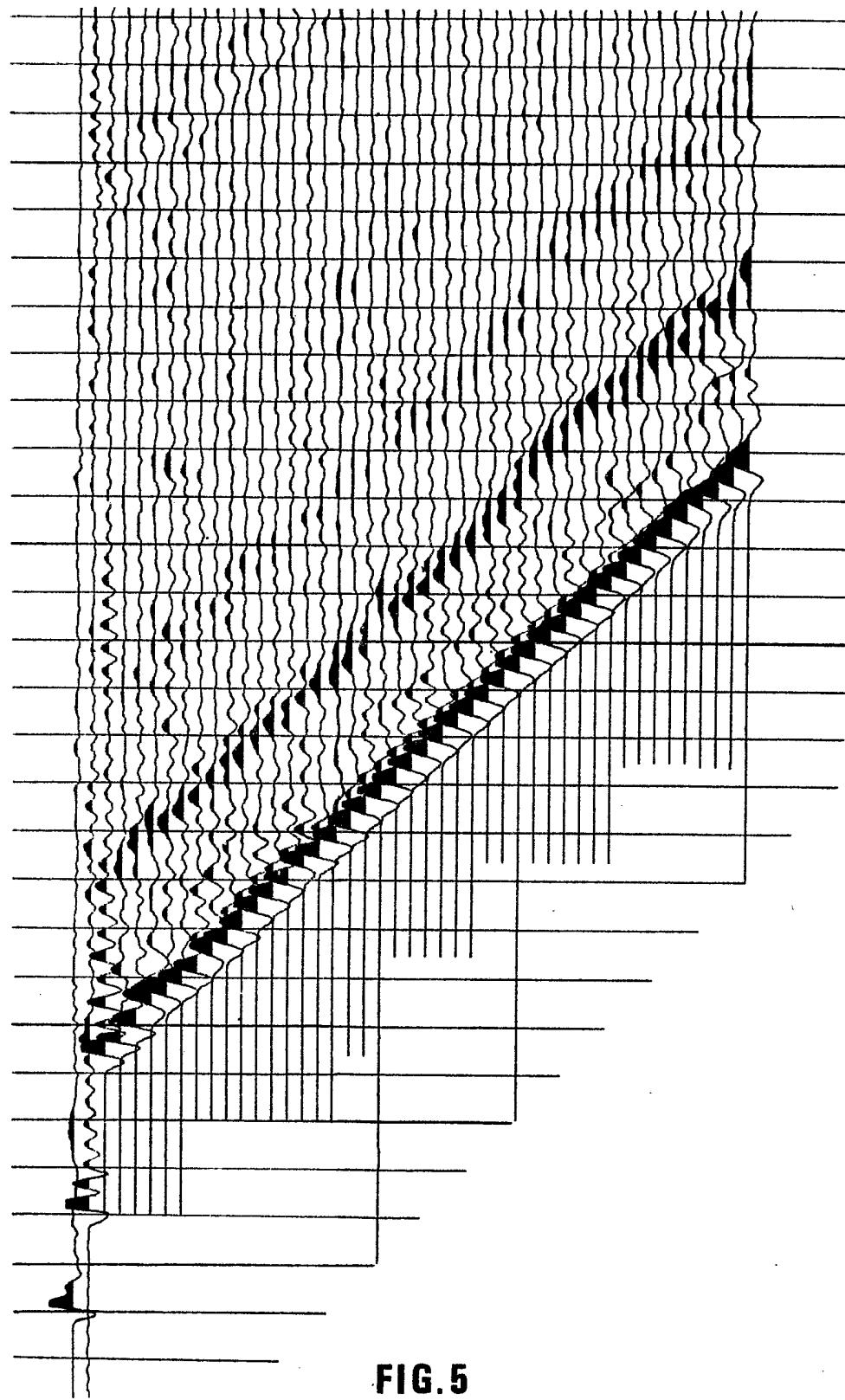


FIG.5

2494450

5/6

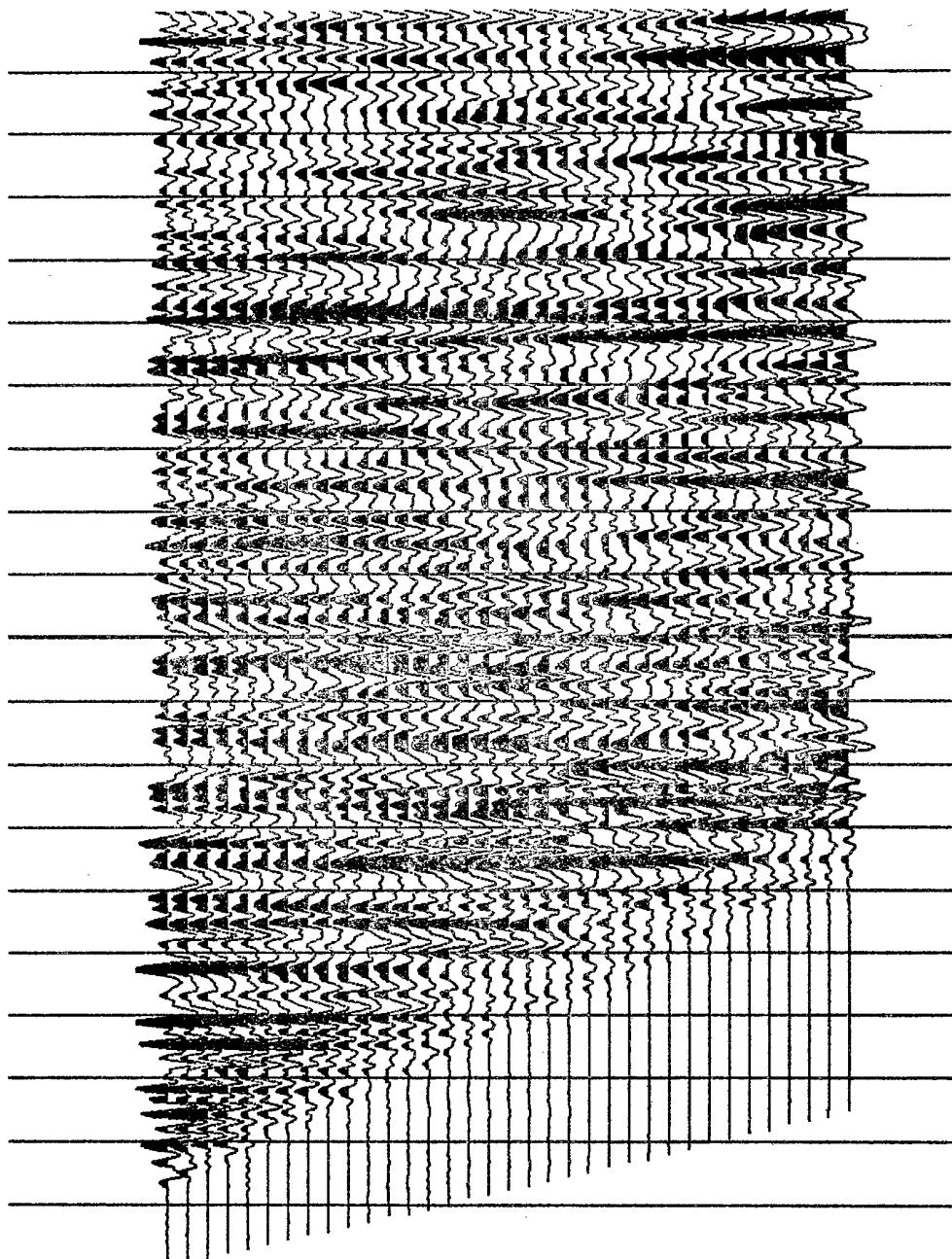


FIG.6

6/6

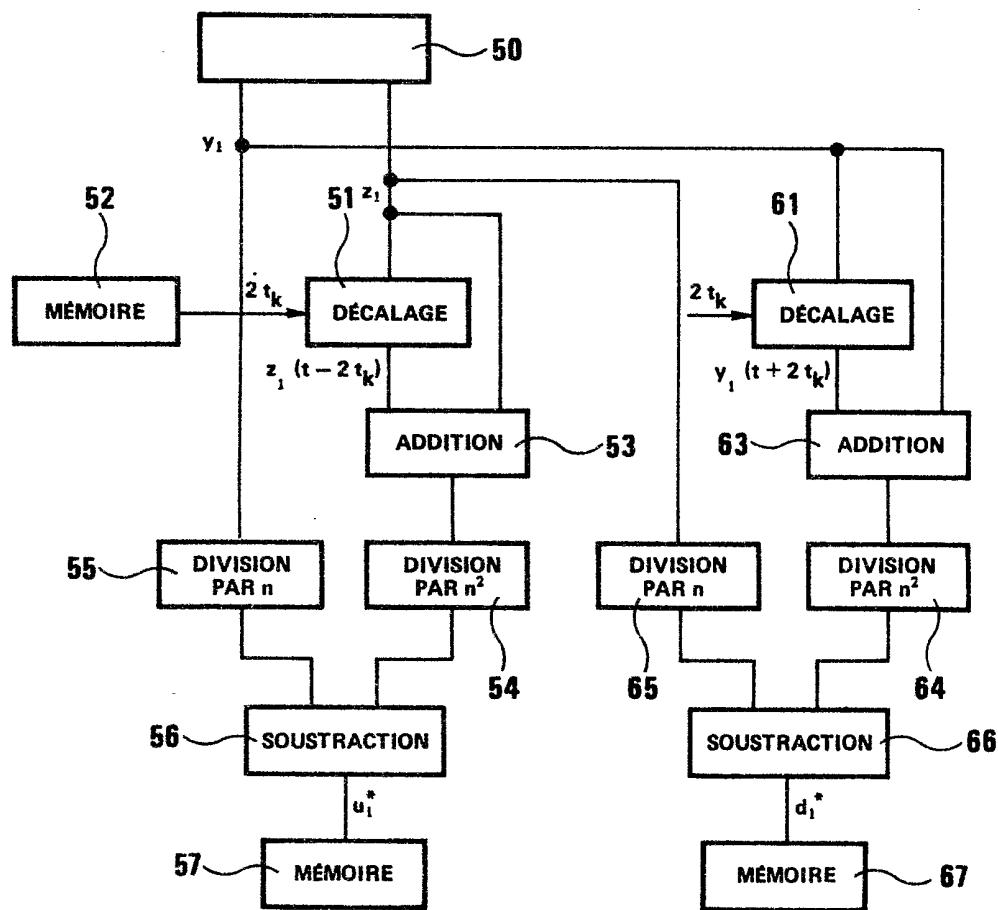


FIG.7