

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication :

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

2 471 611

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 79 30851

(54) Procédé et appareil de géophysique sismique avec traitement par foyers.

(51) Classification internationale (Int. Cl. 3). G 01 V 1/36.

(22) Date de dépôt 17 décembre 1979.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande B.O.P.I. — « Listes » n° 25 du 19-6-1981.

(71) Déposant : COMPAGNIE GENERALE DE GEOPHYSIQUE, société anonyme, résidant en France.

(72) Invention de : Robert Jean Garotta.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Cabinet Regimbeau, Corre, Martin et Schrimpf,
26, av. Kléber, 75116 Paris.

La présente invention concerne la prospection sismique du sous-sol.

Selon cette technique, on dispose sur le sol une série de capteurs sismiques, ainsi qu'une ou plusieurs sources d'ébranlements sismiques artificiels. Dans les 5 versions simples, capteurs et sources sont situés dans un même plan vertical ; ils peuvent être considérés comme sensiblement alignés, abstraction faite des inégalités du terrain, dont on sait d'ailleurs corriger les effets par la suite. La plupart du temps, les capteurs 10 et les sources sismiques sont de plus régulièrement distribués, souvent avec le même pas.

Sur le terrain, on excite successivement les différentes sources sismiques. A chaque fois, on enregistre sélectivement les différents signaux sismiques ou "traces" reçus par chacun des capteurs, du fait des ondes acoustiques produites par l'ébranlement. Chaque 15 trace correspond donc à un couple source-capteur.

En sismique dite "réflexion", on s'intéresse 20 aux réflexions des ondes acoustiques sur des "points-miroirs" du sous-sol. Pour cela, il est connu de combiner l'ensemble des traces pour lesquelles la source et le capteur sont symétriques par rapport à une verticale donnée, par exemple en additionnant toutes ces 25 traces. Les réflexions apparaissant dans la trace résultante indiquent des points-miroirs. Et une représentation

graphique convenable des traces résultantes associées aux différentes verticales permet au géophysicien de mieux comprendre la structure du sous-sol. Ce procédé de sismique réflexion, dit "à couverture multiple", recherche donc 5 les points-miroirs correspondant à la même profondeur dans les différentes traces recueillies.

La sismique réflexion avec couverture multiple a donné et donnera encore de précieuses informations sur le sous-sol. Il se trouve cependant que des "zones sourdes" apparaissent parfois, d'où résultent des incertitudes quant à l'interprétation du profil de certaines couches. 10 Plus généralement, si la sismique réflexion définit assez bien les interfaces fortement réfléchissantes, elle ne permet pas d'analyser en détail ce qui se passe dans les intervalles 15 entre interfaces du sous-sol (vitesse et absorption en particulier).

La présente invention cherche précisément à combler ces lacunes.

Le procédé proposé part des mêmes étapes de base que ceux de la technique antérieure : des capteurs 20 sismiques sont disposés sur le sol avec des sources d'ébranlements sismiques artificiels, capteurs et sources étant situés sensiblement dans un même plan vertical ; on excite une à une les sources sismiques tout en enregistrant sélectivement à chaque fois les signaux sismiques 25 ou "traces" reçus en fonction du temps par les différents capteurs, et liés aux ondes acoustiques induites dans le sous-sol par chacun des ébranlements ; ensuite, on effectue des corrections statiques et dynamiques de ces traces pour tenir compte du fait que capteurs et sources ne sont 30 pas disposés rigoureusement sur une même horizontale. S'il y a i sources et j capteurs, on dispose ainsi de i jeux de j traces, qui sont donc désignées individuellement 35 par s_{ij} .

La mise en oeuvre du procédé selon l'invention implique aussi que l'on dispose d'informations préalables

sur le sous-sol, en particulier sur ses couches réfléchissantes. Ces informations peuvent provenir d'études géologiques et/ou de sondages géophysiques de toutes sortes, sondages électriques par exemple. De préférence, 5 on effectue au préalable un traitement classique de sismique réflexion, à couverture multiple, telle que définie plus haut à partir des traces enregistrées et corrigées. En d'autres termes, ce traitement implique une combinaison (addition, le plus simplement) de traces 10 à point miroir commun.

Le procédé selon l'invention comprend, à partir des i jeux de j traces s_{ij} précités, les opérations ultérieures suivantes :

- a) choisir dans le sous-sol au moins deux points voisins, 15 dits foyers, au moins un interface réfléchissant, et une direction prédéterminée,
- b) sélectionner pour chaque foyer une trace sismique qui corresponde, compte-tenu de la réflexion sur l'interface, à un trajet de propagation passant par ce foyer et orienté suivant la direction prédéterminée,
- c) extraire de chaque trace ainsi sélectionnée une portion de trace qui contient l'effet dû à l'interface réfléchissant,
- d) comparer quantitativement l'une à l'autre les deux 25 portions de trace obtenues pour les deux foyers,
- e) répéter les opérations a à d en changeant à chaque fois la direction prédéterminée, et
- f) faire une moyenne des résultats de comparaisons effectuées pour des trajets d'ondes orientés suivant les différentes directions, ce qui permet d'accéder à des différences entre 30 les deux foyers sur le plan des propriétés sismiques.

Dans un mode de réalisation préférentiel, à l'opération c, les deux portions de traces sont définies à partir d'une même fenêtre temporelle ; l'opération d 35 comprend la détermination de la fonction de corrélation

entre les deux portions de traces ; et l'opération f comprend la sommation des fonctions de corrélations obtenues pour les différentes directions de trajet des ondes.

5 L'homme de l'art sait que l'on peut représenter les propriétés sismiques du sous-sol par différentes grandeurs. Parmi celles-ci, deux sont avantageuses pour la mise en oeuvre de l'invention : le temps, et l'énergie. Ainsi, il est avantageux de considérer, au pic de la
10 somme des fonctions de corrélation, l'une au moins des grandeurs suivantes : retard du pic à l'égard de l'origine des temps et amplitude du pic (liée à l'énergie réfléchie).

15 La différence entre les retards de pic relatifs à deux couples de deux foyers adjacents ayant un foyer en commun est liée à la différence des vitesses de propagation des ondes en ces points, tandis que la différence des amplitudes de pic est liée à la variation d'absorption des ondes qui existe lorsqu'on passe d'un couple de foyers au suivant.

20 De préférence, on effectue au niveau des traces sismiques initiales une correction de norme sur les sources et les capteurs, et, à l'opération d, on tient compte des variations du pouvoir réflecteur de l'interface, lorsque l'on passe de l'un à l'autre foyer. Cela est important en particulier lorsque l'on s'intéresse à
25 l'amplitude des traces.

30 Dans un mode de réalisation particulier, on définit par des relations simples les trajets de propagation. Ici, e_i désigne les abscisses des différentes sources, r_j celles des différents capteurs, p , le pas, commun, entre sources et entre capteurs, et h la profondeur de l'interface réfléchissant, supposé horizontal, tandis que x_o et y_o sont les coordonnées d'un foyer. L'opération b comprend la recherche de traces associées à un couple source (e_i) - capteur (r_j) tel que :

$$35 \quad 2h x_o = y_o \cdot r_j + (2h - y_o) e_i$$

L'orientation de chaque trace est donnée par la grandeur

$$\frac{x_o - e_i}{y_o} = \cotg \alpha$$

et les relations ci-dessus sont satisfaites sensiblement
5 à $p/2$ près. On tient compte, le cas échéant, d'une cor-
rection de pendage prenant en considération l'inclinaison
de l'interface réfléchissant sur l'horizontale.

Jusqu'à présent, on n'a considéré qu'un seul
10 interface réfléchissant, qui est de préférence une couche
fortement réfléchissante plus profonde que les foyers.
Dans la réalité, une telle situation est assez fréquente,
mais il est également très courant que le sous-sol com-
porte plusieurs interfaces moyennement réfléchissantes,
dont certains sont au-dessus des foyers. L'invention
15 s'applique également à pareille situation.

Dans ce cas, à l'opération a, on choisit plu-
sieurs interfaces réfléchissantes (tous ceux qui existent
ou bien une partie d'entre eux seulement). A l'opération
b, on sélectionne une trace pour chaque foyer, chaque
20 orientation de trajet de propagation, et chaque interface
réfléchissant. Et l'opération de comparaison d porte sur
les différents groupes de deux traces qui sont associées
respectivement aux deux foyers, tout en correspondant à
la même orientation et au même interface réfléchissant.

25 Ce processus fait donc intervenir une comparai-
son de deux portions de trace homologues non seulement
pour chaque orientation du trajet des ondes, mais aussi
pour chacun des interfaces réfléchissantes retenus. Dans
la pratique, il est souvent plus avantageux de regrouper
30 les portions de traces relatives à différentes réflexions
et à la même orientation, si bien que l'opération c fait
alors usage de portions de traces constituant une succes-
sion continue d'effets de réflexion. Cette opération c
comporte alors en outre la synthèse d'une trace sismique
35 composite associée à chaque foyer et à chaque orientation

-6-

de trajet de propagation, à partir de portions extraites dans les différentes traces, relativement aux divers interfaces réfléchissants.

5 Dans une mise en oeuvre particulière du procédé avec interfaces multiples, à l'opération b, pour chaque source e_i , et sous réserve d'une correction de pendage, on explore les traces de l'ensemble des capteurs r_j , avec j variant de 1 à n ; dans chaque trace, on prélève, autour d'un temps t_{ij} , une section définie par une fenêtre temporelle f_i , avec t_{ij} défini par

10

$$y_o (r_j - e_i) = (x_o - e_i) \cdot 2 \cdot v \cdot t_{ij} \cdot \sin \alpha$$

15 où v désigne la vitesse de propagation moyenne dans le sous-sol, tandis que x_o et y_o sont les coordonnées d'un foyer, et avec f_i définie par

$$f_i = p \cdot \frac{y_o}{x_o - e_i} \cdot \frac{1}{2v \sin \alpha}$$

20 où p est le pas commun entre sources et entre capteurs, tandis qu'ensuite on réunit pour chaque foyer et chaque orientation

$$\frac{x_o - e_i}{y_o} = \cot \alpha$$

25

l'ensemble des sections de traces, lesquelles se trouvent temporellement adjacentes les unes aux autres.

30 Dans le procédé à interfaces multiples, les opérations d'évaluation se déroulent de préférence comme suit :

- l'opération d de comparaison comporte la détermination d'une fonction de corrélation amont entre les portions de traces homologues correspondant à la même orientation, aux deux foyers, et à des temps antérieurs au passage des ondes à chaque foyer, et la détermination d'une fonction de

35

corrélation aval entre les portions de traces homologues correspondant à la même orientation, aux deux foyers, et à des temps postérieurs au passage des ondes à chaque foyer, et

- 5 - l'opération f comprend la détermination pour chaque foyer d'une part d'une première somme amont qui fait intervenir les fonctions de corrélations amont pour les différentes orientations, et d'autre part d'une seconde somme aval qui fait intervenir les fonctions 10 de corrélations aval pour les différentes orientations.

Le cas échéant, on effectue une correction tenant compte de l'effet de la disharmonie entre les interfaces situés au-dessus des foyers et ceux situés au-dessous.

- 15 Fondamentalement, le procédé de l'invention propose une comparaison des propriétés sismiques de deux points voisins ou foyers, ainsi nommés car on leur associe une collection de traces associées à des trajets d'ondes sismiques qui les rencontrent selon différentes directions. Cependant, le procédé proposé donne sa pleine 20 mesure lorsque l'on considère un nombre assez élevé de foyers (100 par exemple) répartis sur une ligne ou dans un domaine du sous-sol à étudier, de préférence avec un pas égal au pas commun p entre les sources, et 25 entre les capteurs. Dans le cas d'une ligne de foyers, celle-ci peut être définie par un niveau géologique à étudier -interface réfléchissant, notamment- où l'on recherche la vitesse et l'absorption des ondes sismiques. Si la ligne de foyers coïncide avec un interface réflé- 30 chissant, l'invention permet de dresser un bilan énergétique le long de cet interface, puisque l'énergie absorbée est égale à l'énergie incidente diminuée de l'énergie transmise et de l'énergie réfléchie.

- 35 D'un autre côté, des foyers convenablement répartis dans un domaine du sous-sol qui correspond à

une zone sourde en sismique réflexion classique permettant d'étudier mieux cette zone sourde. Plus généralement, le procédé de l'invention procure une bien meilleure résolution que ceux de la technique antérieure.

5 L'invention concerne également les appareils, analogiques ou numériques, destinés à la mise en oeuvre des opérations caractéristiques de l'invention.

10 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui va suivre, faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

15 - la figure 1 illustre un premier exemple de mise en oeuvre du procédé selon l'invention, dans le cas où l'on ne considère dans le sous-sol qu'un seul interface réfléchissant profond ;

20 - les figures 2a et 2b illustrent comment l'on extrait deux portions de traces, à l'intérieur d'une fenêtre f, dans deux traces passant par deux foyers adjacents F et F', et correspondant à une même orientation de la propagation des ondes, tandis que la figure 2c illustre la corrélation entre les deux portions de traces ainsi extraites ;

25 - la figure 3 illustre la somme de fonctions de corrélation obtenues pour les différentes orientations de propagation des ondes ;

- les figures 4 et 5 illustrent deux exemples de l'appareillage utilisable pour la mise en oeuvre du procédé selon l'invention, sous forme de schémas fonctionnels ;

30 - la figure 6 illustre la base d'un second mode de mise en oeuvre du procédé selon l'invention, dans le cas où l'on considère dans le sous-sol plusieurs interfaces réfléchissantes ;

35 - les figures 7a et 7b illustrent deux exemples de traces composites obtenues par adjonction de différentes

5 portions de traces relatives à la même orientation de propagation des ondes, et à des réflexions sur les différents interfaces, tandis que les figures 7c et 7d illustrent comment l'on détermine une fonction de corrélation amont et une fonction de corrélation aval à l'aide de traces sismiques du type illustré sur les figures 7a et 7b ; et

10 - les figures 8a et 8b illustrent à titre d'exemple la forme des sommes des fonctions de corrélation amont ainsi que des fonctions de corrélation aval.

15 La figure 1 illustre un sous-sol comportant un interface réfléchissant unique ou "horizon" H , horizontal, situé à la profondeur h . Sur le sol horizontal, qui définit l'ordonnée zéro, on note e_i et r_j les abscisses des sources E_i et capteurs R_j . La distance inter-sources est la même qu'entre les capteurs et notée p . Lorsque l'on crée un ébranlement au niveau de la source E_i , le capteur R_j reçoit la trace sismique s_{ij} .
20 De manière connue, les traces font l'objet de corrections statiques et dynamiques, de façon que l'on puisse se ramener à un sol horizontal d'ordonnée zéro, en faisant abstraction des inégalités du terrain.

25 L'invention considère des trajets d'ondes sismiques qui passent selon diverses directions par des foyers tels que F . (Bien que les ondes sismiques se propagent en volume, il est usuel de leur associer un axe ou trajet de propagation).

30 Un trajet d'ondes entre E_i et R_j , après réflexion au point-miroir M de profondeur h , peut être quantifié par un paramètre a , qui varie de zéro à un entre E_i et R_j . Si x et y sont les coordonnées d'un point sur le trajet $E_i M R_j$, on a :

$$35 \quad a = \frac{y}{2h} \quad \text{entre } E_i \text{ et } M \quad (I)$$

-10-

ou $a = 1 - \frac{y}{2h}$ entre M et R_j (II)

et $x = a r_j + (1 - a) e_i$ (III)

5 Selon l'invention, on choisit un foyer F de coordonnées x_o et y_o (unité 12, figures 4 et 5), et un horizon réfléchissant à la profondeur h (unité 11), ainsi qu'une direction (qui changera, dans une pluralité de valeurs possibles). La condition pour que le foyer F se situe sur la partie $E_i M$ d'un trajet d'ondes s'obtient en éliminant a entre les relations (I) et (III), et s'écrit :

$$2h \cdot x_o = y_o \cdot r_j + (2h - y_o) e_i \quad (IV)$$

Et la direction ou orientation de ce trajet d'ondes est représentée par la grandeur

$$\frac{x_o - e_i}{y_o} = \cotg \alpha \quad (V)$$

15 En variante, on peut mettre chaque foyer sur une partie telle que MR_j du trajet d'ondes, et la condition s'écrit alors :

$$2h \cdot x_o = y_o \cdot e_i + (2h - y_o) r_j \quad (VI)$$

20 La direction est définie par la pente de MR_j , ou encore par référence à l'angle α de l'équation (V).

25 A un foyer, un horizon réfléchissant, et une direction pré-déterminée, on sait donc faire correspondre un couple $E_i - R_j$, et une trace s_{ij} (unité de calcul 14, qui détermine par exemple des adresses dans l'enregistrement 15 de toutes les traces sismiques). Selon la figure 4, l'unité 10 définit un paramètre de direction, qu'elle pourra incrémenter sur commande, et qui est transmis à l'unité de calcul 14. D'après les relations ci-dessus, cette dernière peut alors sélectionner une trace particulière en 15, en faisant le cas échéant une approximation entre la direction choisie en 10 et celle donnée par la relation (V) ci-dessus.

30 Plus généralement, en balayant l'ensemble des traces s_{ij} , on trouvera un sous-ensemble de traces qui 35 correspondent à des trajets passant par le foyer F

suivant différentes directions, en se réfléchissant sur l'horizon H. Dans chacune de ces traces, on verra une réflexion due à un point-miroir tel que M.

La figure 5 illustre une variante de ce genre : 5 à partir d'un choix de foyer (12) et d'interface (11), l'unité 24 calcule les adresses de ce sous-ensemble de traces en 15, ainsi que les orientations associées.

Dans la pratique, il arrive souvent que l'horizon réfléchissant ne soit pas rectiligne. Chaque fois 10 que son inclinaison sur l'horizontale dépasse un seuil préétabli, il est préférable d'effectuer à l'aide de l'unité 14 ou 24 une correction de pendage, qui fait intervenir dans les relations ci-dessus des fonctions trigonométriques de l'inclinaison θ de l'horizon au 15 point-miroir M, ou des approximations de ces fonctions trigonométriques à l'aide de leur développement en série, étant observé que la perpendiculaire à l'horizon au point M demeure la bissectrice de l'angle $E_i M R_j$.

L'invention fait ainsi intervenir une série 20 de foyers placés par exemple sur une ligne J ; sur la figure 1 sont illustrés deux foyers F et F'. Comme pour le premier, au second foyer F', à l'horizon H, et à la direction prédéterminée (D), on fait correspondre (unités 14 ou 24) un autre couple source-capteur, 25 compte tenu des relations ci-dessus, par exemple le couple $E_i + l, R_j + l$, auquel est associée la trace $s_{i+l, j+l}$.

Comme le montrent les figures 2a et 2b, on extrait des portions des deux traces sélectionnées 30 s_{ij} et $s_{i+l, j+l}$, pendant une fenêtre f de calage temporel choisi à l'avance quant à son point de départ et sa durée (mémoires échantillonneuses 16 et 17).

Ensuite, on compare l'une à l'autre les deux portions de trace obtenues, avantageusement en déterminant la fonction de corrélation entre ces portions 35

-12-

(unité 18) ; l'allure d'une telle fonction est illustrée sur la figure 2c.

On répète ensuite les mêmes opérations pour les différents foyers tels F et F' , avec le même horizon réfléchissant H , et une direction différente (D_2) au lieu de (D_1). A cet effet, la fin de la corrélation en 18 incrémenté le paramètre de direction donné par l'unité 10. La sélection donne alors d'autres couples sources-capteurs : $E_i + 1 - M_2 - R_j - 1$ et
 10 $E_i + 2 - M'_2 - R_j - m + 1$ par exemple, d'où les traces $s_{i+1, j-1}$ ainsi que $s_{i+2, j-m+1}$. De ces traces on extrait aussi deux portions correspondant à une même fenêtre temporelle ; on peut faire correspondre une fenêtre temporelle, particulière à chaque direction (liaison entre l'unité 14 et les mémoires 16 et 17), ou bien choisir une fenêtre temporelle générale, suffisamment grande pour inclure la réflexion quelle que soit l'orientation. Et l'on détermine là encore la fonction de corrélation entre ces deux portions de trace.

20 Ces opérations sont renouvelées pour d'autres orientations encore. Autant que possible, on utilise l'ensemble des orientations disponibles pour chaque foyer à l'aide des traces s_{ij} . A chaque fois, on obtient une nouvelle fonction de corrélation.

25 Finalement, l'unité 19 (figures 4 et 5) fait la somme des fonctions de corrélation obtenues pour les différentes directions de trajet des ondes (figure 3).

30 Chacune des fonctions de corrélation individuelles comporte un pic, qui peut être défini par son temps et son amplitude ; de même, la somme des fonctions de corrélation va comporter un pic associé à un temps et une amplitude.

35 La demanderesse a observé que l'écart temporel entre le pic de la somme des fonctions de corrélation

et l'origine des temps est représentatif de la variation du temps de parcours des ondes, lorsque l'on passe de F en F' . Si cette variation est positive, le terrain au voisinage du foyer F' est plus "lent" que le terrain au voisinage du foyer F , la lenteur s'entendant ici pour la propagation des ondes sismiques. Inversement, si la variation est négative, le terrain en F' est plus rapide qu'en F .

10 L'amplitude du pic de la somme des fonctions de corrélation est liée à l'énergie portée par les ondes sismiques passant suivant les différents trajets pris en compte. C'est-à-dire qu'elle peut être considérée comme représentative de l'énergie moyenne passant par les deux foyers concernés, ici F et F' .

15 On peut donc affecter l'amplitude de pic de la somme des corrélations à un point situé entre les foyers F et F' , en leur milieu par exemple. La répétition de cette opération sur un grand nombre de foyers permet de construire de proche en proche la 20 courbe de l'énergie relative le long de la ligne (J) des foyers (figure 1). Avec un pas d'échantillonnage suffisamment fin, on obtient ainsi des informations sur la distribution de l'énergie sismique le long de la ligne J , sans qu'il ne soit nécessaire d'évaluer 25 l'énergie passant en chacun des foyers F et F' .

30 A cet effet, il est préférable d'effectuer une correction de norme sur les sources et les capteurs, de manière à tenir compte de leurs réponses individuelles ; avantageusement, on tient également compte des variations du pouvoir réflecteur de l'interface réfléchissant H , telles qu'on les connaît par exemple sur la base du traitement préliminaire classique, en sismique réflexion à couverture multiple.

35 On remarquera par ailleurs que la distribution de l'énergie sismique le long de la ligne des foyers (J)

est liée à la variation d'absorption des ondes sismiques qui se manifeste le long de cette ligne (J).

Dans ce qui précède, on a admis que l'on choisissait deux foyers, un interface réfléchissant et une direction prédéterminée, pour sélectionner deux traces, en extraire deux portions respectives, construire la corrélation de celles-ci, et recommencer en changeant la direction prédéterminée.

Bien entendu, on peut avoir avantage dans la pratique à regrouper différemment les opérations, et par exemple, se donnant les foyers et l'interface réfléchissant :

- rechercher toutes les traces correspondant à un passage par chaque foyer avec réflexion sur l'interface, en associant à chacune d'elle une orientation ou direction (unité 24, figure 5),
- extraire de chaque trace une portion utile contenant la "réflexion", à l'aide d'une fenêtre qui peut ou non dépendre de l'orientation, (mémoires échantillon-20 neuses 26 et 27 avec un emplacement de mémoire pour chaque orientation),
- pour chaque orientation, construire la corrélation (18) de deux portions de trace relative à deux foyers adjacents (de proche en proche s'il y a plus de deux foyers choisis), et
- construire (19) la somme des fonctions de corrélation associées à deux foyers adjacents pour chacune des orientations (et ceci pour l'ensemble des foyers initialement choisis).

Dans ce cas, les opérations sont avantageusement coordonnées par une unité de commande 20, laquelle peut être incorporée à l'unité de calcul 24. Les éléments 15 à 19 ainsi que 26 et 27 peuvent être analogiques (mémoires à bande magnétique par exemple). Ils seront de préférence numériques, à l'image des enregistrements

magnétiques effectués sur le terrain, et l'ensemble du traitement peut alors être effectué dans un ordinateur.

Jusqu'à présent, un seul interface a été pris en considération dans le sous-sol, au-dessous de la ligne 5 ou du domaine des foyers. Une telle situation peut se ren-contrer en fait, tout au moins sous la forme d'un inter-face profond dont les propriétés réfléchissantes éclipsent largement celles des autres interfaces surjacentes. Mais il est fréquent de rencontrer plusieurs interfaces réflé-10 chissantes comparables, certains situés au-dessous des foyers et les autres au-dessus. On décrira maintenant comment l'invention peut se généraliser à ces cas.

Globalement, on prend en compte tout ou partie des 15 interfaces réfléchissants existants. Et à chaque foyer et chaque direction, on fait correspondre non plus un seul couple source-capteur, mais l'ensemble des couples source-capteur correspondant à des trajets passant par le foyer dans la direction choisie, avec des réflexions sur les dif-20 férents interfaces. La figure 6 le montre, sur un seul foyer F pour simplifier le dessin. Cinq interfaces réfléchissants, tous horizontaux, sont représentés, A cause de leur paral-lélisme, on aura une source commune E_i pour les différentes 25 réflexions possibles, alors que le capteur change avec l'interface réfléchissant $(R_{j-m}, R_{j-n}, R_{j+q}, R_{j+r})$. Chacun des couples source-capteur ainsi définis correspond à un même foyer, à une même direction et à l'un des interfaces réfléchissants. Comme précédemment, on peut en va-riante placer le foyer sur la partie remontante commune à 30 des trajets d'onde réfléchis par différents horizons-miroirs.

On peut alors, comme précédemment, déterminer 35 la fonction de corrélation de deux portions de trace correspondant à deux foyers adjacents pour la même direction de propagation des ondes et des réflexions de celles-ci sur le même interface, puis faire la somme des diverses fonctions de corrélation obtenues lorsque

l'on change la direction de propagation. Il en résulte alors une somme de corrélations pour chaque paire de foyers adjacents et chaque interface. Et l'on peut interpréter la somme de corrélations affectée à chaque 5 interface comme cela a été décrit plus haut à propos d'un interface unique.

En rapprochant alors, pour chaque paire de foyers, les données obtenues au niveau des différents interfaces, il devient possible de suivre, en fonction 10 de la profondeur (interfaces successifs) :

- l'évolution des variations de vitesse de propagation entre les deux foyers ;
- l'évolution de l'énergie moyenne passant au voisinage de la paire de foyers.

15 Particulièrement intéressante est la distinction entre ce qui se passe en amont des foyers (interfaces situés au-dessus d'eux) et ce qui se passe en aval des foyers (interfaces plus profonds que ceux-ci).

20 A cet effet, l'invention préconise une mise en œuvre très avantageuse, où l'on considère dans une succession continue les effets de réflexion rencontrés sur les différents interfaces. De préférence, on synthétise pour cela, à partir des portions de traces qui 25 correspondent aux différents interfaces (même foyer, même direction de propagation), une trace sismique composite qui regroupe séquentiellement les différents effets de réflexion, en respectant leur situation temporelle et la continuité du temps.

30 Dans un mode de réalisation particulier simple, on opère comme suit (voir figure 6) :

- a) comme précédemment, on choisit au moins deux foyers (tels que F), une direction de propagation (D), et cette fois plusieurs interfaces;
- b) on associe à chaque foyer, à la direction, et à chaque 35 interface, une trace sismique s_{ij} (correspondant à

un couple source E_i - capteur R_j , en tenant compte du pendage des horizons réfléchissants, le cas échéant) ;

- 5 c) dans chaque trace, on préleve autour d'un temps t_{ij} , une portion définie par une fenêtre temporelle f_i , avec t_{ij} défini par

$$y_o (r_j - e_i) = (x_o - e_i) 2 \cdot v \cdot t_{ij} \cdot \sin \kappa \quad (\text{VII})$$

- 10 x_o et y_o sont les coordonnées du foyer et v désigne la vitesse de propagation moyenne dans le sous-sol (ou la vitesse au voisinage du foyer concerné, si on la connaît par ailleurs), tandis que f_i est définie par

15

$$f_i = p \cdot \frac{y_o}{x_o - e_i} \cdot \frac{1}{2v \sin \kappa} \quad (\text{VIII})$$

où p désigne le pas, supposé commun entre les sources et entre les capteurs. ;

- 20 après quoi l'on peut réunir en une trace composite, associée au foyer et à l'orientation choisie, l'ensemble de ces portions de traces, étant observé qu'elles sont temporellement adjacentes les unes aux autres (figure 7a).

- 25 La distinction entre ce qui se passe en amont et en aval des foyers peut se faire alors de manière très simple, le procédé se poursuivant comme suit, à l'aide d'une autre trace composite (figure 7b) relative à un foyer F' voisin du premier :

- 30 d) on détermine une fonction de corrélation amont (figure 7c) entre les parties des traces composites de deux foyers adjacents (même direction de propagation) situées dans une fenêtre amont, pour les temps inférieurs à y_o/v , ainsi qu'une fonction de corrélation aval (figure 7d) entre les parties des mêmes

traces composites qui sont situées dans une fenêtre aval pour les temps supérieurs à y_0/V . La limite supérieure de la fenêtre aval peut être définie d'après la couche réfléchissante la plus profonde.

- 5 e) comme dans le cas d'un interface réfléchissant unique, on recommence pour différentes directions de propagation passant par les deux foyers adjacents.
- 10 f) on somme enfin séparément les fonctions de corrélation amont (figure 8a) et les fonctions de corrélation aval (figure 8b) obtenues pour les différentes directions de propagation des ondes passant par les deux foyers adjacents.

La distance entre les pics des sommes de corrélation reflète la variation du temps de trajet passant par le foyer F ou le foyer F'. Dans le cas d'une tectonique non concordante, il peut y avoir une disharmonie entre la distribution des interfaces réfléchissantes situées au dessus des foyers et celle des interfaces situées au-dessous. Cette disharmonie est mesurée sur une coupe sismique conventionnelle, en couverture multiple par exemple. Il est aisé d'en déterminer l'effet sur les corrélations, et, par une correction de temps, de retrancher cet effet de l'écart temporel entre les pics de corrélation.

25 De plus, comme dans le cas d'un interface réfléchissant unique, l'amplitude des pics des sommes de corrélation permet d'apprécier l'évolution de l'énergie absorbée lorsque l'on passe de F à F'.

30 A cet effet, on détermine de préférence le rapport entre l'amplitude du pic de la somme des corrélations amont et l'amplitude du pic de la somme des corrélations aval, pour chaque paire de foyers. L'observation de l'évolution de ce rapport le long de la ligne des foyers (ou à l'intérieur du domaine couvert par les foyers) donne accès à l'évolution de l'énergie absorbée.

35 L'invention s'applique tout particulièrement lorsque la ligne des foyers coïncide sensiblement avec

un interface réfléchissant : la somme des corrélations amont correspond à l'énergie incidente ; la somme des corrélations aval correspond à l'énergie transmise ; de son côté, l'énergie réfléchie peut être déterminée 5 en prenant les traces qui correspondent à des trajets à point miroir commun situé au voisinage du foyer (traitement sismique du type classique à couverture multiple). Et l'on peut alors faire un bilan énergétique le long de la ligne des foyers, car l'énergie absorbée 10 est égale à l'énergie incidente diminuée des énergies transmise et réfléchie.

L'invention permet ainsi une analyse du sous-sol à haute résolution au niveau des foyers choisis. Comme le sait l'homme de l'art, on peut bien entendu 15 affiner cette analyse en procédant par approximations successives, le procédé étant répété avec à chaque fois une précision croissante sur des paramètres déterminés au cours d'étapes précédentes :

- corrections plus précises sur le pendage, la disharmonie ou le pouvoir réfléchissant des interfaces ;
- définition plus précise de la vitesse de propagation des ondes, ou bien prise en considération de propagations non rectilignes à cause d'effets de réfraction, par exemple.

25 L'invention s'applique dans tous les domaines où la prospection géophysique est utile, et notamment au cas suivant : on cherche à effectuer souvent une "réécupération assistée" dans les réservoirs (huile par exemple) en y réalisant une injection d'eau ; l'invention permet de suivre avec précision l'évolution 30 du fluide au cours de telles opérations.

35 A cet effet, les grandeurs finalement issues du procédé selon l'invention feront l'objet d'une représentation graphique convenable le long de la ligne des foyers ou à l'intérieur du domaine des foyers.

REVENDEICATIONS

- 1) Procédé de prospection sismique du sous-sol, du type dans lequel des capteurs sismiques sont disposés sur le sol avec des sources d'ébranlements sismiques artificiels, capteurs et sources étant situés sensiblement dans un même plan vertical, dans lequel on excite une à une les sources sismiques tout en enregistrant sélectivement à chaque fois les signaux sismiques ou "traces" reçus en fonction du temps par les différents capteurs, et liés aux ondes acoustiques induites dans le sous-sol par chacun des ébranlements, et dans lequel on effectue ensuite des corrections statiques et dynamiques de ces traces pour tenir compte du fait que capteurs et sources ne sont pas situés rigoureusement sur une même horizontale,
- caractérisé par les opérations ultérieures suivantes :
- a) choisir dans le sous-sol au moins deux points voisins, dits foyers, au moins un interface réfléchissant, et une direction prédéterminée,
 - b) sélectionner pour chaque foyer une trace sismique qui corresponde, compte-tenu de la réflexion sur l'interface, à un trajet de propagation passant par ce foyer et orienté suivant la direction prédéterminée,
 - c) extraire de chaque trace ainsi sélectionnée une portion de trace qui contient l'effet du à l'interface réfléchissant,
 - d) comparer quantitativement l'une à l'autre les deux portions de trace obtenues pour les deux foyers,
 - e) répéter les opérations a à d en changeant à chaque fois la direction prédéterminée, et
 - f) faire une moyenne des résultats de comparaisons effectuées pour des trajets d'ondes orientés suivant les différentes directions, ce qui permet d'accéder à des différences entre les deux foyers sur le plan des propriétés sismiques.

- 2) Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait qu'à l'opération c, les deux portions de traces sont définies à partir d'une même fenêtre temporelle, que l'opération d comprend la détermination de la fonction de corrélation entre les deux portions de traces, et que l'opération f comprend la sommation des fonctions de corrélations obtenues pour les différentes directions de trajet des ondes.
- 3) Procédé selon la revendication 2, caractérisé par le fait que l'on considère, au pic de la somme des fonctions de corrélation, l'une au moins des grandeurs suivantes : retard du pic à l'égard de l'origine des temps et amplitude du pic, la différence entre les retards de pic relatifs à deux couples de deux foyers adjacents ayant un foyer en commun étant liée à la différence des vitesses de propagation des ondes en ces points tandis que la différence des amplitudes de pic est liée à la variation d'absorption des ondes qui existe lorsqu'on passe d'un couple de foyers au suivant.
- 4) Procédé selon la revendication 3, caractérisé par le fait que l'on effectue au niveau des traces sismiques initiales une correction de norme sur les sources et les capteurs, et qu'à l'opération d, on tient compte des variations du pouvoir réflecteur de l'interface, lorsque l'on passe de l'un à l'autre foyer.
- 5) Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé par le fait que, e_i désignant les abscisses des différentes sources, r_j celles des différents capteurs, p , le pas, commun, entre sources et entre capteurs, et h la profondeur de l'interface réfléchissant, supposé horizontal, tandis que x_o et y_o sont les coordonnées d'un foyer, l'opération b comprend la recherche de traces associées à un couple source (e_i) - capteur (r_j) tel que :
- 35
$$2h x_o = y_o \cdot r_j + (2h - y_o) e_i$$

l'orientation de chaque trace étant donnée par la grandeur

$$\frac{x_o - e_i}{y_o} \cdot \cot \alpha$$

5 et la relation ci-dessus étant satisfaita sensiblement
à $\frac{p}{2}$ près, compte tenu, le cas échéant, d'une correction
de pendage prenant en considération l'inclinaison de
l'interface réfléchissant sur l'horizontale.

10 6) Procédé selon l'une des revendications 1 à
5, caractérisé par le fait qu'à l'opération a, on choisit
plusieurs interfaces réfléchissantes, qu'à l'opération b,
on sélectionne une trace pour chaque foyer, chaque orien-
tation de trajet de propagation, et chaque interface réflé-
chissant, et que l'opération de comparaison d porte sur
15 les différents groupes de deux traces qui sont associées
respectivement aux deux foyers, tout en correspondant à
la même orientation et au même interface réfléchissant.

7) Procédé selon la revendication 6, caracté-
risé par le fait que l'opération c fait usage d'une suc-
20 cession continue d'effets de réflexion, et qu'elle com-
porte en outre la synthèse d'une trace sismique composite
associée à chaque foyer et à chaque orientation de trajet
de propagation, à partir des portions extraites dans les
différentes traces, relativement aux divers interfaces
25 réfléchissantes.

8) Procédé selon la revendication 7, caracté-
risé par le fait qu'à l'opération b, pour chaque source
e_i, et sous réserve d'une correction de pendage, on explo-
re les traces de l'ensemble des capteurs r_j, avec j variant
30 de 1 à n, que dans chaque trace, on prélève, autour d'un
temps t_{ij}, une portion définie par une fenêtre temporelle
f_i, avec t_{ij} défini par

$$y_o (r_j - e_i) = (x_o - e_i) \cdot 2 \cdot v \cdot t_{ij} \cdot \sin \alpha$$

où V désigne la vitesse de propagation moyenne dans le sous-sol, tandis que x_o et y_o sont les coordonnées d'un foyer, et avec f_i définie par

$$5 \quad f_i = p \frac{y_o}{x_o - e_i} \cdot \frac{1}{2V \sin \alpha}$$

où p est le pas commun entre sources et entre capteurs, tandis qu'ensuite on réunit pour chaque foyer et chaque orientation

$$10 \quad \frac{x_o - e_i}{y_o} = \cotg \alpha$$

l'ensemble des portions de traces, lesquelles se trouvent temporellement adjacentes les unes aux autres.

15 9) Procédé selon l'une des revendications 6 à 8, caractérisé par le fait que l'opération d de comparaison comporte la détermination d'une fonction de corrélation amont entre les portions de traces homologues correspondant à la même orientation, aux deux foyers, et à des
 20 temps antérieurs au passage des ondes à chaque foyer, et la détermination d'une fonction de corrélation aval entre les portions de traces homologues correspondant à la même orientation, aux deux foyers, et à des temps postérieurs au passage des ondes à chaque foyer, et que l'opération f comprend la
 25 détermination pour chaque foyer d'une part d'une première somme amont qui fait intervenir les fonctions de corrélations amont pour les différentes orientations, et d'autre part d'une seconde somme aval qui fait intervenir les fonctions de corrélations aval pour les différentes orientations.

30 10) Procédé selon la revendication 9, caractérisé par le fait que l'on effectue une correction tenant compte de l'effet de la sharmonie entre les interfaces situés au dessus des foyers et ceux situés au dessous.

35 11) Procédé selon l'une des revendications 1 à

10, caractérisé par le fait que l'on utilise une pluralité de foyers répartis sur une ligne ou dans un domaine du sous-sol à étudier, de préférence avec un pas égal au pas commun entre les sources et les capteurs.

5 12) Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé par le fait qu'avant l'opération a, on effectue un traitement sismique préliminaire par combinaison de traces à points-miroirs commun, afin de déterminer le ou les interfaces réfléchissantes du sous-sol.

10 13) Appareillage électronique analogique ou numérique agencé pour la mise en oeuvre des opérations caractéristiques du procédé selon l'une des revendications précédentes.

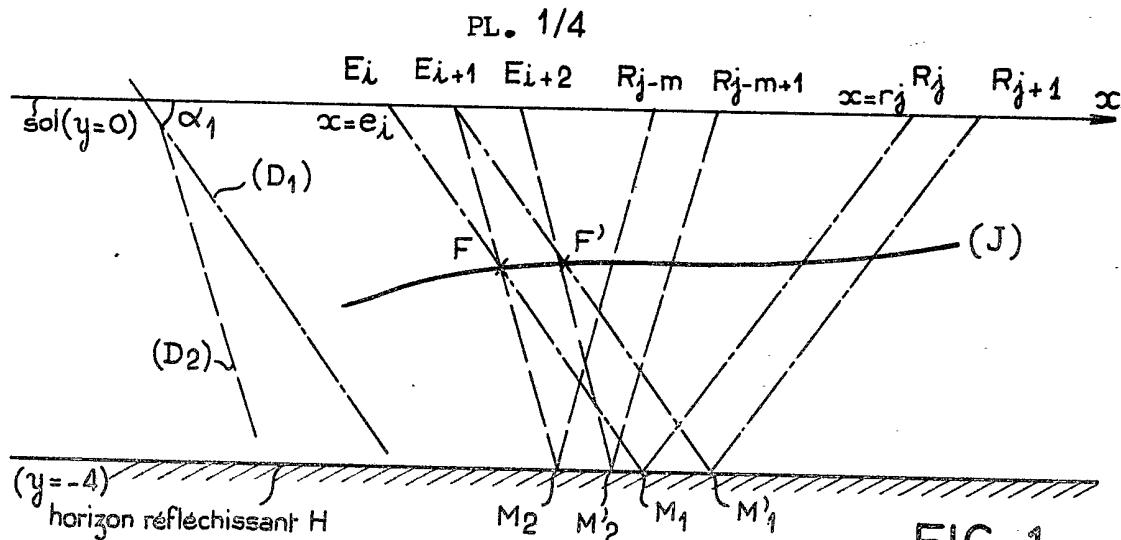


FIG. 1

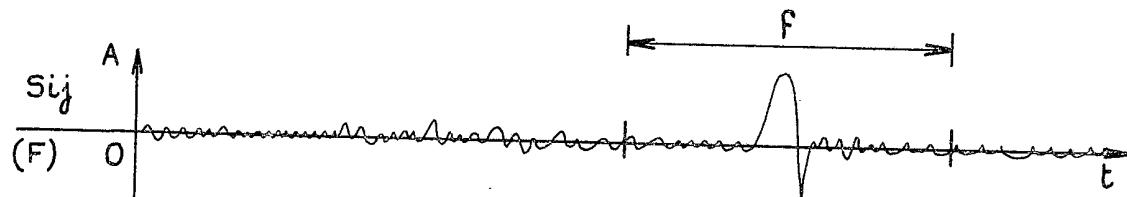


FIG. 2a

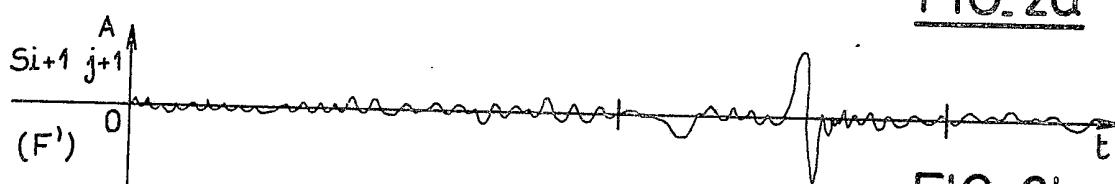


FIG. 2b

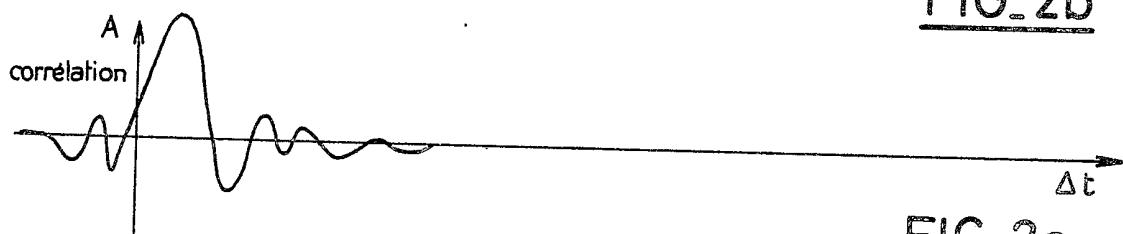


FIG. 2c

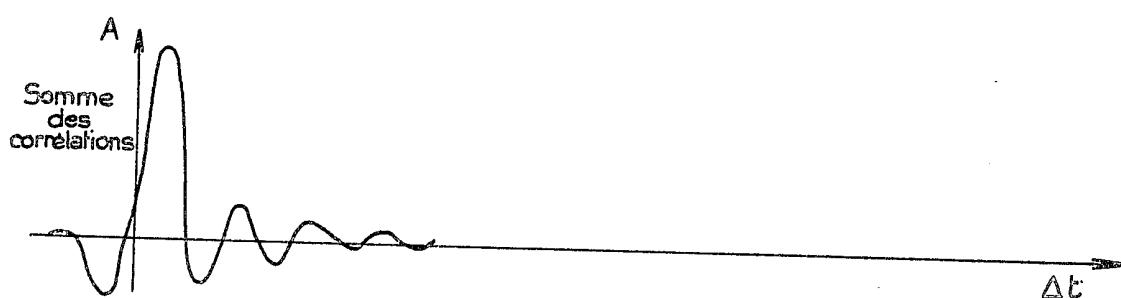
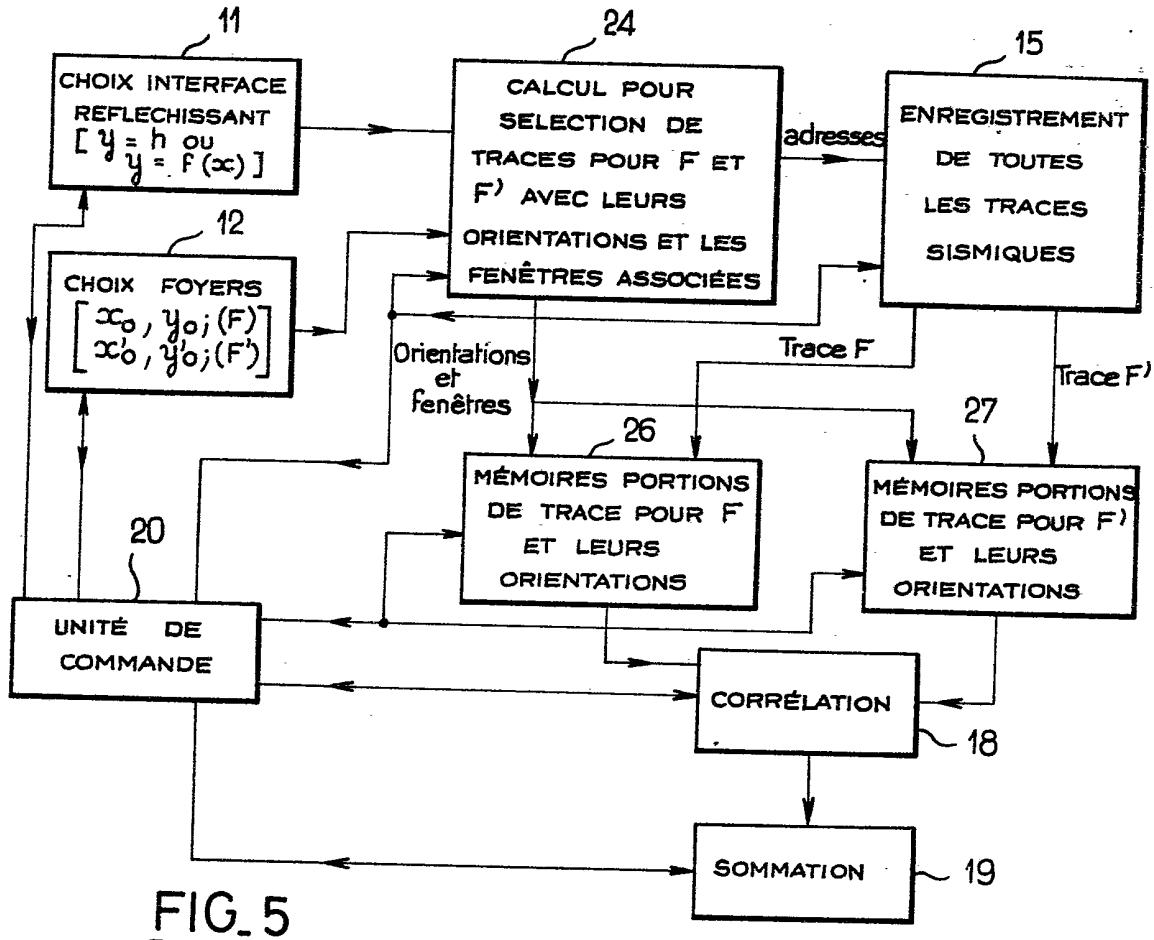
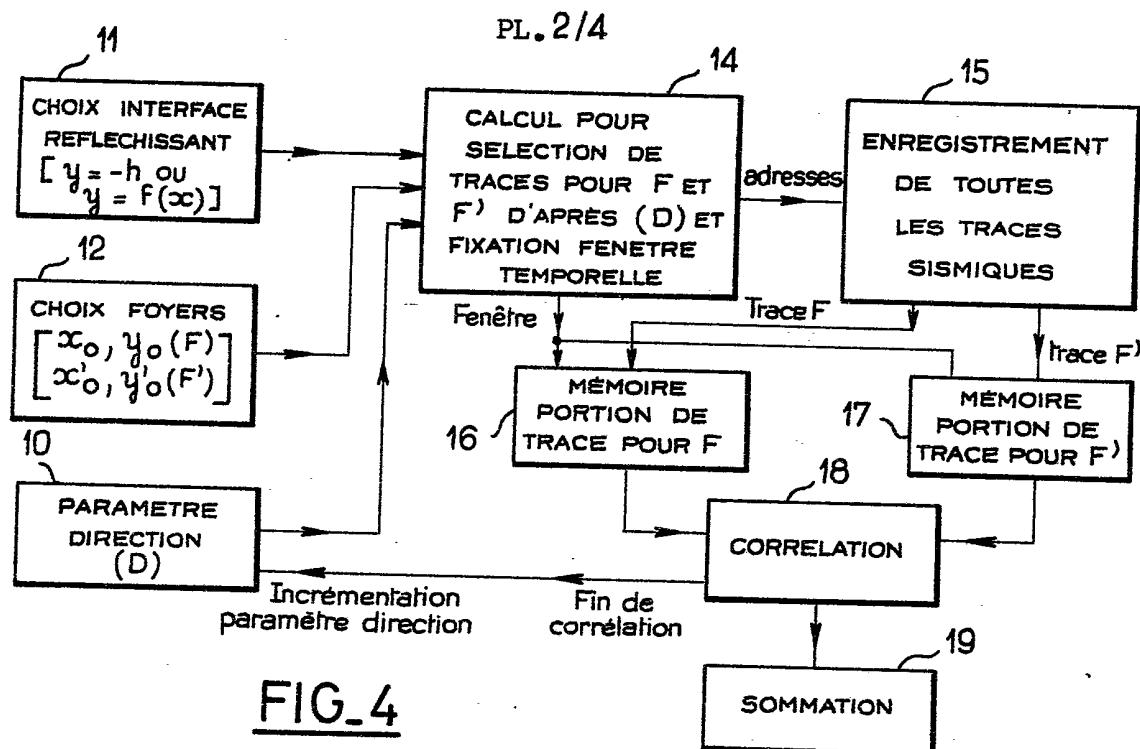


FIG. 3



PL. 3/4

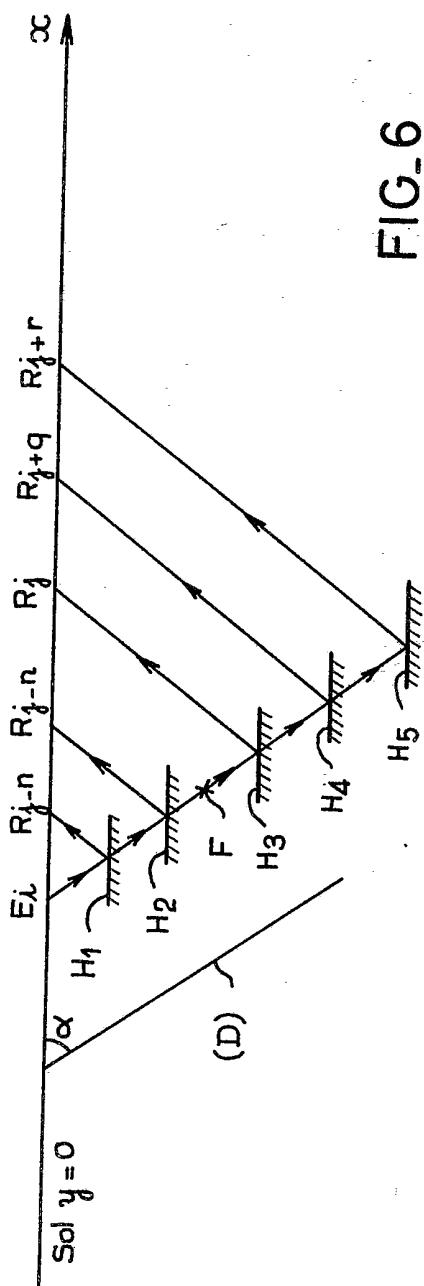


FIG. 6

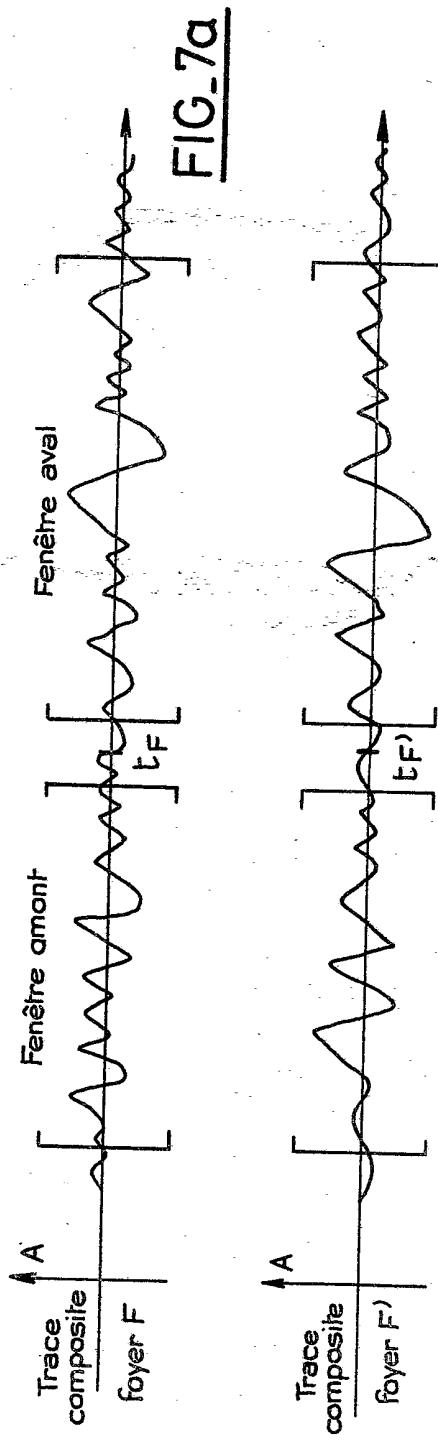
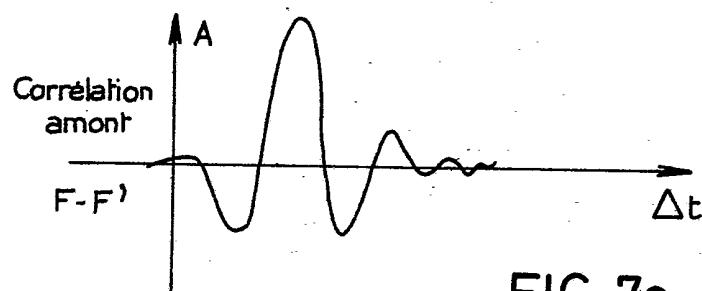
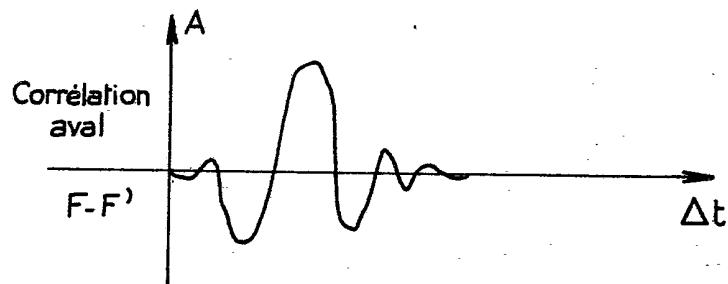
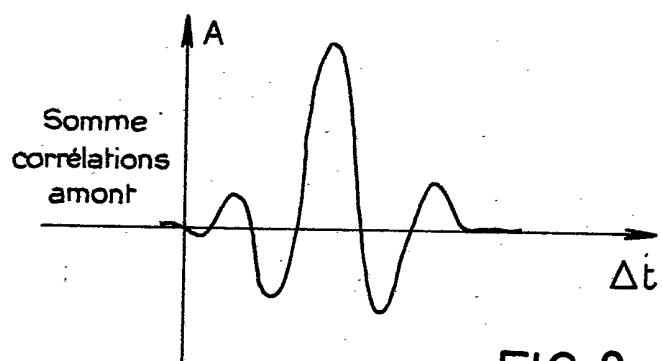
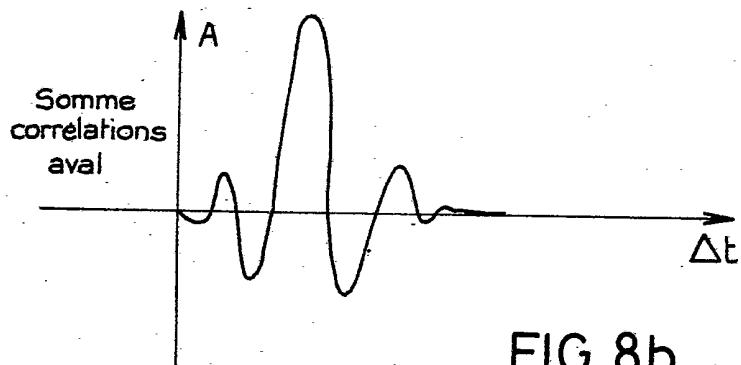


FIG. 7b

PL. 4/4

FIG_7cFIG_7dFIG_8aFIG_8b