



(22) Date de dépôt/Filing Date: 1996/07/25

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 1997/01/27

(45) Date de délivrance/Issue Date: 2007/04/03

(30) Priorité/Priority: 1995/07/26 (FREN. 95/09197)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G01V 1/32* (2006.01),
G01V 1/28 (2006.01), *G01V 1/36* (2006.01)

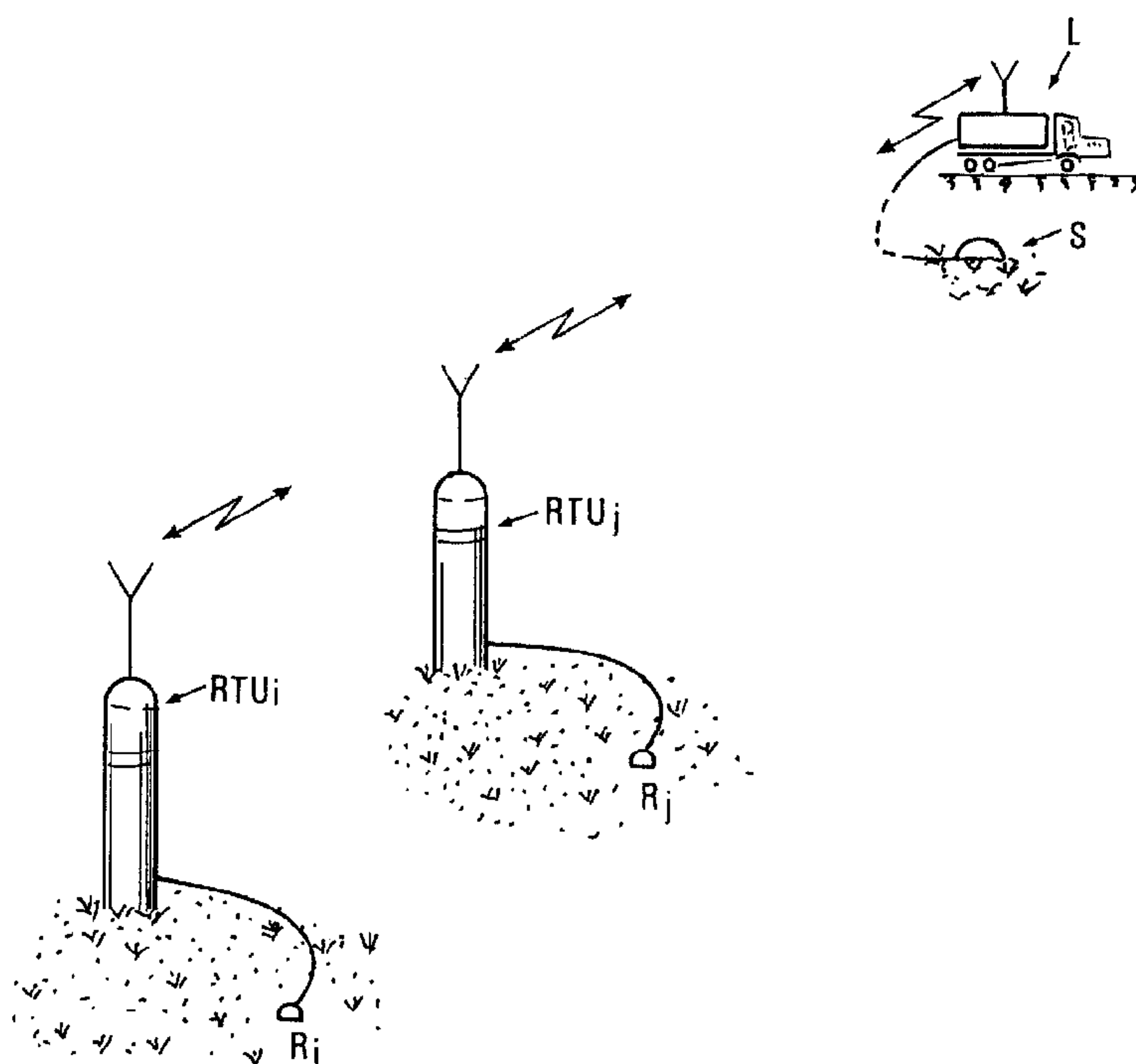
(72) Inventeur/Inventor:
BECQUEY, MARC, FR

(73) Propriétaire/Owner:
INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE, FR

(74) Agent: ROBIC

(54) Titre : METHODE ET DISPOSITIF DE FILTRAGE D'ONDES ELLIPTIQUES SE PROPAGEANT DANS UN MILIEU

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR FILTERING ELLIPTICAL WAVES PROPAGATING IN A MEDIUM



(57) Abrégé/Abstract:

- La présente invention concerne une méthode de filtrage permettant de discriminer des ondes elliptiques parmi d'autres ondes se propageant dans un milieu matériel (tel que par exemple une formation géologique) par un traitement combiné des composantes mesurées suivant plusieurs axes, des ondes reçues par un récepteur multi-axes. Elle comprend la détection par au moins un récepteur, (constitué par exemple d'un ou plusieurs détecteurs directionnels tels que des géophones ou accéléromètres couplés avec ladite formation) des composantes des ondes suivant au moins deux directions orthogonales. Elle est caractérisée en ce qu'elle comporte la détermination (par un ensemble de traitement) des transformées en ondelettes des signaux produits par ce récepteur en réponse aux ondes reçues et une sélection des amplitudes des signaux résultant de cette transformation en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives. - Application au filtrage des ondes de surface ou de tubes dans le cadre d'une exploration sismique par exemple.

PRÉCIS DE LA DIVULGATION :

- La présente invention concerne une méthode de filtrage permettant de discriminer des ondes elliptiques parmi d'autres ondes se propageant dans un milieu matériel (tel que par exemple une formation géologique) par un traitement combiné des composantes mesurées suivant plusieurs axes, des ondes reçues par un récepteur multi-axes. Elle comprend la détection par au moins un récepteur, (constitué par exemple d'un ou plusieurs détecteurs directionnels tels que des géophones ou accéléromètres couplés avec ladite formation) des composantes des ondes suivant au moins deux directions orthogonales. Elle est caractérisée en ce qu'elle comporte la détermination (par un ensemble de traitement) des transformées en ondelettes des signaux produits par ce récepteur en réponse aux ondes reçues et une sélection des amplitudes des signaux résultant de cette transformation en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives.
- Application au filtrage des ondes de surface ou de tubes dans le cadre d'une exploration sismique par exemple.

La présente invention concerne une méthode de filtrage permettant de discriminer des ondes elliptiques parmi d'autres ondes se propageant dans un milieu matériel par un traitement combiné des composantes mesurées suivant plusieurs axes des ondes reçues par un récepteur multi-axes.

La méthode selon l'invention trouve des applications dans de nombreux domaines. Elle peut s'appliquer par exemple dans le cadre d'opérations de prospection géophysique et notamment sismique où l'on reçoit les ondes émanant d'une formation géologique, en réponse à des ébranlements qui lui sont appliqués, au moyen de récepteurs couplés avec la surface, tels que des géophones tri-axiaux ou "triphone".

10 ÉTAT DE LA TECHNIQUE

En prospection sismique notamment, on sait que les ondes dites de surface ne pénètrent pas en profondeur. Elles ne portent donc généralement pas d'information utile au géophysicien d'exploration et sont considérées comme du bruit. Leur énergie est souvent importante, comparée à celle du signal utile. Les ondes de surface doivent donc être filtrées.

20 A la surface d'un milieu semi-infini élastique et homogène, se développent deux types d'ondes de surface, les ondes de Rayleigh pour lesquelles le mouvement des particules reste dans le plan de propagation, et les ondes de Love, pour lesquelles le mouvement des particules est perpendiculaire au plan de propagation. Le mouvement des particules au passage de l'onde de Rayleigh suit une ellipse parcourue dans le sens trigonométrique (rétrograde); l'axe de l'ellipse
est vertical; le rapport entre le grand axe et le petit axe dépend des paramètres d'élasticité du milieu, mais reste compris entre 1,4 et 1,9.

30 Une formation géologique comporte généralement au voisinage de sa surface, une couche de faible vitesse, appelée "zone altérée", dans laquelle se développent des ondes guidées (ondes dites pseudo-Rayleigh), formées par des interférences positives pour certaines fréquences entre les réflexions au mur et au toit de cette couche de faible vitesse. Ces ondes guidées sont aussi des ondes elliptiques qui se propagent dans le plan vertical contenant la source et le récepteur. Pour certaines de ces ondes le mouvement des particules est rétrograde comme dans le cas des ondes de Rayleigh proprement dites; pour d'autres, il est direct ou prograde, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre. Le rapport des axes principaux varie en raison de l'épaisseur de la zone altérée et du contraste des vitesses entre cette couche et le substratum. L'ensemble constitué par les ondes de Rayleigh et les différents modes d'ondes guidées dans la zone altérée est fortement dispersif : la vitesse apparente varie fortement avec la fréquence et peut couvrir une gamme importante. En conséquence, les ondes de surface peuvent recouvrir une grande partie des sismogrammes, occultant l'information utile en raison de leur forte énergie. Toutes ces ondes sont comprises dans le plan de propagation. Elles sont elliptiques, ce qui les distingue des

ondes directes et réfléchies qui sont, en principe, polarisées linéairement. Leurs axes principaux sont proches de la verticale et de l'horizontale.

Comme les ondes de volume, les ondes de surface sont transitoires. La perturbation due à chacun des modes de pseudo-Rayleigh passe, avec sa vitesse propre, aux points de réception. En raison du principe de l'action et de la réaction, l'intégrale en temps de la perturbation est nulle - autrement dit, la perturbation enregistrée en un point est une ondelette d'aire nulle. En résumé, les ondes de surface de type Rayleigh sont :

- dominantes, ce qui permet de les localiser facilement si l'on dispose d'un critère de reconnaissance;
- 10 • elliptiques, contrairement aux ondes de volume, ce qui donne le critère de reconnaissance;
- transitoires, donc de durée limitée à une ou quelques oscillations sur une trace correspondant à un point de réception;
- dispersives, donc de contenu fréquentiel limité dans une fenêtre de temps.

Plus de détails sur les ondes de surface peuvent être trouvés par exemple dans les documents suivants :

- Tolstoy I., Usdin E., 1953, "Dispersive properties of stratified elastic and liquid media: a ray theory", *Geophysics*, V18, pp 844-870; ou
- Mooney H., Bolt B., 1966, "Dispersive characteristics of the first three Rayleigh modes for a single surface layer", *Bull. Seism. Soc. Am.*, V56, pp 43-67.

20 Une méthode classique de filtrage consiste essentiellement à utiliser comme récepteurs sismiques, des "bretelles" de géophones interconnectés en série et à sommer leurs signaux respectifs. Pour être efficace, le dispositif de filtrage constitué par une ou plusieurs bretelles, doit couvrir, on le sait, une distance égale à la plus grande longueur d'onde des ondes de surface, ou, au moins, à la distance entre deux traces. Cela représente des dizaines de mètres de câbles, un encombrement et un poids important et un gros travail d'implantation et de maintenance. Ce type de filtrage, fondé sur la différence des vitesses horizontales apparentes entre les ondes de surface et les signaux réfléchis, n'est efficace que suivant la direction d'implantation. La réalisation d'un filtre de terrain isotrope, utilisable en 3D, est trop lourde pour être effectivement mise en pratique.

30 Une autre méthode connue pour filtrer les ondes de surface restant sur les sismogrammes après utilisation d'un filtre de terrain, consiste par exemple soit à couper tout ce qui est capté par les géophones en un point donné passé un certain délai et donc à partir l'arrivée des ondes de surface, (opération dit de "mute" interne), soit à éliminer toutes les fréquences en-dessous d'une

certaine valeur par utilisation d'un filtre coupe-bas. Ces filtres reposent sur la décomposition des enregistrements en domaines disjoints et l'élimination des domaines où se rencontre le "bruit".

On connaît des méthodes de prospection sismiques comportant l'utilisation de récepteurs sismiques multi-axes et un traitement des signaux suivant au moins deux axes orthogonaux permettant une discrimination des ondes de surface.

10 Par le brevet US-A-4.458.341, par exemple, on connaît une méthode de prospection sismique comportant la réception des signaux sismiques émanant d'une formation, par des capteurs bi ou tri-axiaux, qui peuvent être associés à un ensemble de traitement adapté à détecter les ondes de Rayleigh. Les composantes radiale X et verticale V des signaux captés sont appliquées à des circuits de filtrage, de détection d'enveloppe et de comparaison de cet ensemble, qui permettent de déterminer une fenêtre de réception des ondes de Rayleigh d'après leurs caractéristiques spécifiques et de commander leur soustraction des signaux reçus.

Par le brevet US 4.935.905 également, on connaît une méthode de prospection sismique où l'on utilise des géophones bi ou tri-axiaux pour recevoir les ondes émanant d'une formation. Les différentes composantes des signaux captés sont exprimées en coordonnées polaires. Les composantes des ondes de Rayleigh sont obtenues à partir de ces composantes par application d'une méthode de moyenne et peuvent être soustraites.

Une méthode de filtrage des ondes de surface par des géophones multi-axes, est divulguée aussi dans "Expanded Abstracts, 57th EAEG conference, Glasgow, 1995, B12.

20 Par le brevet FR-A-2 648 567 également, on connaît une méthode de traitement numérique de signaux appliquée par exemple à l'analyse d'ondes cérébrales, où l'on utilise la technique d'analyse par ondelettes.

Filtrage mixte temps-fréquence :

30 Le filtrage en fréquence est une décomposition harmonique de la trace, suivi de l'élimination, dans le domaine de Fourier, des fréquences constitutives des ondes de surface (en général les fréquences les plus basses, jusqu'à 15 Hz, parfois plus) et de la reconstitution du signal à partir des domaines sauvegardés. Naturellement, l'élimination de ces domaines de temps ou de fréquence caractéristiques du bruit, entraîne également l'élimination de la part de signal utile appartenant à ces domaines. Pour limiter le recouvrement entre les domaines reconnus au bruit, que l'on cherche à éliminer, et le reste à sauvegarder, où l'on espère mettre en évidence le signal, il est connu de pratiquer des décompositions à deux dimensions temps-fréquence.

La méthode selon l'invention fait appel à la technique d'analyse de signal "temps-fréquence" dite "analyse par ondelettes" où un signal est analysé par une batterie d'ondelettes dont la taille varie en progression géométrique, chaque ondelette étant translatée au long de la

trace avec un pas égal à une fraction de sa longueur. Cette technique est décrite par exemple par :

- Goupillaud P., Grossmann A., Morlet J., 1984/1985, "Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis", Geoexploration, V23, p.85-102.

Le signal d'analyse de la transformée en ondelettes peut être n'importe quel signal de moyenne nulle. On peut utiliser, par exemple, l'impulsion de Ricker $(a - t^2)e^{-\frac{t^2}{2a}}$.

Dans la transformée en ondelettes, le signal est de forme constante. La décomposition temps-fréquence par la transformée en ondelettes, est une opération discrète (échantillonnée). A taille donnée, le signal est déplacé à un pas constant au plus égal à une période(cycle). On fait aussi varier sa taille; il est dilaté ou comprimé en modifiant son coefficient d'échelle E suivant une raison géométrique constante égale à 2 (au plus, soit un octave). L'échantillon au temps T et le coefficient d'échelle E de la transformée en ondelette est le produit de la trace par l'ondelette de coefficient d'échelle E, centrée au temps T.

Si $h(t)$ est la base de l'ondelette, l'ondelette de coefficient d'échelle a, translatée de b, sera $h_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{t-b}{a}\right)$

où a est le coefficient ou paramètre d'échelle et b le paramètre de translation en temps. La transformée en ondelettes d'un signal $s(t)$ s'écrit :

$$T_s(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) h\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

La transformée inverse est, à un coefficient près, la somme des produits de chaque terme de la transformée en ondelettes par l'ondelette correspondante.

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{c_g}} \int_{-\infty}^{\infty} T_s(b,a) h\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2} \text{ avec } c_g = \int \frac{\left| \int e^{-i\omega t} h(t) dt \right|^2}{|\omega|} d\omega$$

La méthode selon l'invention permet de discriminer des ondes elliptiques se propageant suivant au moins un plan de propagation, parmi d'autres ondes se propageant dans un milieu matériel (tel que par exemple une formation géologique). Elle comprend la détection par au moins un récepteur (constitué par exemple d'un ou plusieurs détecteurs directionnels tels que des géophones ou accéléromètres couplés avec ladite formation) des composantes des ondes suivant au moins deux directions orthogonales.

Elle est caractérisée en ce qu'elle comporte la détermination des transformées en ondelettes des signaux produits par ce récepteur en réponse aux ondes reçues et une sélection des amplitudes des transformées en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives.

Suivant un mode de mise en oeuvre, on choisit une fenêtre de sélection encadrant les valeurs d'ellipticité des ondes elliptiques à filtrer, on opère une transformée en ondelettes des signaux reçus suivant au moins deux directions orthogonales pour obtenir une série d'échantillons successifs ($TO_n(Z)$, $TO_n(X)$) correspondant à une succession de facteurs d'échelle (f) et d'instant (T) d'une ondelette d'analyse choisie, on détermine les rapports :

$$r_1 = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) ; \text{ et}$$

$$r_2 = -TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X).$$

où (n-1, n, n+1) représentent des numéros d'ordre successifs, on valide des échantillons pour lesquels les valeurs r_1 et r_2 de ces rapports sont compris dans la fenêtre de sélection, et on reconstruit le champ des ondes elliptiques en opérant une transformée en ondelettes inverse. On on peut ensuite éventuellement soustraire le champ d'ondes elliptiques reconstruit des signaux reçus.

La méthode de discrimination peut être utilisée par exemple pour le filtrage d'ondes elliptiques se propageant dans une formation géologique en installant un ou plusieurs récepteurs multi-axes au voisinage de la surface du sol ou dans des puits pour filtrer des ondes de surface ou des ondes dites de tube.

Cette méthode de discrimination peut être incluse dans une méthode de prospection sismique d'une formation souterraine où l'on applique des ondes acoustiques ou sismiques à la formation, on reçoit des ondes renvoyées par des discontinuités dans la formation au moyen d'un ou plusieurs récepteurs adaptés à détecter chacun les composantes des ondes reçues suivant au moins deux directions distinctes, on enregistre des signaux captés, et on traite les signaux enregistrés pour l'élimination des ondes elliptiques par une détermination des transformées en ondelettes des signaux produits par chaque récepteur en réponse aux ondes reçues et une sélection des amplitudes des signaux résultant de cette transformation en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives.

Suivant un mode de mise en oeuvre de cette méthode de prospection sismique, on traite les signaux enregistrés en choisissant une fenêtre de sélection encadrant les valeurs d'ellipticité des ondes elliptiques à filtrer, en opérant une transformée en ondelettes des signaux reçus suivant au moins deux directions orthogonales pour obtenir une série d'échantillons successifs $TO(X)$, $TO(Z)$ correspondant à une succession de facteurs d'échelle (f) et d'instant (T) d'une ondelette d'analyse choisie, en déterminant de même les rapports :

$$r_1 = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) ; \text{ et}$$

$$r_2 = -TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X).$$

où (n-1, n, n+1) représentent des numéros d'ordre successifs, en validant des échantillons pour lesquels les valeurs r_1 et r_2 desdits rapports sont compris dans la fenêtre de sélection et en reconstruisant le champ des ondes elliptiques en opérant une transformée en ondelettes inverse. On on peut ensuite éventuellement éliminer par soustraction le champ d'ondes elliptiques reconstruit des signaux reçus.

Le dispositif selon l'invention permet de discriminer des ondes elliptiques parmi des ondes acoustiques ou sismiques se propageant dans un milieu matériel, (tel qu'une formation géologique par exemple), reçues par au moins un récepteur couplé avec le milieu, adapté à détecter des composantes des ondes suivant au moins deux directions orthogonales (tel qu'un géophone bi- ou tri-axes dans une application en géophysique par exemple).

Il est caractérisé en ce qu'il comporte un ensemble de traitement adapté à déterminer des transformées en ondelettes des signaux produits par ce récepteur en réponse aux ondes reçues et pour sélectionner des amplitudes des signaux résultant de cette transformation en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives.

- 10 Cet ensemble de traitement comporte par exemple des moyens pour effectuer une transformée en ondelettes des signaux reçus suivant au moins deux directions orthogonales (Z, X) et obtenir une série d'échantillons successifs ($TO_n(Z)$, $TO_n(X)$) correspondant à une succession de facteurs d'échelle (f) et d'instant (T) d'une ondelette d'analyse choisie, des moyens pour déterminer les rapports :

$$r_1 = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) ; \text{ et}$$

$$r_2 = -TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X).$$

- où (n-1, n, n+1) représentent des numéros d'ordre successifs, des moyens de validation des échantillons pour lesquels les valeurs r_1 et r_2 desdits rapports sont compris dans une fenêtre de sélection encadrant les valeurs d'ellipticité des ondes elliptiques à filtrer, et des moyens pour
20 reconstruire le champ des ondes elliptiques en opérant une transformée en ondelettes inverse. On peut ensuite éventuellement éliminer par soustraction le champ d'ondes elliptiques reconstruit des signaux reçus.

L'invention porte également sur un système de prospection sismique d'une formation géologique comprenant une source sismique pour engendrer des ondes dans la formation, au moins un récepteur couplé avec la formation, adapté à détecter des composantes des ondes reçues suivant au moins deux directions orthogonales, un ensemble de commande pour piloter la réalisation de cycles d'émission-réception sismique et d'enregistrement des signaux reçus par chaque récepteur.

- 30 Le système est caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de discrimination des ondes elliptiques tel qu'il a été défini précédemment qui peut être par exemple inclus dans une unité d'acquisition locale pré-traitant les signaux avant de les transmettre à un laboratoire central de commande et d'enregistrement ou bien dans un centre de calcul.

Le filtre d'ondes elliptiques selon l'invention opère un filtrage énergétique des ondes de surface en utilisant seulement, à chaque emplacement sur le terrain, un récepteur unique à deux composantes et une décomposition des traces sismiques en pavés temps-échelle. Cette méthode ouvre la voie au remplacement du lourd dispositif de réception de terrain utilisé habituellement,

avec une ou plusieurs bretelles de géophones par trace, par des récepteurs 3 composantes uniques à chaque point de réception choisi.

La qualité du filtrage obtenu par la méthode proposée, sur les signaux produits par des récepteurs triaxiaux sur le terrain, est meilleure que celle obtenue classiquement par sommation des enregistrements de bretelles de géophones étalés sur des longueurs importantes. Elle prend en compte l'ellipticité réelle des ondes elliptiques, qui est très variable dans la réalité, sans faire aucune hypothèse simplificatrice sur la nature de leur polarisation. Le filtrage d'ondes elliptiques permet l'atténuation des ondes de surface de vitesse rapide. L'enregistrement sur un récepteur unique multi-composantes évite en outre l'atténuation des hautes fréquences due à la sommation d'enregistrements espacés.

D'autres caractéristiques et avantages de la méthode et du dispositif selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après de modes de réalisation décrits à titre d'exemples non limitatifs, dans une application particulière à la géophysique, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 montre un schématiquement un mode de réalisation du dispositif de mise en oeuvre de la méthode placé sur le terrain au voisinage du lieu d'implantation d'un récepteur;
- la Fig.2 montre schématiquement un autre mode pratique de réalisation où le dispositif de mise en oeuvre de la méthode est inclus dans un boîtier d'acquisition et de pré-traitement des signaux reçus;
- 20 - les Fig.3a, 3b, 3c montrent respectivement un sismogramme original, un autre représentant les ondes elliptiques et un troisième obtenu en faisant la différence des deux précédents;
- les Fig.4a, 4b, 4c, 4d montrent des sismogrammes d'une composante Z filtrée en ellipticité avec des fenêtres d'ellipticité disjointes, respectivement $(-2,2, -0,8)$, $(-0,8, 0)$, $(0, 0,8)$ et $(0,8, 2,2)$;
- la Fig.5a, 5b, 5c montrent respectivement un sismogramme obtenu avec une bretelle de 9 géophones réalisant un filtre de terrain, un autre obtenu avec un récepteur unique tri-axes et un troisième, le résultat du filtrage d'ondes elliptiques selon l'invention; et
- les Fig.6a, 6b, 6c, 6d montrent respectivement les sismogrammes d'une composante Z brute (6a), filtrée en ellipticité (6b), après application d'un filtre temps-fréquence en ondelettes (6c),
30 et après filtrage de l'onde aérienne.

La méthode selon l'invention exploite la technique de transformée en ondelettes rappelée ci-dessus et connue en soi pour détecter et discriminer les ondes elliptiques

Ayant déterminé à cet effet les transformées en ondelettes $TO(X)$ et $TO(Z)$ des composantes X et Z, échantillonnées au quart de période (ou quart de cycle), on peut tester la

présence éventuelle d'une onde elliptique en calculant le rapport r du n ème échantillon de la transformée de Z sur le $(n-1)$ ème échantillon de X : $r = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X)$ de même que le rapport $-TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X)$, et ceci tant que dure le passage de l'onde elliptique (qui, rappelons-le, est dominante). On vérifie en effet que ce rapport r est égal à l'ellipticité a/b de cette onde elliptique.

Par ce moyen, il est possible de détecter la présence d'ondes elliptiques dont l'ellipticité est comprise dans une fenêtre donnée f , en sélectionnant les transformées en ondelettes pour lesquelles la valeur du rapport r est contenu dans cette même fenêtre f .

La reconstruction des signaux sismiques débarrassés des ondes de surface, peut alors être effectuée en écartant les pavés temps-échelle pour lesquels les rapports :

$$r = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) \text{ ou}$$

$$r = -TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X)$$

sont compris dans la fenêtre f . Les pavés temps-échelle pour lesquels les rapports r sont dans la fenêtre déterminée, permettent d'estimer la contribution des ondes de surface. Cette contribution peut alors être retranchée des sismogrammes initiaux.

Construction du filtre :

Le filtrage des ondes elliptiques est conduit comme suit :

- 1) prendre la transformée en ondelettes des composantes X et Z d'un enregistrement à deux ou trois composantes;
- 20 2) choisir une fenêtre de sélection, définissant les valeurs d'ellipticité des ondes à filtrer;
- 3) pour chaque voie, (c'est-à-dire pour chaque valeur du coefficient d'échelle de l'ondelette d'analyse) et pour chaque échantillon en temps, (c'est-à-dire pour chaque translation de cette même ondelette), calculer les rapports :

$$r_1 = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) ; \text{ et}$$

$$r_2 = -TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X).$$
- 4) sélectionner les échantillons en validant
 - a) les échantillons $TO(Z)_n$ et $TO_{n-1}(X)_{(n-1)}$ pour lesquels r_1 est dans la fenêtre de sélection, et
 - b) les échantillons $TO_n(Z)$ et $TO_{(n-1)}(X)$ pour lesquels r_2 est dans la fenêtre de sélection;
- 30 et, en mettant à zéro les échantillons non valides,
- 5) procéder à la reconstruction du champ d'ondes elliptiques par transformée en ondelettes inverse.

Pour obtenir des sismogrammes débarrassés des ondes elliptiques, il suffit de soustraire le champ d'ondes elliptiques obtenus des sismogrammes d'origine.

Le dispositif de mise en oeuvre de la méthode est associé en combinaison avec au moins un récepteur d'ondes acoustiques ou sismiques multi-composantes R (Fig.1, 2). Ce récepteur R comprend au moins deux capteurs dont les axes sont orientés suivant deux directions orthogonales choisies de préférence en relation avec un plan de polarisation des ondes elliptiques à déceler. En prospection sismique par exemple, on utilise typiquement un récepteur tri-axes dont l'un des axes est placé dans le plan contenant la source sismique et l'emplacement de couplage du récepteur. Le dispositif comporte un ensemble de traitement 1 comprenant un
10 convertisseur analogique-numérique 2 pour l'échantillonnage et la numérisation des différents signaux produits par le récepteur R. Pour tenir compte d'un écart d'azimut éventuel du plan contenant l'axe du capteur vertical et celui d'un des capteurs horizontaux par rapport au plan vertical de référence contenant l'emplacement de la source sismique utilisée et l'emplacement du récepteur R, l'ensemble de traitement 1 comprend un élément de calcul 3 des coordonnées X, Z dans ce même plan de référence, et un processeur de filtrage 4 pour réaliser la discrimination des ondes elliptiques parmi les ondes reçues et leur élimination éventuelle, suivant l'algorithme défini ci-dessus. Dans la pratique, on utilise de préférence un ordinateur 4 programmé pour réaliser notamment les étapes de l'algorithme de discrimination.

Pour réaliser toutes les fonctions d'acquisition et de traitement des signaux produits par
20 chaque récepteur R, selon la méthode, on peut utiliser avantageusement une unité locale d'acquisition RTU (Fig.2) telle que celles décrites dans les demandes de brevet français EN 94/06514 et 2.692.384 du demandeur. Chaque unité locale RTU_i, RTU_j (Fig.2) est placée au voisinage et connectée à au moins un récepteur sismique de terrain R_i, R_j. Outre un processeur de gestion, chacune de ces unités locales RTU comporte un processeur complémentaire de calcul (de type DSP) programmé pour effectuer en temps réel des fonctions étendues: traitements sur les données avant leur transmission tels que combinaisons diverses de signaux sismiques, compression de données, contrôles de qualité effectués en temps réel durant la phase de déploiement de l'équipement sismique (récepteurs sismiques et appareillage électronique etc.)
30 Chaque unité locale RTU acquiert et pré-traite les données sismiques reçues de la formation en réponse à des ondes sismiques transmises dans le sol par une source sismique S, avant de les transmettre à un laboratoire central de commande et d'enregistrement L par des câbles ou des voies hertziennes.

Des programmes de traitement supplémentaires, propres à la mise en oeuvre de la méthode selon l'invention, peuvent dans ce cas être inclus dans de telles unités de terrain que l'on relie en l'occurrence à au moins un récepteur multi-axes R.

L'ensemble de traitement peut comporter également un filtre passe-haut intercalé (non représenté).

Il est également possible d'enregistrer au moins deux des trois composantes de chaque récepteur et d'effectuer le filtrage postérieurement à l'acquisition sur le terrain, que ce soit dans le laboratoire central de terrain ou dans un centre de calcul.

Validation expérimentale :

Des enregistrements sismiques ont été effectués avec un équipement sismique comportant :

- alternativement une bretelle de géophones classique à 9 géophones interconnectés ou un récepteur sismique unique tri-axes à 3C.
- une source sismique à chute de poids; et
- un ensemble d'acquisition et d'enregistrement des signaux au pas de 2 millisecondes.

10 Exemples d'application du filtrage d'ondes elliptiques :

Les Fig.3-7 montrent les résultats de la reconstruction par transformation inverse de la transformée en ondelettes du sismogramme en application de la méthode selon l'invention. La transformée est échantillonnée au quart de période en temps. L'échantillonnage au demi-octave en échelle donne une reconstruction satisfaisante pour un quart de cycle de base de 24 ms et une compression du signal d'analyse sur 2,5 octaves. Pour une bonne reconstruction, il est préférable que le pas d'échantillonnage soit au plus égal au huitième de période du signal le plus étroit.

Estimation des ondes elliptiques :

La bande de fréquence dans laquelle se trouvent les ondes de surface est plus limitée que celle du signal utile. On peut donc estimer ces ondes sur un nombre limité d'octaves et soustraire
20 l'estimation des ondes elliptiques du sismogramme initial.

De même qu'on réalise une analyse en fréquence par juxtaposition de filtres dans des bandes de fréquence différentes, on peut réaliser une analyse d'ellipticité en filtrant un sismogramme avec des fenêtres d'ellipticité disjointes. L'analyse montre (Fig.4a à 4d), que les arrivées à 570 m/s ont une "ellipticité" comprise, pour l'essentiel, entre (-0.8 et 2,2). Les valeurs négatives signifient que ces ondes elliptiques entraînent un mouvement des particules dans le sens des aiguilles d'une montre ou prograde. Ce sont des ondes M2 ou ondes dites de Sesawa. Les ellipses décrites ont leur axe majeur sur l'horizontale. Ces filtres disjointes permettent d'analyser des caractères d'ellipticité des différentes ondes enregistrées et de préciser leur nature.

Comparaison avec un filtre terrain :

30 Sur les Fig.5a à 5c où sont juxtaposés les enregistrements effectués avec une bretelle de géophones, la composante Z du capteur 3-C unique et le signal issu du filtre d'ondes elliptiques, on voit par exemple que les ondes pseudo-Rayleigh à 570 m/s ne sont pas filtrées par la bretelle

de géophones, qui est trop courte. C'est aussi vrai pour les ondes de surface à 2200 m/s. Le filtre d'ondes elliptiques est plus efficace dans ces domaines. Par ailleurs, le contenu fréquentiel du champ réfléchi apparaît nettement plus large sur le sismogramme filtre provenant du capteur unique 3C. Sur le sismogramme filtré 5c, il reste une onde de faible vitesse dont la polarisation est pratiquement linéaire.

Cette onde présente une pseudo-période bien constante et peut être facilement enlevée par un filtre temps-fréquence en ondelettes.

10 L'onde aérienne, représentée par l'événement à haute fréquence visible sur les Fig 6a à 6c, donne la mesure de l'atténuation réalisée par le filtre d'ondes elliptiques utilisé. Sur la Fig.6d, cette onde aérienne a été filtrée par un filtre en fréquence passe-bas.

Il apparaît donc, comme le confirment les exemples ci-dessus, que les ondes de surface elliptiques, ondes de Rayleigh et pseudo-Rayleigh peuvent être filtrées par un filtre d'ondes elliptiques, si l'on dispose d'enregistrements dans la direction source-récepteur et sur la verticale.

Les résultats de la méthode de filtrage en ondelettes proposée sur les signaux produits par des récepteurs triaxiaux 3 sur le terrain, sont meilleurs que ceux obtenus classiquement par sommation des enregistrements de 9 géophones étalés sur 20 mètres. Le filtre d'ondes elliptiques permet l'atténuation des ondes de surface de vitesse rapide et l'enregistrement sur un capteur unique permet d'éviter l'atténuation des hautes fréquences dues à la sommation d'enregistrements espacés.

20 Dans le cadre d'applications à la géophysique, la méthode selon l'invention peut être utilisée par exemple pour discriminer les ondes à caractère elliptique par rapport à d'autres ondes que ce soit par exemple des ondes à polarisation rectiligne ou bien même d'autres ondes elliptiques, de façon à les discriminer les unes par rapport aux autres. De telles ondes elliptiques peuvent être des ondes de surface ou encore des ondes de tube.

On a décrit des modes de mise en oeuvre appliqués dans le cadre d'un traitement de données géophysiques. Il est bien évident cependant que la méthode de discrimination et de filtrage des ondes elliptiques selon l'invention peut être utilisée dans d'autres domaines d'application et sur d'autres types d'onde que les ondes acoustiques ou sismiques, notamment sur des signaux électriques, électro-physiologiques, etc.

Les réalisations de l'invention au sujet desquelles un droit exclusif de propriété ou de privilège est revendiqué, sont définis comme il suit :

1) Méthode pour discriminer des ondes elliptiques se propageant suivant au moins un plan de propagation, dans un milieu matériel, comprenant la détection par au moins un récepteur, des composantes des ondes suivant au moins deux directions orthogonales, caractérisée en ce qu'elle comporte la détermination des transformées en ondelettes des signaux produits par ce récepteur en réponse aux ondes reçues et une sélection des amplitudes de ces transformées en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives.

2) Méthode de discrimination selon la revendication 1, caractérisée en ce que :

- on choisit une fenêtre de sélection encadrant les valeurs d'ellipticité des ondes elliptiques à filtrer,
- on opère une transformée en ondelettes des signaux reçus suivant au moins deux directions orthogonales pour obtenir une série d'échantillons successifs correspondant à une succession de facteurs d'échelle et d'instant d'une ondelette d'analyse choisie,
- on détermine les rapports :

$$r_1 = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) ; \text{ et }$$

$$r_2 = -TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X).$$
 où $(n-1, n, n+1)$ représentent des numéros d'ordre successifs,
- on valide des échantillons pour lesquels les valeurs r_1 et r_2 desdits rapports sont compris dans la fenêtre de sélection.; et
- on reconstruit le champ d'ondes elliptiques en opérant une transformée en ondelettes inverse.

3) Méthode de discrimination selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce qu'on soustrait le champ d'ondes elliptiques reconstruit des signaux reçus.

4) Méthode de discrimination selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que ledit milieu est une formation géologique.

5) Méthode selon la revendication 4, caractérisée en ce que chaque récepteur comporte plusieurs détecteurs directionnels constitués de géophones ou accéléromètres couplés avec ladite formation.

6) Méthode selon la revendication précédente, caractérisée en ce qu'elle comporte l'installation d'au moins un récepteur au voisinage de la surface du sol pour le filtrage des ondes elliptiques de surface.

7) Méthode selon la revendication précédente, caractérisée en ce qu'elle comporte l'installation d'au moins un récepteur dans au moins un puits au travers de cette formation pour le filtrage des ondes elliptiques se propageant le long de ce puits.

8) Méthode de prospection sismique d'une formation souterraine, caractérisée en ce qu'elle comporte en combinaison :

- l'application d'ondes acoustiques ou sismiques à la formation,
- la réception des ondes renvoyées par des discontinuités dans la formation au moyen d'un ou plusieurs récepteurs adaptés à détecter chacun les composantes des ondes reçues suivant au moins deux directions distinctes, et l'enregistrement des signaux captés; et
- un traitement des signaux enregistrés pour l'élimination des ondes elliptiques comportant la détermination des transformées en ondelettes des signaux produits par ce récepteur en réponse aux ondes reçues et une sélection des amplitudes de ces transformées en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives.

9) Méthode de prospection sismique selon la revendication 8, caractérisée en ce que: l'on traite les signaux enregistrés en choisissant une fenêtre de sélection encadrant les valeurs d'ellipticité des ondes elliptiques à filtrer, en opérant une transformée en ondelettes des signaux reçus suivant au moins deux directions orthogonales pour obtenir une série d'échantillons successifs correspondant à une succession de facteurs d'échelle et d'instant d'une ondelette d'analyse choisie, en déterminant les rapports :

$$r_1 = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) ; \text{ et}$$

$$r_2 = -TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X)$$

où (n-1, n, n+1) représentent des numéros d'ordre successifs, en validant des échantillons pour lesquels les valeurs r_1 et r_2 desdits rapports sont compris dans la fenêtre de sélection, et on valide des échantillons pour lesquels les valeurs r_1 et r_2 desdits rapports sont compris dans la fenêtre de sélection; et en reconstruisant le champ d'ondes elliptiques par une transformée en ondelettes inverse.

10) Méthode de prospection sismique selon la revendication 8 ou 9, caractérisée en ce que l'on soustrait le champ d'ondes elliptiques reconstruit des signaux reçus.

11) Dispositif de discrimination d'ondes elliptiques se propageant suivant au moins un plan de propagation, parmi des ondes acoustiques ou sismiques se propageant dans un milieu matériel, reçues par au moins un récepteur couplé avec le milieu, adapté à détecter des composantes des ondes suivant au moins deux directions orthogonales, caractérisé en ce qu'il comporte un ensemble de traitement adapté à déterminer des transformées en ondelettes des signaux produits par ce récepteur en réponse aux ondes reçues et pour sélectionner des amplitudes des signaux résultant de cette transformation en ondelettes suivant un critère basé sur le rapport de leurs amplitudes respectives.

12) Dispositif de discrimination selon la revendication 11, caractérisé en ce que l'ensemble de traitement comporte des moyens pour effectuer une transformée en ondelettes des signaux reçus suivant au moins deux directions orthogonales et obtenir une série d'échantillons successifs correspondant à une succession de facteurs d'échelle et d'instant d'une ondelette d'analyse choisie, des moyens pour déterminer les rapports :

$$r_1 = TO_n(Z)/TO_{(n-1)}(X) ; \text{ et}$$

$$r_2 = -TO_n(Z)/TO_{(n+1)}(X).$$

où (n-1, n, n+1) représentent des numéros d'ordre successifs, et des moyens de validation des échantillons pour lesquels les valeurs r_1 et r_2 desdits rapports sont compris dans une fenêtre de sélection encadrant les valeurs d'ellipticité des ondes elliptiques à filtrer, et des moyens pour reconstruire le champ d'ondes elliptiques par une transformée en ondelettes inverse.

13) Dispositif de discrimination selon la revendication 11 ou 12, caractérisé en ce que l'ensemble de traitement comporte des moyens pour soustraire le champ d'ondes elliptiques reconstruit des signaux reçus.

14) Dispositif de discrimination selon l'une des revendications 11 ou 12, caractérisé en ce que l'ensemble de traitement comporte un calculateur numérique programmé.

15) Système de prospection sismique d'une formation géologique comprenant une source sismique pour engendrer des ondes dans la formation, au moins un récepteur couplé avec la formation, adapté à détecter des composantes des ondes reçues suivant au moins deux directions orthogonales, un ensemble de commande pour piloter la réalisation de cycles d'émission-réception sismique et d'enregistrement des signaux reçus par chaque récepteur, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de discrimination des ondes elliptiques selon l'une des revendications 11 ou 12.

16) Système selon la revendication 15, caractérisé en ce qu'il comporte au moins une unité locale d'acquisition disposée au voisinage d'au moins un récepteur, le dispositif de discrimination étant constitué de moyens de traitement inclus dans ladite unité locale.

FIG.1

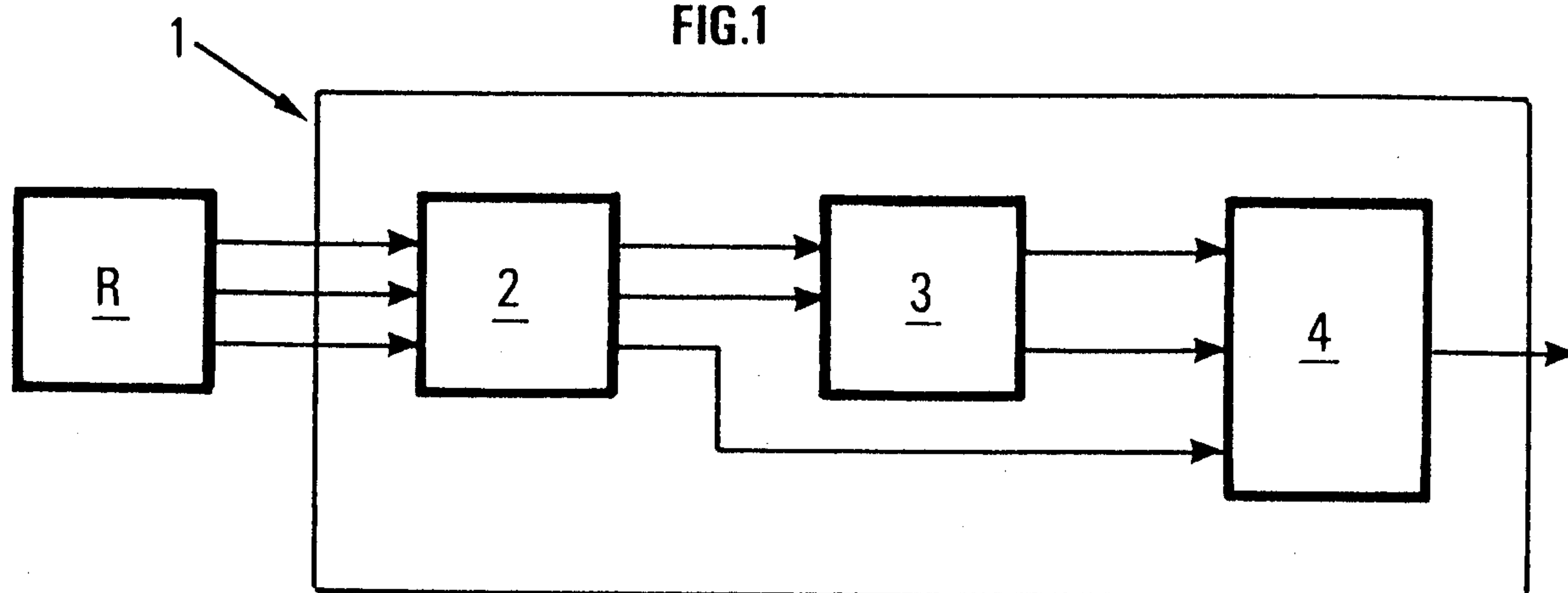


FIG.2

