

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 80 09102

(54)

Procédé et appareil de sismographie.

(51)

Classification internationale (Int. Cl. 3). G 01 V 1/00.

(22)

Date de dépôt..... 23 avril 1980.

(33) (32) (31)

Priorité revendiquée : *Grande-Bretagne, 23 avril 1979, n° 7913997.*

(4↑)

Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 5 du 30-1-1981.

(71)

Déposant : ZIOLKOWSKI Antoni Marjan et Société dite : SEISMOGRAPH SERVICES (EN-
GLAND) LTD., résidant en Grande-Bretagne.

(72)

Invention de : Antoni Marjan Ziolkowski et William E. Lerwill.

(73)

Titulaire : *Idem* (71)

(74)

Mandataire : Armand Kohn,
5, av. Foch, 92380 Garches.

La présente invention se rapporte à un procédé de détermination de la position de limites souterraines, dans le sol, et/ou des propriétés acoustiques de couches du sous-sol ; elle vise également un appareil pour la mise en oeuvre de ce procédé.

On connaît un procédé de réflexion sismique qui utilise une source sonore, située à la surface du sol ou près de cette surface, pour émettre à un instant donné une onde d'impulsion sonore. Lorsque cette onde sonore se déplace dans le sol, elle rencontre des limites entre les différentes couches souterraines. A chaque limite, une partie du son est transmise et l'autre est réfléchi. Un récepteur situé à la surface ou près de celle-ci, à proximité de la source, détecte les ondes réfléchies qui arrivent avec un retard de plus en plus grand.

On traite ensuite un enregistrement de la réponse du récepteur, ou sismogramme, pour déterminer les amplitudes et les instants d'arrivée des réflexions individuelles. Ces valeurs peuvent alors être utilisées pour déterminer les positions des limites géologiques à l'intérieur de la terre et/ou les propriétés acoustiques du rocher de chaque côté de chaque limite.

La précision d'une telle analyse dépend de la capacité du procédé de traitement à séparer l'une de l'autre les réflexions individuelles. Une ^{des} raisons qui font que ce travail n'est pas simple est qu'il est extrêmement difficile d'engendrer une onde sonore purement impulsive. L'onde sonore engendrée par la plupart des sources sonores sismiques a une durée supérieure au plus petit intervalle de temps de séparation que l'appareil est capable d'enregistrer. Autrement dit, la série de réflexions qui arrive au récepteur n'est pas la série d'impulsions désirée (série de réflectivité) mais c'est une série d'oscillations chevauchantes. Le mode de traitement qui est utilisé pour éliminer du signal enregistré l'effet de la source, afin d'essayer

2

de retrouver la série de réflectivité, est habituellement appelé déconvolution.

La représentation habituelle d'un signal sismique considère la propagation des ondes sismiques comme un processus élastique linéaire dans lequel le signal $x_1(t)$ est obtenu comme la convolution de l'impulsion de réponse de la terre $g(t)$ avec une ondulation ou oscillation de source de champ lointain $s(t)$. Habituellement, un bruit additionnel est également présent, de sorte que

$$10 \quad x_1(t) = s(t) * g(t) + n_1(t) \quad (1)$$

expression dans laquelle l'astérisque $*$ indique une convolution. On désire extraire $g(t)$ non contaminé par $s(t)$ ou par $n_1(t)$. Toutefois, $n_1(t)$ est normalement inconnu et souvent $s(t)$ ne peut pas être mesuré ou prévu et doit également être considéré comme inconnu.

Puisque $s(t)$, $g(t)$ et $n_1(t)$ sont tous inconnus, le problème de déterminer $g(t)$ à partir de la quantité mesurable $x_1(t)$ est essentiellement celui de la résolution d'une équation contenant trois inconnues. C'est bien
20 entendu irréalisable. Même lorsque le bruit peut être négligé, il reste la difficulté essentielle, c'est-à-dire d'effectuer la déconvolution de $s(t)$ et $g(t)$. A moins de connaître $s(t)$, $g(t)$ ne peut pas être trouvé sans faire de nombreuses suppositions.

Le bruit de $n_1(t)$ est petit, relativement au terme de signal $s(t) * g(t)$, pourvu qu'il y ait une énergie de signal suffisante. Afin d'obtenir un rapport signal/bruit adéquat, il est parfois nécessaire de répéter l'expérience plusieurs fois au même endroit, par exemple jusqu'à un total de p fois avec la même source sonore ou des sources sonores identiques. La série des signaux sismiques reçus $x_1(t)$, $x_2(t)$, ... $x_p(t)$ est additionnée pour former un signal composite $x(t)$, tel

$$35 \quad x(t) = \sum_{i=1}^p x_i(t) \quad (1a)$$

L'équation (1) devient alors $x(t) = p.s(t) * g(t) + n(t)$,

dans laquelle $n(t)$ est un signal de bruit composite donné par

$$n(t) = \sum_{i=1}^p n_i(t)$$

5 Cette somme est connue comme un "empilage vertical" et p est le "nombre de plis" de l'empilage et c'est un nombre entier supérieur ou égal à 1. Le même résultat, ou un résultat semblable, peut parfois être obtenu par émission simultanée de p ondes sonores impulsives, identiques.

10 Si les sources n'interfèrent pas, chacune engendrera une ondulation ou train d'ondes de champ lointain identique $s(t)$ et le signal reçu $x(t)$ sera représenté par l'équation (1a).

Depuis plus de vingt ans, on a cherché à établir des procédés de résolution de l'équation (1) ou (1a) à l'aide de suppositions aussi réalistes que possible. Mais le fait subsiste que ces suppositions sont faites purement pour des facilités mathématiques et ne sont pas des substituts à une information réelle.

20 Le meilleur exemple connu d'un tel procédé est le procédé de filtrage inverse aux moindres carrés dans le domaine de temps, utilisé dans l'industrie. Pour que cette méthode soit applicable, il est nécessaire que :

- 25 (1) $g(t)$ soit une séquence stationnaire, blanche et aléatoire d'impulsions ;
- (2) $s(t)$ soit de phase minimum et ait la même forme sur tout le sismogramme ;
- (3) il n'y ait pas d'absorption.

Toutes ces suppositions sont très strictes et 30 elles doivent toutes être correctes simultanément pour que le procédé convienne. Cette condition est très difficile à satisfaire, en particulier puisque les suppositions ne se renforcent pas mutuellement. Par exemple, si on essaie de satisfaire la supposition de stationnarité, 35 une certaine correction de divergence sphérique doit d'abord être appliquée. Cela a pour effet de déformer irrégulièrement $s(t)$ sur le sismogramme, ce qui invalide

immédiatement la supposition que la forme de $s(t)$ reste constante ; cela introduit également une tendance pour $s(t)$ à être de phase non minimum dans la première partie du sismogramme.

- 5 La présente invention a pour objet un procédé de détermination de la position de limites souterraines dans le sol et/ou des propriétés acoustiques de formations souterraines dans le sol. Le procédé suivant l'invention est caractérisé en ce qu'il consiste à : utiliser
- 10 une ou plusieurs premières sources sonores ponctuelles et une ou plusieurs deuxièmes sources sonores ponctuelles, pour produire respectivement des premières et deuxièmes ondes sonores, l'énergie du rayonnement élastique de la, ou de chaque première, source différant par un
- 15 facteur connu de l'énergie du rayonnement élastique de la ou de chaque deuxième source ; détecter les réflexions des premières et deuxièmes ondes sonores venant de l'intérieur de la terre ; engendrer à partir de ces réflexions respectivement des premiers et deuxièmes signaux sismiques ; et soumettre ces deux signaux sismiques à l'analyse et à la comparaison.

- La présente invention a également pour objet un appareil pour déterminer la position de limites souterraines dans le sol et/ou les propriétés acoustiques de
- 25 formations souterraines dans le sol. L'appareil suivant l'invention est caractérisé en ce qu'il comprend : une ou plusieurs premières sources sonores ponctuelles et une ou plusieurs deuxièmes sources sonores ponctuelles, capables respectivement de produire des premières et deuxièmes
- 30 ondes sonores dans le sol, l'énergie du rayonnement élastique de la ou de chaque première source différant par un facteur connu de l'énergie du rayonnement élastique de la ou de chaque deuxième source ; un récepteur pour détecter les réflexions des premières et deuxièmes ondes sonores venant du sous-sol et engendrer à partir de ces réflexions respectivement des premiers et deuxièmes signaux sismiques ; et des moyens pour analyser et comparer ces
- 35

premiers et deuxièmes signaux sismiques.

Dans la présente invention, les premiers et deuxièmes sources sonores peuvent être des sources sonores ponctuelles individuelles ou bien on peut utiliser une pluralité de sources sonores ponctuelles identiques n'interférant pas, ce qui produit un signal sismique ayant un rapport signal/bruit plus grand. En variante, les moyens de réception peuvent être conçus pour additionner une série de signaux sismiques identiques, obtenus par la production répétée d'ondes sonores identiques au moyen d'une ou de plusieurs sources sonores identiques.

L'expression "source ponctuelle", utilisée dans la présente description, désigne une source dont la dimension maximale est petite, comparée à la plus courte longueur d'onde du rayonnement utile qu'elle engendre. Si cette source est enterrée dans un milieu élastique isotrope homogène, elle engendre un rayonnement sphériquement symétrique, à des distances supérieures à une longueur d'onde environ. C'est la zone de champ lointain dans laquelle toute déformation non sphérique du champ d'ondes à partir de cette source ponctuelle se produit seulement à des fréquences élevées, en dehors de la bande utile.

Le procédé suivant l'invention est applicable pour des sources ponctuelles enterrées, sur terre et en mer. Il ne nécessite aucune des suppositions demandées par les méthodes connues. En particulier, rien n'est supposé en ce qui concerne les différences dans l'amplitude des spectres de phase de $s(t)$ et $g(t)$. La présente invention est basée sur le fait que l'ondulation ou oscillation obéit à une loi de similitude du type :

$$s^1(\tau_2) = \alpha s(\tau_1/\alpha) \quad (2)$$

Dans cette équation, τ_1 et τ_2 sont tous deux presque égaux à $\tau = t - r/c$, où t est le temps mesuré à partir de l'instant de tir, r est la distance de la source sonore à un point du champ lointain et c est la vitesse du son dans le milieu ; $s^1(\tau_2)$ est l'oscillation de champ lointain d'une source semblable à celle qui engendre $s(\tau_1)$

mais qui contient α^3 fois plus d'énergie. La figure 1 illustre schématiquement comment cette loi de similitude de source affecte l'ondulation de champ lointain.

On possède une preuve expérimentale excellente
 5 de l'existence d'une telle loi de similitude pour diverses/^{sources} ponctuelles et cette loi peut facilement être étendue pour des explosifs, par exemple, si on fait les suppositions suivantes :

- i. Le rayonnement élastique de la source possède une
 10 symétrie sphérique ; ainsi, la loi est applicable à la plupart des sources marines, par exemple un canon pneumatique unique, un canon à eau unique, un explosif marin tel que celui qui est connu sous la marque "Maxipulse", une source marine utilisant de la vapeur à haute
 15 pression pour provoquer une implosion, par exemple le dispositif connu sous la marque "Vaporchoc", ou un éclateur, et à des explosifs enterrés sur la terre ferme, mais probablement pas à des sources de surface car leur rayonnement n'est pas sphériquement symétrique ;
- 20 ii. la fraction de l'énergie totale disponible emmagasinée dans l'explosif qui est transformée en rayonnement élastique est une constante, pour un type donné d'explosif et un milieu donné ;
- iii. le volume de l'explosif peut être négligé par rapport
 25 au volume de la sphère de déformation anélastique produite par l'explosion ;
- iv. le rayonnement élastique produit par l'explosion peut être obtenu par remplacement de la sphère de déformation anélastique par une cavité à l'intérieur de laquelle
 30 est appliquée une fonction $P(t)$ de pression dépendant du temps, $P(t)$ étant indépendant de la masse de l'explosif et constant pour des explosifs de même composition chimique dans le même milieu ;
- v. τ_1 , pour une explosion d'une première masse, et
 35 τ_2 , pour une explosion d'une deuxième masse, peuvent être considérés comme sensiblement égaux et égaux à τ . Cette relation est suffisamment précise si l'intervalle de

temps $\Delta\tau$ entre τ_1 et τ_2 ne peut pas être observé à l'intérieur de la bande de fréquence concernée. Autrement dit, $\Delta\tau$ doit être inférieur à environ un intervalle d'échantillonnage. Cette approximation suffit pour des valeurs
 5 de α jusqu'à environ 5 ou à peu près.

Pour exploiter la loi de similitude, on engendre un signal sismique $x(t)$, comme décrit par l'équation (1a). L'expérience est ensuite répétée au même endroit au moyen d'une source du même type mais contenant α^3 fois plus d'
 10 énergie. Cela engendre un sismogramme :

$$x^1(t) = qs^1(t) * g(t) + n^1(t) \quad (3)$$

dans lequel $s^1(t)$ est l'ondulation de champ lointain de la source et est défini dans l'équation (2) ; $g(t)$ est le même que dans l'équation (1) puisque c'est la réponse du
 15 sol à une impulsion au même endroit ; le bruit $n^1(t)$ peut être différent de $n(t)$ dans l'équation (1a) ; q est un entier connu supérieur ou égal à 1 et qui peut être différent de p dans l'équation (1a).

On considère l'ensemble de ces équations dans le
 20 cas où le bruit est assez petit pour être négligé :

$$x(t) = ps(t) * g(t) \quad (4)$$

$$x^1(t) = qs(t) * g(t) \quad (5)$$

$$s^1(t) = \alpha s(t/\alpha) \quad (2)$$

Dans ces trois équations indépendantes, il y a
 25 trois inconnues : $s(t)$, $s^1(t)$ et $g(t)$. Par conséquent, en principe, lorsque le bruit est négligeable, on peut résoudre exactement les trois équations sans faire d'autres suppositions.

En procédant à des transformations de Fourier
 30 et par manipulation, on obtient l'équation :

$$qS(\alpha f) = \frac{P}{2} S(f) \cdot R(f) \quad (6)$$

L'équation (6) suggère un algorithme récursif
 de la forme :

$$qS(\alpha^n f_0) = \frac{P}{\alpha^2} S(\alpha^{n-1} f_0) R(\alpha^{n-1} f_0) \quad (7)$$

35

$$n = 1, 2, \dots, N$$

dans lequel N est déterminé par la plus haute fréquence

intéressante et le processus peut être commencé avec une hypothèse ou choix à f_0 . Si $\alpha > 1$, l'équation (7) permet de trouver le spectre par calcul des valeurs à αf_0 , $\alpha^2 f_0$, ..., $\alpha^N f_0$, lorsqu'on commence avec un choix à f_0 .

5 Pour calculer les valeurs à des fréquences inférieures à f_0 , l'équation (6) peut être réarrangée :

$$pS(f) = q\alpha^2 S(\alpha f)/R(f)$$

de sorte qu'on obtient la récursion :

$$pS(f_0/\alpha^n) = q\alpha^2 S(f_0/\alpha^{n-1})/R(f_0/\alpha^n)$$

$$10 \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

dans laquelle M est déterminé par la plus basse fréquence intéressante. Cela permet maintenant de calculer les valeurs à des fréquences f_0/α , f_0/α^2 , ... f_0/α^M .

Ainsi, à partir des schémas de récursion des
15 équations (7) et (8), on peut obtenir des valeurs à des fréquences f_0/α^M , f_0/α^{M-1} , ..., f_0/α , f_0 , αf_0 , ..., $\alpha^N f_0$.

On peut maintenant utiliser un processus d'interpolation pour trouver une valeur à une autre fréquence spécifiée, par exemple f_1 , et utiliser la récursion pour calculer les valeurs à αf_1 , $\alpha^2 f_1$, etc. Cette
20 procédure est répétée jusqu'à ce qu'on ait calculé suffisamment de valeurs. Une fois que $S(f)$ a été calculé, $s(t)$ est obtenu par inversion de la transformation de
25 Fourier.

Il faut noter que les quantités impliquées dans l'algorithme sont complexes. On peut travailler soit avec le module (amplitude) et l'argument (phase), soit avec les parties réelles et imaginaires. Les parties
30 réelles et imaginaires ont été utilisées dans l'exemple, car elles sont considérées comme étant les composants les plus "basiques" des nombres complexes dans un calculateur, tandis que l'amplitude et la phase sont des mélanges de ces quantités.

35 Choix initial

L'algorithme commence avec un choix. Si ce choix est faux, le résultat final sera faux. Le choix à

9

f_0 est un nombre complexe qui, selon toute probabilité, n'est pas la vraie valeur à f_0 . En fait, le choix $S_G(f_0)$ est lié à la vraie valeur $S(f_0)$, de la façon suivante :

$$S_G(f_0) = re^{i\theta} S(f_0) \quad (9)$$

5 dans laquelle : $re^{i\theta}$ est le facteur d'erreur complexe inconnu. Si cette erreur n'est pas prise en compte, on obtient les valeurs :

$$qS_G(\alpha^n f_0) = \frac{P}{\alpha^2} S_G(\alpha^{n-1} f_0) R(\alpha^{n-1} f_0)$$

$$10 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

ce qui, avec une interpolation suffisante, fournit la fonction $S_G(f_0)$ pour $f_0/\alpha^M \leq f \leq f_0$. La plage peut être étendue à l'origine par définition de $S_G(0)=0$, ce qui est compatible avec une série de temps $S_G(t)$ avec un

15 moyen de zéro.

L'effet de l'erreur initiale peut être constaté par substitution de l'équation (9) dans l'équation (10) ; ainsi :

$$20 \quad qS_G(\alpha^n f_0) = qre^{i\theta} S(\alpha^n f_0) \\ = \frac{P}{\alpha^2} re^{i\theta} S(\alpha^{n-1} f_0) R(\alpha^{n-1} f_0) \quad (11)$$

Il est évident que le facteur d'erreur est constant pour toutes les valeurs déduites de l'algorithme. Jusque là, l'algorithme a permis les calculs de la

25 fonction :

$$S_G(f) = re^{i\theta} S(f), \quad (0 \leq f \leq \alpha^N f_0) \quad (12)$$

dans laquelle on a supposé que f_0 est positif.

On rencontre alors deux problèmes. Premièrement, la transformation doit être complétée par l'élaboration des valeurs de $S_G(f)$ à des fréquences négatives. Deuxièmement, il faut trouver le facteur d'erreur pour obtenir $S(f)$ à partir de l'équation (12). Ces deux problèmes peuvent être résolus par la considération des propriétés physiques de $s(t)$, ce qui impose des contraintes sur les propriétés de $S(f)$.

35

On sait que $s(t)$ est réel et par conséquent l'oscillation estimée doit être réelle. Cette contrainte

impose une symétrie Hermitienne sur $S(f)$. Par suite, les parties réelles et imaginaires de $S(f)$ doivent être des fonctions paires et impaires, respectivement. Ainsi, si $S(f)$ est connu pour des fréquences positives, $S(f)$ peut
 5 facilement être calculé pour des fréquences négatives, par l'utilisation de cette condition.

Toutefois, on connaît seulement $S_G(f)$ qui est inexact d'un écart de phase Θ et d'un facteur d'échelle r . Le facteur d'échelle n'est pas important car il n'a
 10 pas d'effet sur la forme de $s(t)$ et par conséquent il ne peut pas affecter l'estimation de la forme de $g(t)$. Il peut donc être négligé.

Par contre, l'erreur de phase Θ ne peut pas être négligée, car cela rendrait $S_G(t)$ non causale et
 15 on sait que $s(t)$ est causale. Autrement dit, $s(t)$ est zéro pour les temps t inférieurs à zéro. Dans le domaine de fréquence, la causalité impose la condition que les parties impaires et paires de la transformation de Fourier soient une paire de transformations de Hilbert.
 20 On peut montrer que cette relation causale est détruite sauf si l'erreur de phase Θ est zéro.

Cette considération suggère une procédure d'essai-et-erreur pour améliorer l'estimation de $s(t)$.

On procède comme suit :

25 1. Calculer $S_G(f)$ à partir d'un choix initial à f_0 comme décrit plus haut, sachant que $S_G(f)$ et $S(f)$ sont liés ^{comme} dans l'équation (12).

2. Multiplier $S_G(f)$ par un facteur de correction $e^{-i\Theta_G}$ dans lequel Θ_G est un choix.

30 3. Imposer une symétrie Hermitienne.

4. Vérifier la causalité. Si l'ondulation retrouvée est non causale, revenir à l'opération 2, et recommencer avec Θ_G différent. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que la condition de causalité soit vérifiée.

35 Ainsi, les équations peuvent être résolues dans le domaine de fréquence, au moyen de l'algorithme décrit ci-dessus et par application des contraintes qui

découlent de deux propriétés physiques de $s(t)$: elle est réelle et causale. L'estimation finale de $s(t)$ sera erronée seulement par un facteur de similitude r , ce qui est sans importance. Ayant obtenu une estimation satisfaisante de $s(t)$, on peut obtenir $g(t)$ au moyen de l'équation (1), par des méthodes connues.

L'algorithme décrit dépend d'une division complexe dans le domaine de fréquence. Deux problèmes y sont associés. Premièrement, le rapport devient instable à toute fréquence à laquelle l'amplitude du dénominateur est trop petite. Deuxièmement, si le dénominateur contient des composants à non minimum de phase qui ne sont pas contenus dans le numérateur, le quotient devient alors instable en ce sens qu'il est non réalisable.

Pour résoudre la première difficulté, il est habituel d'ajouter un petit seuil de bruit blanc au dénominateur pour éviter la possibilité d'une division par zéro ou près de zéro. Une autre méthode, qui demande davantage de temps, consiste à rechercher les faibles valeurs au dénominateur et à les remplacer par de petites valeurs positives.

Trouver l'inverse d'ondulations à non minimum de phase est un problème bien connu. Toutefois, la difficulté peut être évitée simplement par application d'une convergence exponentielle de la forme $e^{-\gamma t}$ à la fois à $x(t)$ et $x^1(t)$. Si on choisit γ suffisamment grand, on peut forcer le quotient $R(f)$ à être stable mais alors les estimations de $s(t)$, $s^1(t)$ et $g(t)$ seront déformées. En pratique, la déformation peut être éliminée simplement par application de la convergence inverse $e^{\gamma t}$ à ces fonctions.

En présence de bruit, la difficulté réside dans l'obtention d'une estimation sûre du spectre de rapport $R(f)$, car dans ce cas la loi de similitude et l'algorithme récursif peuvent être utilisés pour trouver $S(f)$, comme décrit plus haut.

A partir de l'équation (6), on définit $R(f)$

en l'absence de bruit, comme : 12

$$R(f) = \frac{x^1(f)}{X(f)} = \frac{qS^1(f)}{pS(f)} \quad (13)$$

5 il en résulte que :

$$s^1(t) = r(t) * s(t) \quad (14)$$

dans laquelle $r(t)$ est la transformation de Fourier inverse de $R(f)$ et, puisque $s(t)$ et $s^1(t)$ sont toutes deux réelles et causales, $r(t)$ doit également être réelle. Toutefois, 10 $r(t)$ ne sera pas causale sauf si $s(t)$ est à minimum de phase. A la fois $s(t)$ et $s^1(t)$ doivent être rendues obligatoirement à minimum de phase, par application de la convergence exponentielle à $x(t)$ et $x^1(t)$, comme décrit plus haut. Dans ces conditions, $r(t)$ sera réelle et causale.

15 Dans le cas où il n'y a pas de bruit, il est également vrai que

$$x^1(t) = r(t) * x(t) \quad (15)$$

et on voit que $r(t)$ est simplement un filtre unilatéral qui transforme $x(t)$ en $x^1(t)$, à condition que la convergence exponentielle correcte ait été appliquée. Lorsque 20 le bruit est présent, l'estimation de $r(t)$ doit être stabilisée et cela peut être effectué facilement au moyen d'une approche des moindres carrés (N. Levinson, dans N. Wiener, 1947, Extrapolation, Interpolation et régularisation des séries de temps stationnaires, Wiley, New York). Autrement dit, on trouve un filtre $r^1(t)$ qui, pour une sortie $x(t)$, donne une sortie qui concorde le mieux dans un contrôle des moindres carrés à $x^1(t)$. Ce 25 filtre $r^1(t)$ est la meilleure estimation de $r(t)$.

30 Autrement dit, en présence de bruit, $r(t)$ peut être calculé dans le domaine de temps au moyen de programmes usuels, puis subir une transformation de Fourier, de sorte que $s(t)$, etc. peut être déterminé comme décrit précédemment.

35 Il est entendu que, bien que le problème ait été décrit en termes d'énergies semblables du rayonnement élastique des sources, normalement les vitesses

de particules ou les pressions sonores engendrées par la source peuvent être détectées et enregistrées au moyen respectivement d'un géophone ou d'un hydrophone, de façon usuelle.

5 Il est entendu également que les éléments individuels de l'appareil suivant l'invention peuvent être choisis à volonté de manière à convenir à l'application particulière pour laquelle ils sont destinés. Ainsi, on peut employer comme sources des canons à air, des canons à
10 eau, des dispositifs "Maxipulse", ou "Vaporchoc", des éclateurs, etc. De même, on peut utiliser tout analyseur ou récepteur approprié aux besoins.

On considère que α peut avoir une valeur de 1,1 à 5, et de préférence de 1,5 à 3.

15 EXEMPLE

On applique le schéma ci-dessus de déconvolution d'oscillation ou d'ondulation, à un exemple synthétique.

On engendre deux ondulations synthétiques indépendantes
20 de source de champ lointain, comme représenté sur la figure 2. Chaque ondulation ou oscillation est calculée au moyen d'un modèle, comme décrit dans le Journal de Géophysique de la Royal Astronomical Society 21, 137-161, pour le signal engendré par un canon à air dans l'eau.
25 Le modèle est basé sur les oscillations non linéaires d'une bulle sphérique dans l'eau et prend en compte les effets élastiques non linéaires au voisinage de la bulle. Le modèle prédit des formes d'onde qui correspondent de très près aux mesures.
30 L'oscillation $s(t)$ du haut de la figure 2 est calculée pour un canon de 164 cm^3 , à une profondeur de 9 mètres, une pression de feu de 140 bars et une distance de 150 mètres à partir du canon. Aucune réflexion à la surface de la mer n'est incluse. L'oscillation $s^1(t)$ du bas de
35 la figure 2 est calculée au moyen du même programme de calculateur, pour un canon de 1310 cm^3 , aux mêmes profondeur, pression de feu et distance. Autrement dit,

seul le volume est différent.

Chacune de ces oscillations est ensuite soumise à une convolution avec la série de réflectivité synthétique $g(t)$ représentée sur la figure 3. Le résultat de ces convolutions est représenté sur la figure 4. Le tracé supérieur $x(t)$ représente la convolution de $g(t)$ avec l'oscillation supérieure $s(t)$ de la figure 1 ; le tracé inférieur $x^1(t)$ représente la convolution de $g(t)$ avec l'oscillation inférieure $s^1(t)$ de la figure 1. Ainsi, ces deux tracés $x(t)$ et $x^1(t)$ sont construits entièrement indépendamment sans aucune utilisation de la loi de similitude.

On suppose ensuite que ces deux tracés ont été obtenus sachant seulement qu'ils proviennent du même endroit et que le tracé supérieur a été obtenu au moyen d'un canon de 164 cm^3 , tandis que le tracé inférieur a été obtenu avec un canon de 1310 cm^3 à la même profondeur et à la même pression. Puisque seul le volume du canon diffère, la loi de similitude peut être invoquée. Dans ce cas, α^3 égal 8 ; par conséquent $\alpha = 2$.

On procède à la résolution de $s(t)$ et $g(t)$ comme décrit plus haut, au moyen du groupe d'équations simultanées (4) (5) et (2) avec $p = q = 1$, et substitution de $\alpha = 2$. L'oscillation reconstituée et la série de réflectivité sont représentées sur la figure 5. Elles sont très comparables à l'oscillation supérieure de la figure 2 et à la série de réflectivité initiale de la figure 3. La petite différence entre les tracés reconstitués et les originaux sont attribués principalement à une erreur de valeurs arrondies du calculateur. Cet exemple montre que le procédé est valable dans son principe.

Ainsi, on voit que la présente invention permet en l'absence de bruit d'obtenir exactement la réponse impulsionnelle du sol. En présence de bruit, on peut obtenir une approximation stable de cette réponse impulsionnelle, la précision de cette approximation dépendant du niveau de bruit présent.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de détermination de la position de limites
souterraines dans le sol et/ou des propriétés acoustiques
de formations souterraines dans le sol, caractérisé en ce
qu'il consiste à : utiliser une ou plusieurs premières
5 sources sonores ponctuelles et une ou plusieurs deuxièmes
sources sonores ponctuelles pour produire des premières
et deuxièmes ondes sonores, l'énergie du rayonnement élas-
tique de la ou de chaque première source différant par
un facteur connu de l'énergie du rayonnement élastique de
10 la ou de chaque deuxième source ; détecter les réflexions
des premières et deuxièmes ondes sonores provenant de l'
intérieur du sol ; engendrer à partir de cette détection
respectivement des premiers et deuxièmes signaux sismi-
ques ; et soumettre ces deux signaux sismiques à l'ana-
15 lyse et à la comparaison.

2. Procédé suivant la revendication 1, caractérisé
ence qu'une pluralité de signaux identiques sont addition-
nés pour engendrer le premier signal sismique, cette plu-
ralité de signaux sismiques identiques étant de préférence
20 obtenue par production d'une série d'ondes sonores identi-
ques au moyen d'une ou plusieurs sources sonores identi-
ques.

3. Procédé suivant la revendication 1 ou 2, carac-
térisé en ce qu'une pluralité de signaux sismiques iden-
25 tiques sont ajoutés pour engendrer le deuxième signal
sismique, cette pluralité de signaux sismiques identiques
étant de préférence obtenue par production d'une série d'
ondes sonores identiques au moyen d'une ou plusieurs sour-
ces sonores identiques.

30 4. Procédé suivant la revendication 1, caractérisé
en ce qu'une pluralité de sources sonores identiques, sans
interaction mutuelle, sont employées simultanément pour
produire la première onde sonore.

5. Procédé suivant la revendication 1 ou 4, caracté-
35 risé en ce qu'une pluralité de sources sonores identiques,

sans interaction mutuelle, sont employées simultanément pour produire la deuxième onde sonore.

6. Procédé suivant l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que chaque source sonore comprend un canon à air, un canon à eau, un générateur d'explosion de type marin ou de type enterré sur terre ferme, une source marine du type à implosion ou un éclateur.

7. Procédé suivant l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ledit facteur connu est de 1,33 à 125, et de préférence de 3,375 à 27.

8. Appareil pour la mise en oeuvre du procédé suivant la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend : une ou plusieurs premières sources ^{sonores}/ponctuelles et une ou plusieurs deuxièmes sources sonores ponctuelles, capables respectivement de produire des premières et deuxièmes ondes sonores dans le sol, l'énergie du rayonnement élastique émis par la ou chaque première source différant par un facteur connu de l'énergie du rayonnement élastique émis par la ou chaque deuxième source ; des moyens de réception, pour détecter les réflexions des premières et deuxièmes ondes sonores venant de l'intérieur du sol et engendrer à partir de cette détection respectivement des premiers et deuxièmes signaux sismiques ; et des moyens pour analyser et comparer les premiers et les deuxièmes signaux sismiques.

9. Appareil suivant la revendication 8, caractérisé en ce que la première source sonore comprend une ou plusieurs sources sonores identiques disposées pour produire une série d'ondes sonores identiques, et en ce que le récepteur comprend des moyens de sommation de la série d'ondes sonores identiques pour produire le premier signal sismique.

10. Appareil suivant la revendication 8 ou 9, caractérisé en ce que la deuxième source sonore comprend une ou plusieurs sources sonores identiques, disposées pour produire une série d'ondes sonores identiques, et en ce

que le récepteur comprend des moyens de sommation de la série d'ondes sonores identiques pour produire le deuxième signal sismique.

11. Appareil suivant la revendication 8, caractérisé
5 en ce que la première source sonore comprend une pluralité de sources sonores ponctuelles identiques, sans interaction mutuelle, disposées pour produire simultanément la première onde sonore.

12. Appareil suivant la revendication 8 ou 11, caractérisé
10 en ce que la deuxième source sonore comprend une pluralité de sources sonores ponctuelles identiques sans interaction mutuelle, disposées pour produire simultanément la deuxième onde sonore.

13. Appareil suivant l'une quelconque des revendications 8 à 12, caractérisé en ce que ledit facteur
15 connu est compris entre 1,33 et 125, et de préférence entre 3,375 et 27.

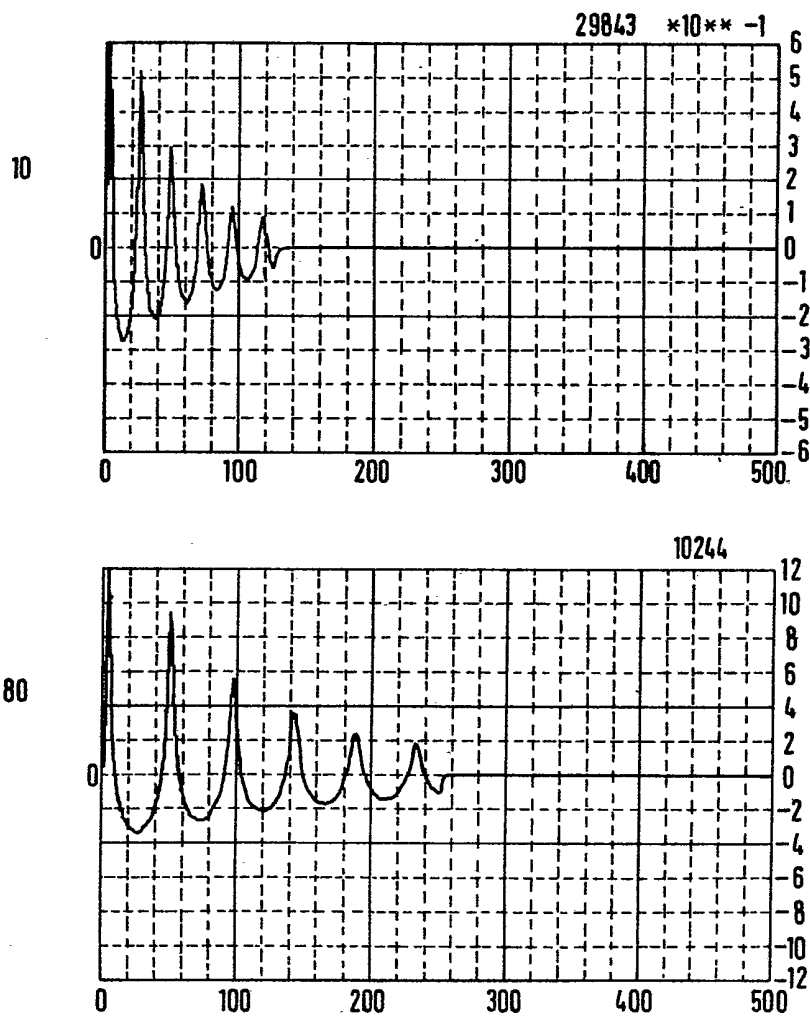
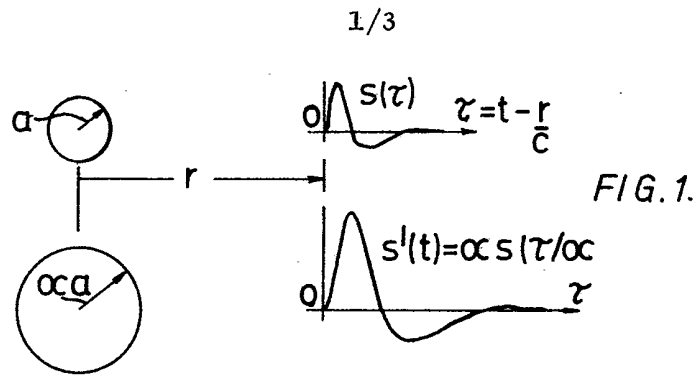


FIG.2.

2/3

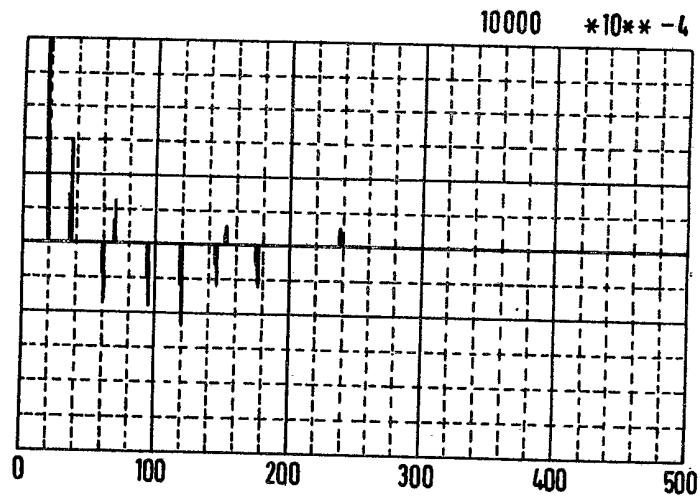


FIG.3.

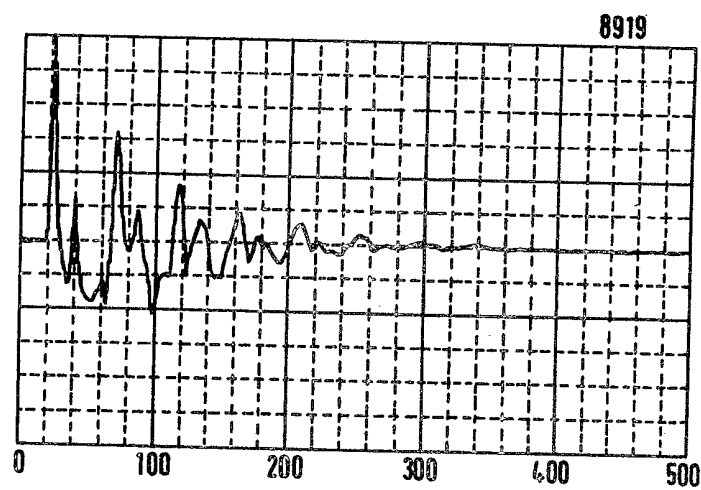
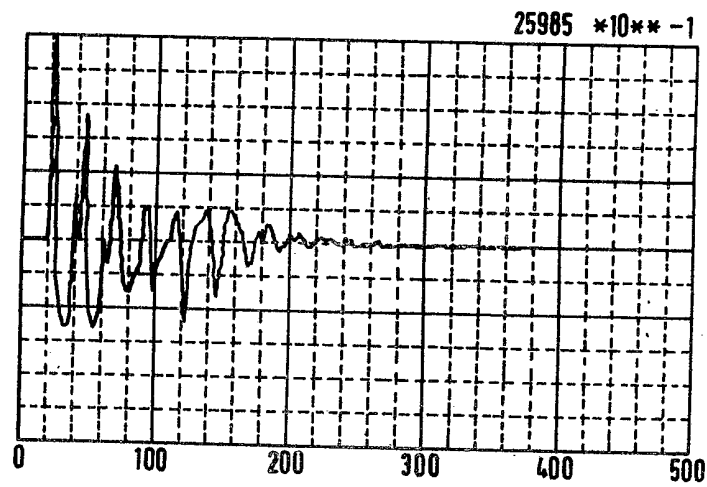


FIG.4.

3/3

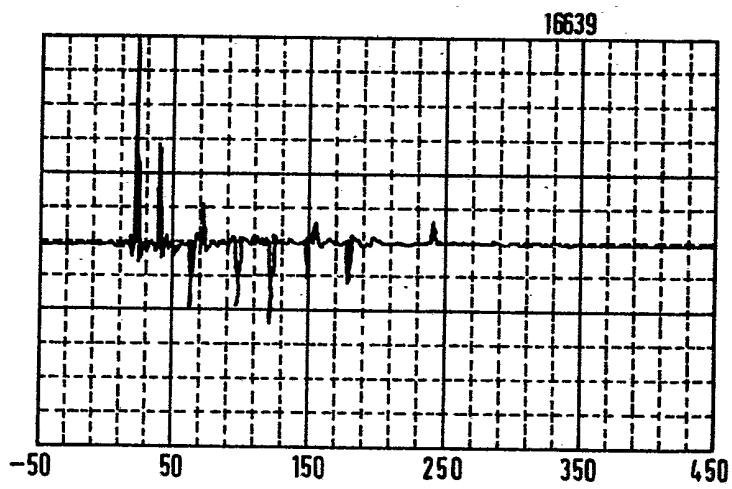
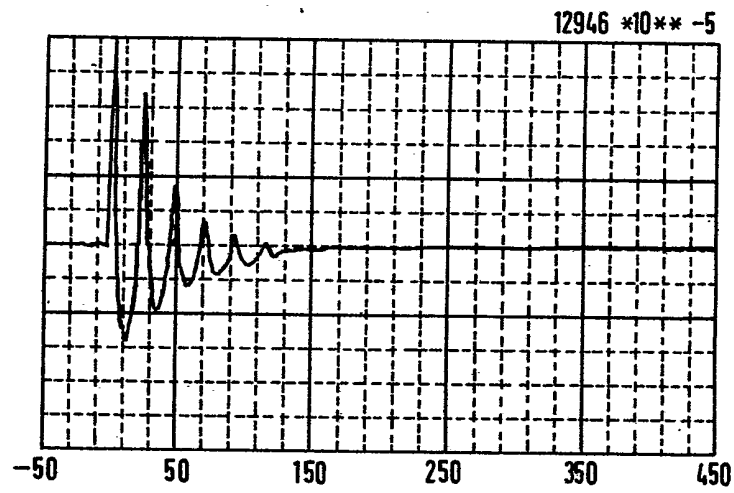


FIG. 5.