

A1

**DEMANDE  
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

**N° 81 16723**

---

(54) Dispositif d'exploration sismique utilisant des détecteurs de pression et de vitesse.

(51) Classification internationale (Int. Cl.<sup>3</sup>). G 01 V 1/38.

(22) Date de dépôt..... 2 septembre 1981.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée : *EUA*, 2 septembre 1980, n° 182,916 et 25 août 1981, n° 295 966.

(41) Date de la mise à la disposition du  
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 9 du 5-3-1982.

---

(71) Déposant : Société dite : MOBIL OIL CORPORATION, résidant aux EUA.

(72) Invention de : William Harold Ruehle.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Cabinet Beau de Loménie,  
55, rue d'Amsterdam, 75008 Paris.

---

La présente invention concerne les explorations sismiques et, plus particulièrement, les explorations dans lesquelles on souhaite supprimer les réflexions fantômes dues aux ondes de raréfaction se déplaçant vers le bas.

5 De manière classique, l'exploration sismique terrestre et marine utilise des géophones ou des hydrophones qui produisent un signal sous l'effet de la pression. Le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 346 838 décrit un exemple de détecteur sensible à la pression. Un autre type de détecteur réagit à la vitesse des  
10 particules du milieu entourant le détecteur. Selon le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 2 982 942, trois détecteurs sensibles à la vitesse sont montés dans une station d'écoute. Un détecteur sensible à la pression est placé au même endroit. Les signaux de ces détecteurs donnent l'amplitude et la direction de l'énergie  
15 acoustique frappant les détecteurs.

Dans l'exploration sismique, l'énergie est réfléchiée par des interfaces souterraines et on la détecte pour produire des sismogrammes. On veut n'enregistrer que les réflexions primaires, qui sont des ondes de compression se déplaçant vers le haut par  
20 suite d'une réflexion de l'énergie sismique sur une interface souterraine. D'autres réflexions telles que les réflexions multiples et fantômes embrouillent le sismogramme. Une réflexion particulièrement gênante est constituée par la réflexion fantôme renvoyée par la surface. La réflexion fantôme se déplace vers le bas sous la  
25 forme d'une onde de raréfaction. Selon l'invention, on supprime les réflexions fantômes en combinant les signaux de sortie de détecteurs de pression et de vitesse.

L'invention propose un dispositif de détection sismique permettant de supprimer les réflexions fantômes relatives aux ré-  
30 flexions primaires dans l'exploration sismique, où une réflexion primaire est due à une onde de compression se déplaçant vers le haut et une réflexion fantôme est due à une onde de raréfaction se déplaçant vers le bas à partir de la surface, le dispositif comprenant :

35 un détecteur de pression qui produit un signal positif en réponse à une onde de compression se déplaçant vers le haut et

un signal négatif en réponse à une onde de raréfaction se déplaçant vers le bas;

un détecteur de vitesse qui produit un signal positif en réponse à une onde de compression se déplaçant vers le haut et  
5 un signal positif en réponse à une onde de raréfaction se déplaçant vers le bas;

des moyens de filtrage permettant de modifier le contenu de fréquence d'au moins l'un des signaux de façon à annuler les signaux produits par la réflexion fantôme;

10 des moyens d'addition des signaux des détecteurs de pression et de vitesse, grâce auxquels on annule sensiblement les signaux produits en réponse à la réflexion fantôme; et

des moyens permettant de disposer les détecteurs de pression et de vitesse à proximité immédiate d'une ligne d'exploration sismique.  
15

De préférence, ce dispositif comprend en outre un moyen permettant de modifier les gains des signaux afin d'annuler les signaux produits en réponse à la réflexion fantôme. De manière avantageuse, les moyens de filtrage possèdent un opérateur de déconvolution qui est l'inverse de la distorsion introduite par les  
20 détecteurs de pression et de vitesse.

Selon l'aspect de l'invention, on place une série de plusieurs détecteurs sur le fond de l'océan dans un système d'exploration sismique sous-marine. On apparie les détecteurs à raison  
25 d'un détecteur de pression et d'un détecteur de vitesse dans chaque paire. Les détecteurs de pression produisent un signal positif en réponse aux ondes de compression se déplaçant vers le haut et un signal négatif en réponse aux ondes de raréfaction se déplaçant vers le bas. Le détecteur de vitesse produit un signal positif en réponse  
30 aux ondes de compression se déplaçant vers le haut et un signal positif en réponse aux ondes de raréfactions se déplaçant vers le bas. On soumet ces signaux à un filtrage inverse au moyen de filtres qui ont les caractéristiques inverses de la réponse d'impulsion des distorsions de chaque signal. Les signaux de ces filtres comportent  
35 des impulsions positives pour la réponse des deux détecteurs aux ondes de compression se déplaçant vers le haut et une réponse d'impulsion positive, par le détecteur de vitesse, à l'onde de raréfaction

se déplaçant vers le bas, ainsi qu'une réponse d'impulsion négative, par le détecteur de pression, à l'onde de raréfaction se déplaçant vers le bas. Cette impulsion négative annule la réponse d'impulsion positive du détecteur de vitesse vis-à-vis de la réflexion fantôme.

5           La description suivante, conçue à titre d'illustration de l'invention, vise à donner une meilleure compréhension de ses caractéristiques et avantages; elle s'appuie sur les dessins annexés, parmi lesquels :

- 10           - la figure 1 montre un système d'exploration sismique sous-marine;
- les figures 2A et 2B illustrent respectivement les réponses d'un détecteur de pression et d'un détecteur de vitesse;
- la figure 3 montre les détecteurs de pression et de vitesse combinés, les filtres et les moyens de modification de gain;
- 15           - les figures 4A à 4C montrent les réponses d'impulsion des deux filtres et la réponse d'impulsion du signal combiné dans le domaine de la fréquence; et
- les figures 5A à 5C sont des représentations temporelles des figures 4A à 4C.

20           Comme on peut le voir sur la figure 1 des dessins, un navire 11 remorque des sources d'impulsions sismiques sous-marines 11A à 11D le long d'une ligne d'exploration. Des détecteurs sismiques 14 à 17 sont placés au fond de l'océan. L'énergie sismique venant des sources 11A à 11D est envoyée en direction du fond 12 et est réflé-

25           chie par une interface souterraine 13. La série de détecteurs 14 à 17 détecte les réflexions. Chaque détecteur comporte un détecteur de pression 14a à 17a et un détecteur de vitesse 14b à 17b (voir figure 3). L'énergie sismique réfléchie par l'interface 13 se déplace suivant la trajectoire 18. Cette réflexion primaire est une onde

30           de compression se déplaçant vers le haut.

            Pour comprendre les différences de polarité de l'effet de profondeur sismométrique, on considère une impulsion de pression positive 18 se déplaçant verticalement vers le haut depuis l'interface 13 en direction du détecteur 14 se trouvant à une profondeur d

35           au-dessous de la surface de l'eau. A un instant  $t = 0$ , l'impulsion arrive au détecteur 14. Elle poursuit son chemin jusqu'à la surface

où elle est réfléchiée et revient au détecteur 14 à un instant  $\tau_d$ , où  $\tau_d$  est le temps d'aller-retour entre le détecteur 14 et la surface, ce qui peut être exprimé de la manière suivante :

$$\tau_d = 2d/c,$$

- 5 où  $c$  est la vitesse de propagation de l'impulsion dans l'eau. La surface de l'eau est une surface libre, si bien que les conditions aux limites imposent une pression totale nulle. Si l'amplitude de l'onde montante 18 est  $a_1$  et celle de l'onde descendante 19 est  $a_2$ , les conditions aux limites peuvent s'écrire de la manière suivante :

10 
$$a_1 + a_2 = 0.$$

Par conséquent, l'amplitude de l'impulsion descendante est  $-a_1$ , ce qui est l'état ordinaire de l'inversion de polarité à la réflexion d'une surface libre.

- La réponse du détecteur de pression 14a se trouvant à  
15 la profondeur  $d$  vis-à-vis d'une onde montante est donc une paire d'impulsions, dont l'une est positive à  $t=0$  et l'autre est négative à  $t=\tau_d$ , comme cela est illustré sur la figure 5A.

- La réponse du détecteur de vitesse 14b est quelque peu  
différente. Les conditions aux limites de la surface sont que les  
20 vitesses montante et descendante peuvent être égales, soit, en d'autres termes, que la vitesse double à la surface. La vitesse montante s'écrit sous forme d'un vecteur  $\vec{v}_1$  et la vitesse descendante sous celle d'un vecteur  $\vec{v}_2$ , et il existe l'égalité suivante :

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2$$

- 25 La réponse du détecteur de vitesse à la profondeur  $d$  est donc donnée par une paire d'impulsions d'unités du même signe, séparées par une durée  $\tau_d$ , ainsi que cela est illustré sur la figure 5B.

- L'autre partie de l'effet des couches d'eau est le train de réverbération et est identique pour les deux types d'hydrophones.  
30 La réponse à la réflexion sur la surface est différente pour les deux détecteurs, comme cela est illustré sur les figures 2A et 2B.

Il est intéressant de noter que, pour des réponses idéales à la réflexion sur la surface, si l'on enregistre, on étalonne et on additionne les signaux des deux hydrophones, alors l'effet de profondeur de l'hydrophone doit s'annuler pour les ondes se déplaçant verticalement.

Les réponses d'impulsion des réflexions à la surface de l'eau pour les deux hydrophones ont un effet de filtrage de fréquence que l'on peut facilement examiner en prenant la transformée de Fourier des réponses. Pour la transformée de la réponse du détecteur de vitesse, on annote  $G_v(f)$ , où

$$\begin{aligned} G_v(f) &= 1 + e^{-2\pi i f \tau_d} \\ &= e^{-\pi i f \tau_d} (e^{\pi i f \tau_d} + e^{-\pi i f \tau_d}) \\ &= (2e^{-\pi i f \tau_d}) \cos \pi f \tau_d, \end{aligned}$$

et, pour la transformée de la réponse du détecteur de pression, on annote  $G_h(f)$  où :

$$\begin{aligned} G_h(f) &= 1 - e^{-2\pi i f \tau_d} \\ &= e^{-\pi i f \tau_d} (e^{\pi i f \tau_d} - e^{-\pi i f \tau_d}) \\ &= (2ie^{-\pi i f \tau_d}) \sin \pi f \tau_d. \end{aligned}$$

La phase est donc constituée de plusieurs parties. Le facteur  $e^{-\pi i f \tau_d}$  est commun aux deux et ne produit aucun déphasage entre les deux.

On peut le considérer comme un composant de phase linéaire qui décale le filtre à partir d'une étendue temporelle symétrique autour de  $t=0$  pour en faire un filtre causal, le décalage étant de  $\tau_d/2$  dans le temps. La composante de phase du détecteur de vitesse qui est associée à  $\cos \pi f \tau_d$  est nulle jusqu'à la première annulation du cosinus, puis elle vaut  $\pi$  jusqu'à la deuxième annulation, et ainsi de suite. La transformée de la réponse du détecteur de pression est purement imaginaire et est donc associée à un déphasage de  $90^\circ$ . La composante  $\sin \pi f \tau_d$  produira aussi des déphasages de  $\pi$  aux passages par zéro. On obtient les deux spectres d'amplitude à partir de l'amplitude des transformées de Fourier :

$$|G_v(f)| = \sqrt{2} (1 + \cos 2\pi f \tau_d)^{1/2} = 2 |\cos \pi f \tau_d|,$$

$$|G_h(f)| = \sqrt{2} (1 - \cos 2\pi f \tau_d)^{1/2} = 2 |\sin \pi f \tau_d|.$$

Des graphes des réponses d'amplitude sont présentés sur la figure 4A et 4B.

- 5 Sur la base des spectres d'amplitude, on peut noter que la réponse de basse fréquence du détecteur de vitesse est beaucoup plus grande que celle du détecteur de pression, si bien que l'on prévoit qu'un plus grand contenu de basse fréquence sera probable sur l'enregistrement de l'hydrophone de vitesse. On note également
- 10 que le déphasage entre les deux types d'hydrophones est de  $90^\circ$ , mais qu'il commence par une avance de  $90^\circ$  pour le détecteur de pression à  $f = 0$  et saute à un retard de  $90^\circ$  au premier zéro de la réponse du détecteur de vitesse. Dans la gamme de fréquence intéressant les données sismiques de réflexion, l'effet de filtrage de la profondeur
- 15 des hydrophones produit un déphasage apparent de  $90^\circ$  pour les données.

- L'effet de filtre correspondant à la profondeur des sismomètres n'est pas à la phase minimale. Pour les deux types de détecteur, il y a un zéro sur le cercle unité du domaine de la transformée  $z$ . Ceci implique qu'il n'existe pas d'inverse stable. Toutefois, même pour le réflecteur de surface parfait idéalisé, on peut
- 20 obtenir une bonne approximation en stabilisant un opérateur de déconvolution au moyen de l'addition d'une faible quantité de bruit blanc au retard zéro de la fonction d'autocorrélation avant le calcul de l'opérateur. De plus, le coefficient de réflexion efficace à la
- 25 surface est probablement d'une amplitude inférieure à l'unité, puisque la surface de l'eau est quelque peu irrégulière en raison de l'action des vagues. Ceci signifie que l'effet de profondeur réel n'est pas précisément un déphasage de  $90^\circ$  et qu'il est une phase minimale. Une déconvolution de phase minimale (déconvolution
- 30 de pointe ou Flatiron) doit compenser de façon raisonnable l'effet de profondeur et doit donc retirer le déphasage apparent de  $90^\circ$  tout en compensant les effets d'amplitude.

Ainsi que cela a précédemment été établi, le détecteur de pression 14a produit un signal tel que celui présenté sur la figure 2A, et le détecteur de vitesse 14b produit un signal du type représenté sur la figure 2B. En réponse à l'onde de compression se  
5 déplaçant vers le haut (réflexion primaire), le détecteur de pression produit un signal positivement orienté 20, et le détecteur de vitesse produit un signal négativement orienté 21. L'onde de compression est réfléchiée par la surface et redescend par la trajectoire 19 sous forme d'une onde de raréfaction. En réponse à cette onde de raréfaction  
10 se déplaçant vers le bas, le détecteur de pression produit un signal négativement orienté 22, et le détecteur de vitesse produit un signal positivement orienté 23.

On peut utiliser pour la mise en oeuvre de l'invention des détecteurs de pression et de vitesse disponibles sur le marché.  
15 Des détecteurs différents présentent différentes réponses de fréquence et d'amplitude aux signaux détectés. Malheureusement, les figures 2A et 2B sont des simplifications excessives de la réponse de ces détecteurs aux réflexions primaire et fantôme détectées. Il est donc nécessaire de filtrer et d'ajuster les amplitudes des signaux des  
20 deux détecteurs pour réussir à annuler les réflexions fantômes.

Comme le montre la figure 3, le détecteur 14 comporte un détecteur de pression 14a et un détecteur de vitesse 14b. Le détecteur 16 comporte un détecteur de pression 16a et un détecteur de vitesse 16b. Le détecteur 17 comporte un détecteur de vitesse 17b  
25 et un détecteur de pression 17a.

Les signaux de sortie de ces détecteurs sont appliqués aux filtres 24 à 29. Chaque filtre présente des caractéristiques qui sont spécifiées dans les réponses des figures 4A à 4C et 5A à 5C. La figure 4A montre le domaine de fréquence du signal de sortie d'un  
30 détecteur de pression après qu'il a été filtré par le filtre 24 par exemple. La figure 4B montre le domaine de fréquence du signal de sortie d'un détecteur de vitesse après filtrage par le filtre 25. Pour obtenir des filtres ayant les caractéristiques présentées sur les figures 4A et 4B, il est nécessaire de mesurer la réponse de  
35 fréquence des détecteurs réels vis-à-vis des réflexions primaires et fantômes. Après avoir mesuré les caractéristiques des détecteurs,



on utilise ces mesures pour produire un filtrage inverse qui donnera la caractéristique de réponse ayant le type présenté sur les figures 4A et 4B. Le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 275 980 enseigne la manière de mettre en oeuvre de tels filtres. Un filtrage temporel

5 est particulièrement adapté à la mise en oeuvre des filtres 24 à 29. On peut utiliser les enseignements du brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 275 980 cité pour fixer des caractéristiques de filtrage telles que l'on puisse produire les réponses des figures 4A et 4B à partir des caractéristiques de réponse mesurées des détecteurs réels employés.

10 Lorsqu'on combine les signaux filtrés ayant les réponses de fréquence présentés sur les figures 4A et 4B, on obtient le spectre de fréquence large et plat de la figure 4C. Ceci constitue une réponse très souhaitable aux réflexions primaires pour un détecteur sismique.

Les figures 5A et 5B sont des représentations temporelles  
15 des signaux de sortie des filtres. Une technique permettant de déterminer les opérateurs de déconvolution voulus des filtres et de mettre en oeuvre des filtres ayant un tel opérateur de déconvolution est présentée dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 274 542. Pour assurer l'annulation des réflexions fantômes, on ajuste le gain d'au  
20 moins l'un des deux signaux de sortie. A cet effet, sont prévus des amplificateurs 30 à 35 de modification de gain. On combine les signaux venant des paires de détecteurs de pression et de vitesse dans les additionneurs 36 à 38. Les signaux combinés ont une réponse d'impulsion telle que présentée sur la figure 5C. On enregistre alors ces signaux  
25 sur un support d'enregistrement 39, ainsi que cela est classique.

Alors que l'invention peut être mise en oeuvre à l'aide de filtres, d'amplificateurs et d'additionneurs analogiques, une pratique préférée de l'invention passera par l'utilisation d'un calculateur numérique, comme cela est classique dans la technique de  
30 l'exploration sismique. Les processus de filtrage, de changement de gain et d'addition numériques sont bien connus dans la technique du traitement de données sismiques numériques.

Bien entendu, l'homme de l'art sera en mesure d'imaginer, à partir du dispositif dont la description vient d'être donnée à titre  
35 simplement illustratif et nullement limitatif, diverses autres variantes et modifications ne sortant pas du cadre de l'invention.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de détection sismique permettant de supprimer des réflexions fantômes relatives à des réflexions primaires dans une exploration sismique, où une réflexion primaire est provoquée par une onde de compression se déplaçant vers le haut et une réflexion fantôme est provoquée par une onde de raréfaction se déplaçant vers le bas depuis la surface, le dispositif étant caractérisé en ce qu'il comprend :
- un détecteur de pression (14a à 17a) qui produit un signal positif (20) en réponse à une onde de compression se déplaçant vers le haut et un signal négatif (22) en réponse à une onde de raréfaction se déplaçant vers le bas;
- un détecteur de vitesse (14b à 17b) qui produit un signal positif (21) en réponse à une onde de compression se déplaçant vers le haut et un signal positif (23) en réponse à une onde de raréfaction se déplaçant vers le bas;
- des moyens de filtrage (24 à 29) permettant de modifier le contenu de fréquence d'au moins l'un des signaux de façon à annuler les signaux produits par la réflexion fantôme;
- des moyens (36 à 38) permettant d'additionner les signaux des détecteurs de pression et de vitesse, grâce à quoi on annule sensiblement les signaux produits en réponse à la réflexion fantôme; et
- des moyens (11, 11A à 11D) permettant de placer les détecteurs de pression et de vitesse à proximité immédiate d'une ligne d'exploration sismique.
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens (30 à 35) permettant de modifier les gains des signaux de manière à annuler les signaux produits en réponse à la réflexion fantôme.
3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que les moyens de filtrage possèdent un opérateur de déconvolution qui est l'inverse de la distorsion introduite par les détecteurs de pression et de vitesse.

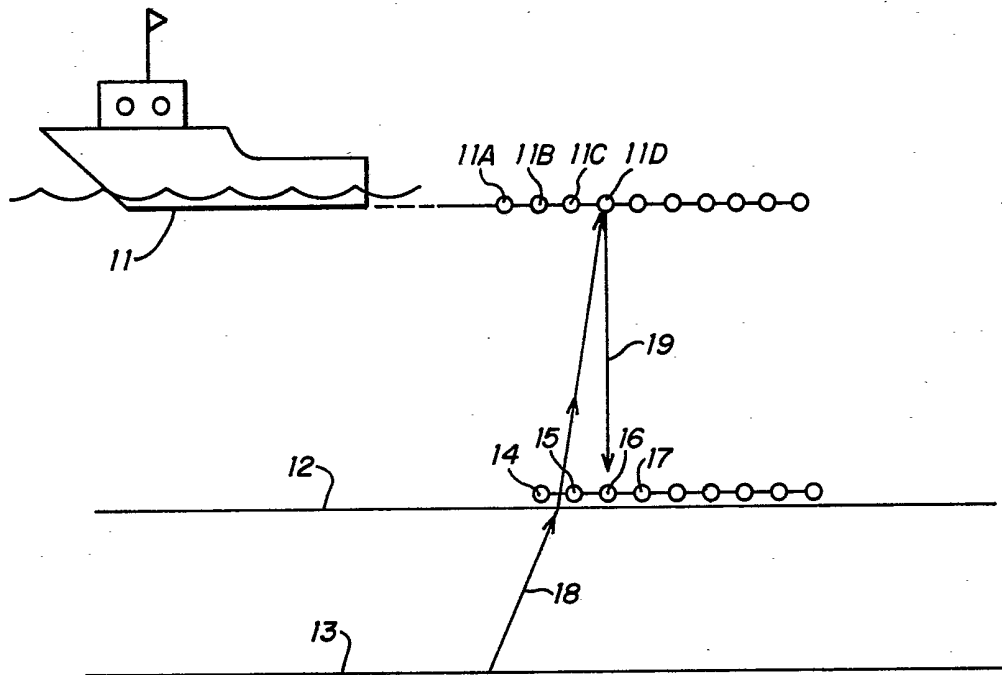


FIG. 1

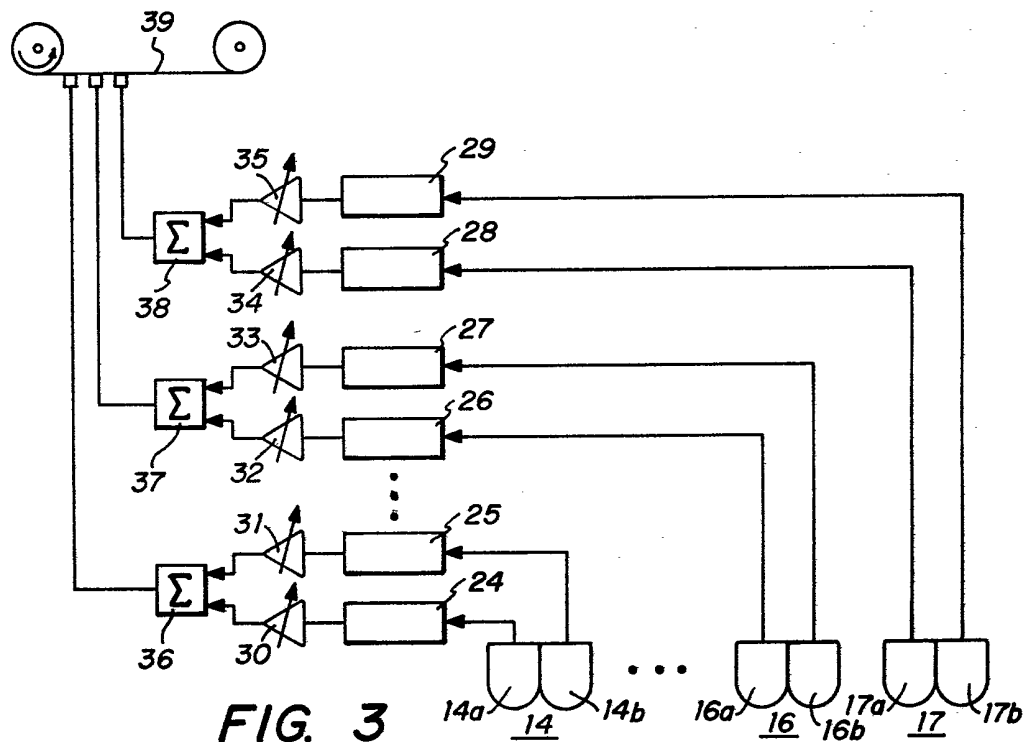


FIG. 3

