

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 18.09.90.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la demande : 20.03.92 Bulletin 92/12.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche : *Se reporter à la fin du présent fascicule.*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : *Société Anonyme dite: TOTAL COMPAGNIE FRANCAISE DES PETROLES — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : Julien Philippe et Raoult Jean-Jacques.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire : Cabinet Brot et Jolly.

⑤4 Procédé perfectionné de prospection sismique du sous-sol.

⑤7 Dans ce procédé, on n'effectue à chaque niveau de profondeur qu'une unique phase d'extrapolation pour l'ensemble des points de tir, préalablement codés par des signaux aléatoires, suivie d'une unique phase d'imaging, l'imaging consistant à effectuer le calcul, pour l'ensemble des points de tir  $i$  et l'ensemble des fréquences  $\omega$  des ondes transmises, de

$$\sum_{\omega} \frac{\sum_i U'_i}{\sum_i D'_i} \frac{\sum_i \overline{D'_i}}{\sum_i \overline{D'_i}}$$

où le champ montant codé,  $U'_i$ , désigne la convolution du champ d'ondes montant  $U_i$  par un signal aléatoire  $K_i$  associé au point de tir  $i$ , c'est-à-dire  $U'_i = U_i * K_i$ , où le champ descendant codé,  $D'_i$ , désigne la convolution du champ d'ondes descendant  $D_i$  par le même signal aléatoire  $K_i$  associé, c'est-à-dire  $D'_i = D_i * K_i$ , et où  $\overline{D'_i}$  désigne le complexe conjugué de  $D'_i$ .



## PROCEDE PERFECTIONNE DE PROSPECTION SISMIQUE DU SOUS-SOL.

La présente invention concerne un procédé perfectionné de prospection sismique du sous-sol, utilisant, pour l'interprétation des résultats, la méthode dite de migration avant addition.

On sait qu'une technique répandue de recherche de pétrole ou de gaz consiste à effectuer une prospection sismique du sous-sol. On crée une émission d'énergie, par exemple par explosion d'une charge, en des emplacements successifs (points de tir ou émetteurs) du sol ou d'un plan d'eau et, pour chacun de ces points de tir, on recueille, pendant quelques secondes et en des positions régulièrement espacées, à l'aide de récepteurs souvent appelés "géophones" ou "hydrophones", les ondes sismiques réfléchies par les interfaces ou "horizons" entre couches géologiques. Dans la pratique, le signal enregistré par un géophone présente une amplitude qui varie en fonction du temps et, en théorie, les pics enregistrés correspondent à des interfaces entre couches.

Si le réflecteur est un plan horizontal et si les géophones sont régulièrement espacés suivant une droite horizontale de part et d'autre de la source sismique, les temps de trajet des ondes enregistrées par les différents géophones en fonction de la distance de ces derniers à la source se répartiront suivant une hyperbole. La courbe résultante s'éloignera d'autant plus de l'hyperbole obtenue avec le plan horizontal que le réflecteur est différent de ce cas simple. Dans certains cas complexes, la courbe obtenue n'aura plus rien à voir avec une hyperbole.

Les signaux recueillis par les différents récepteurs en fonction de leur distance à la source des ondes (distance généralement représentée en abscisses sur les diagrammes) et en fonction du temps (généralement porté en ordonnées) sont représentés sur un même diagramme et constituent ce que l'on appelle, dans la technique, une "collection point de tir".

En pratique, lorsque l'on déplace la source sismique,

il existe des ondes émises et enregistrées par plusieurs couples émetteurs-récepteurs qui sont réfléchies par un même point d'une interface du sous-sol formant réflecteur et il y a une redondance d'informations, dont il faut  
5 tenir compte en analysant les données recueillies. Par ailleurs, pour certains points du sous-sol (l'extrémité d'une faille, par exemple), l'énergie reçue de la source sismique et diffractée dans toutes les directions est vue comme une figure de diffraction par les récepteurs.  
10 Certains signaux subissent enfin des réflexions multiples et/ou une réfraction entre couches géologiques.

Par analogie avec ce qui a été décrit ci-dessus, pour différents emplacements de l'émission d'énergie et pour un même point réflecteur du sous-sol, les signaux  
15 correspondant à ce point, recueillis par les différents récepteurs en fonction du temps, se répartissent aussi suivant une hyperbole ou une hyperbole déformée.

Aux signaux enregistrés s'ajoute, toutefois, un bruit de fond très important, de sorte que la courbe suivant  
20 laquelle se répartissent les pics des signaux enregistrés par les récepteurs est peu visible.

Pour éliminer ce bruit de fond, un procédé classique consiste à traiter les signaux enregistrés par les différents récepteurs en fonction du temps pour les  
25 ramener sur une même droite parallèle à l'axe des abscisses (distance à la source) et, ensuite, à les additionner. La sommation des bruits de fond a pour effet de les annuler, car ils ne sont pas en phase, alors que la sommation des signaux enregistrés, qui, eux, sont en  
30 phase, a pour effet d'additionner leurs amplitudes et de les faire ainsi ressortir clairement.

On effectue cette opération pour chaque point réfléchissant (ou point miroir) du sous-sol et on obtient ainsi une représentation du sous-sol, que l'on accentue  
35 généralement en représentant en noir les valeurs positives des signaux et en blanc les valeurs négatives.

L'image ainsi obtenue constitue ce que l'on appelle une section additive ou "stack", dans la technique.

Ce stack n'est toutefois pas une véritable image du sous-sol, puisque les signaux apparaissant pour chaque point miroir sont fonction du temps et non de la profondeur du réflecteur. Par ailleurs, si le réflecteur est incliné, il ne sera pas bien positionné sur le stack. Plus le pendage de la couche géologique sera grand, plus l'erreur sera importante. De plus, en supprimant les bruits de fond sur le stack, on fait également disparaître des petits signaux pouvant présenter de l'intérêt. Enfin, un stack ne fournit une représentation réellement satisfaisante que dans le cas d'une structure tabulaire.

Il est donc nécessaire de transformer le stack en une image aussi fidèle que possible de la section géologique correspondante du sous-sol et cette opération est appelée la migration sismique après stack.

Toutefois, dans certains cas de géologie complexe, le stack peut être de très mauvaise qualité. Il importe alors de calculer la section géologique en profondeur non pas à partir du stack, mais à partir des premiers enregistrements bruts : les collections point de tir. Cette opération est alors appelée migration avant stack.

La migration avant stack est bien plus précise que la migration après stack, mais elle est aussi beaucoup plus coûteuse.

La présente invention concerne la migration avant stack et consiste à additionner de manière très particulière les données et à les traiter ensuite en conservant le processus et les avantages de la migration avant stack. L'invention permet de rapprocher le coût de cette nouvelle migration avant stack de celui de la migration après stack, tout en conservant les avantages qualitatifs de la migration avant stack.

Les images sismiques obtenues représentent les variations relatives de la réflectivité (ou coefficient de réflexion) de chaque point du sous-sol

En effet, le géophysicien cherche à déterminer le coefficient de réflexion aux interfaces entre couches géologiques, qui sont assimilables à des miroirs. Or on

peut calculer plus facilement ce coefficient si l'on considère, par une vue de l'esprit, que la source et le géophone sont disposés contre l'interface, et que les ondes émises par la source sismique sont réémises instantanément par l'interface et aussitôt enregistrées par le géophone.

La migration comprend deux phases :

- dans une première phase, dite "extrapolation", on traite le signal enregistré par chaque récepteur de manière à simuler ce que l'on aurait obtenu si la source d'ondes et le récepteur avaient été placés à l'intérieur du sous-sol et en particulier au contact de l'interface intéressée;

- dans une seconde phase, dite "imaging", on calcule à partir des résultats de la première phase une estimation du coefficient de réflexion R du point réflecteur de l'interface considérée.

La présente invention sera décrite ci-après dans le cas de son application à la migration avant addition par point de tir, mais son utilisation s'étend naturellement à d'autres types de migration.

La migration par point de tir classique migre successivement toutes les collections en point de tir. Pour chaque point de tir, le champ descendant (champ issu de la source) et le champ montant (champ reçu par les récepteurs) sont extrapolés dans le sous-sol. Puis la phase d'imaging est appliquée pour calculer la réflectivité du milieu. La redondance des données est utilisée en fin de procédure : en chaque point du sous-sol, la réflectivité globale résulte de la somme des réflectivités calculées en ce point sur chaque collection point de tir migrée.

Le coefficient de réflexion R pour un point réflecteur donné et pour une fréquence  $\omega$  de vibration déterminée est défini au temps de propagation  $t = 0$  par la relation

$$R = \left( \frac{U}{D} \right)_{t = 0} \quad (1)$$

où U désigne le champ d'ondes montant, pour le réflecteur considéré, et D le champ d'ondes descendant.

5 A une profondeur Z, pour différentes fréquences  $\omega$  et pour divers points i de tir, il faut donc calculer le coefficient de réflexion du point considéré par les sommations suivantes :

$$10 \quad \sum_i \sum_{\omega} \frac{U_i(\omega)}{D_i(\omega)} \quad (2)$$

15 Dans la pratique, pour faciliter les calculs, on calcule le coefficient de réflexion par les sommations :

$$20 \quad \sum_i \sum_{\omega} \frac{U_i(\omega) \times \overline{D_i}(\omega)}{D_i(\omega) \times \overline{D_i}(\omega)} \quad (3)$$

où  $\overline{D_i}$  désigne le complexe conjugué de  $D_i$ .

25 L'étape d'extrapolation, qui doit être conduite pour chaque point de tir, est très longue, très compliquée et, par conséquent, très coûteuse.

30 Comme indiqué ci-dessus, la présente invention vise à réduire les frais de la migration avant stack en minimisant les durées de calcul, en ne réalisant qu'une seule fois l'étape d'extrapolation pour l'ensemble des points de tir.

35 L'invention a également pour but, en réduisant le coût de la migration avant stack, de permettre l'application de cette technique sur de plus grands volumes de données.

Pour faciliter les calculs, il serait avantageux de pouvoir changer l'ordre des sommations, mais il est bien évident que, généralement,

$$\sum_i U_i \quad \sum_i \overline{D}_i \quad (4)$$

$$\sum_{\omega} \frac{\sum_i U_i \quad \sum_i \overline{D}_i}{\sum_i D_i \quad \sum_i \overline{D}_i}$$

5

est différent de la formule (3).

Par contre, si l'on code les collections points de tir par une famille de vecteurs aléatoires  $K_i$ , où  $i$  varie de 1 à  $m$ , dont chaque vecteur est en correspondance avec un point de tir,  $m$  représentant le nombre de points de tir, et que l'on utilise les valeurs suivantes

10

$$U'_i = U_i * K_i$$

et

$$D'_i = D_i * K_i$$

15

où  $*$  représente le symbole de convolution on peut démontrer que, pour des signaux  $K_i$  de longueur infinie, la sommation

20

$$\sum_i U'_i \quad \sum_i \overline{D}'_i \quad (5)$$

$$\sum_{\omega} \frac{\sum_i U'_i \quad \sum_i \overline{D}'_i}{\sum_i D'_i \quad \sum_i \overline{D}'_i}$$

25

est égale à celle de la formule (3).

La présente invention propose donc de sommer les champs montants codés  $U'_i$  et les champs descendants codés  $D'_i$ , de n'effectuer pour chacune de ces deux sommes qu'une seule opération d'extrapolation (bien que l'ensemble des points de tir soit traité) et de calculer la réflectivité par utilisation de la formule (5).

30

Dans la somme ainsi extrapolée, chaque point de tir conserve son information propre, puisqu'il est codé par un vecteur aléatoire qui lui est spécifique. C'est pourquoi la qualité de la migration codée doit être comparable à celle de la migration avant stack conventionnelle.

35

On peut démontrer que le décodage s'effectue de lui-même au niveau de l'imaging, sans que l'opérateur ait à

intervenir.

Le codage des points de tir à l'aide de signaux aléatoires entraîne, bien entendu, des opérations supplémentaires, mais l'ensemble du processus (extrapolation + imaging) n'en est pas moins beaucoup plus court que dans la technique antérieure, d'environ un facteur 3, dans le cas bidimensionnel illustré ci-après par les dessins annexés.

L'intérêt de cette technique est encore plus important en migration tridimensionnelle, où les coûts sont beaucoup plus élevés.

L'invention a par conséquent pour objet un procédé de prospection sismique du sous-sol, du type dans lequel on émet une onde sismique en un point déterminé de la surface du sol ou à proximité de la surface de la mer, et l'on enregistre en fonction du temps les ondes réfléchies par les interfaces entre les formations géologiques sous-jacentes à l'aide de récepteurs disposés en une pluralité d'emplacements à la surface du sol ou à proximité de la surface de la mer, on traite les données enregistrées par les capteurs à l'aide d'un programme mathématique de migration avant stack en vue de calculer, pour chaque point de tir, les variations relatives des coefficients de réflexion correspondant aux différents points des différentes interfaces du sous-sol, ce traitement comprenant conventionnellement pour chaque point de tir une phase d'extrapolation, suivie d'une phase d'imaging, ce procédé étant caractérisé en ce que l'on n'effectue à chaque niveau de profondeur qu'une unique phase d'extrapolation pour l'ensemble des points de tir, préalablement codés par des signaux aléatoires, suivie d'une unique phase d'imaging, l'imaging consistant à effectuer le calcul, pour l'ensemble des points de tir  $i$  et l'ensemble des fréquences  $\omega$  des ondes transmises, de

$$\sum_{\omega} \frac{\sum_i U'_i \sum_i \overline{D'_i}}{\sum_i D'_i \sum_i \overline{D'_i}}$$

où le champ montant codé,  $U'_i$ , désigne la convolution du champ d'ondes montant  $U_i$  par un signal aléatoire  $K_i$  associé au point de tir  $i$ , c'est-à-dire  $U'_i = U_i * K_i$ , où le champ descendant codé  $D'_i$ , désigne la convolution du champ d'ondes descendant  $D_i$  par le même signal aléatoire  $K_i$  associé, c'est-à-dire  $D'_i = D_i * K_i$ , et où  $\overline{D'_i}$  désigne le complexe conjugué de  $D'_i$ .

Le procédé conforme à l'invention n'est rigoureusement exact que si l'on utilise des signaux aléatoires de longueur infinie, alors que, dans la pratique, les signaux aléatoires fournis en un temps fini par des programmes connus sont de longueur finie. Il sera possible de limiter la longueur des signaux aléatoires, tout en ne commettant qu'une erreur acceptable sur les calculs effectués et en limitant ceux-ci dans le temps.

Le fait de corrélérer un stack de signaux codés avec un des signaux aléatoires utilisés permet donc de retrouver la trace correspondant à ce signal. La corrélation du même stack avec un signal aléatoire quelconque conduit à une corrélation théoriquement nulle et c'est en fait cette propriété qui, comme indiqué ci-dessus, a pour effet qu'en faisant l'imaging sur le stack des données codées, on décode simultanément celles-ci et on trouve directement le résultat désiré.

Toutes les opérations mentionnées ci-dessus (extrapolation, imaging et les traitements mathématiques correspondants des enregistrements des récepteurs) sont bien connues dans la technique, mais elles sont effectuées par des sommations

$$\sum_i \sum_{\omega} \frac{U_i(\omega) \times \overline{D_i(\omega)}}{D_i(\omega) \times \overline{D_i(\omega)}}$$

(formule 3 ci-dessus) et non par les sommations

$$\omega \frac{\sum_i U'_i \quad \sum_i \overline{D}'_i}{\sum_i D'_i \quad \sum_i \overline{D}'_i}$$

5

qui sont caractéristiques de la présente invention.

Comme il a été indiqué, le procédé conforme à l'invention permet de diviser par un facteur de l'ordre de 3 le temps passé à traiter les signaux enregistrés par les récepteurs, lorsque l'on opère en deux dimensions (section par un plan vertical). Ce procédé présente par ailleurs un intérêt particulier lorsque l'on opère en trois dimensions, ce qui est rarement possible avec les procédés usuels.

C'est ce que prouvent les essais effectués par la Demanderesse sur des données synthétiques simulant une prospection sismique. Ces essais sont illustrés par les dessins annexés, sur lesquels :

La figure 1 représente une section migrée avant stack, obtenue avec ces données synthétiques par une migration par points de tir classique, sans codage de la migration par des nombres aléatoires,

La figure 2 représente une section migrée, obtenue avec les mêmes données, par le procédé conforme à l'invention.

Les données synthétiques simulent des essais effectués avec 80 tirs de 60 géophones.

Le traitement usuel de ces données a nécessité 5 minutes de calcul et a donné la section migrée de la figure 1, qui montre un réflecteur penté et deux réflecteurs horizontaux séparés par une faille verticale.

Avec le procédé conforme à l'invention, on obtient la section migrée de la figure 2, comparable en qualité à celle de la figure 1, après un temps de calcul de 1 mn 40 s seulement, avec le même ordinateur que précédemment, c'est-à-dire après une durée pratiquement trois fois plus courte.

## REVENDEICATIONS

1.- Procédé de prospection sismique du sous-sol, du type dans lequel on émet une onde sismique en un point déterminé de la surface du sol ou à proximité de la surface de la mer, et l'on enregistre en fonction du temps les ondes réfléchies par les interfaces entre les formations géologiques sous-jacentes à l'aide de récepteurs disposés en une pluralité d'emplacements à la surface du sol ou à proximité de la surface de la mer, on traite les données enregistrées par les capteurs à l'aide d'un programme mathématique de migration avant stack en vue de calculer, pour chaque point de tir, les variations relatives des coefficients de réflexion correspondant aux différents points des différentes interfaces du sous-sol, ce traitement comprenant conventionnellement pour chaque point de tir une phase d'extrapolation suivie d'une phase d'imaging, ce procédé étant caractérisé en ce que l'on n'effectue à chaque niveau de profondeur qu'une unique phase d'extrapolation pour l'ensemble des points de tir, préalablement codés par des signaux aléatoires, suivie d'une unique phase d'imaging, l'imaging consistant à effectuer le calcul, pour l'ensemble des points de tir  $i$  et l'ensemble des fréquences  $\omega$  des ondes transmises, de

$$\sum_{\omega} \frac{\sum_i U'_i \quad \sum_i \overline{D'_i}}{\sum_i D'_i \quad \sum_i \overline{D'_i}}$$

30

où le champ montant codé,  $U'_i$ , désigne la convolution du champ d'ondes montant  $U_i$  par un signal aléatoire  $K_i$  associé au point de tir  $i$ , c'est-à-dire  $U'_i = U_i * K_i$ , où le champ descendant codé,  $D'_i$ , désigne la convolution du champ d'ondes descendant  $D_i$  par le même signal aléatoire  $K_i$  associé, c'est-à-dire  $D'_i = D_i * K_i$ , et où  $\overline{D'_i}$  désigne le complexe conjugué de  $D'_i$ .

35

2.- Utilisation du procédé selon la revendication 1

dans la prospection sismique en deux dimensions, suivant une coupe verticale du sous-sol.

3.- Utilisation du procédé selon la revendication 1 dans la prospection sismique en trois dimensions.

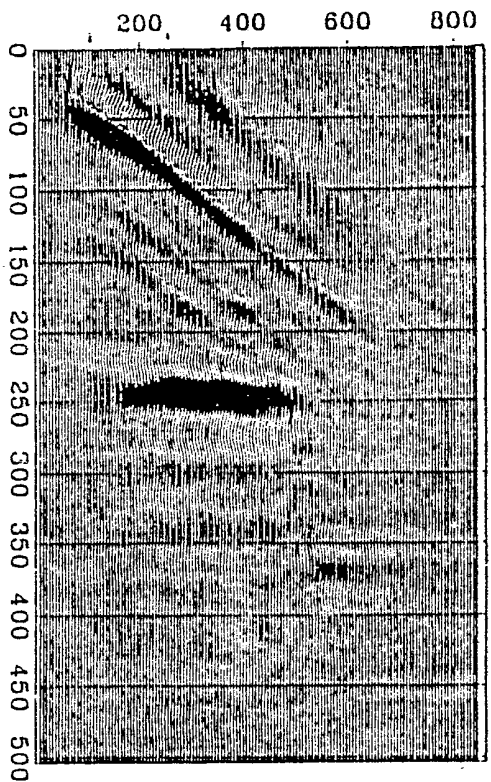


Fig. 1

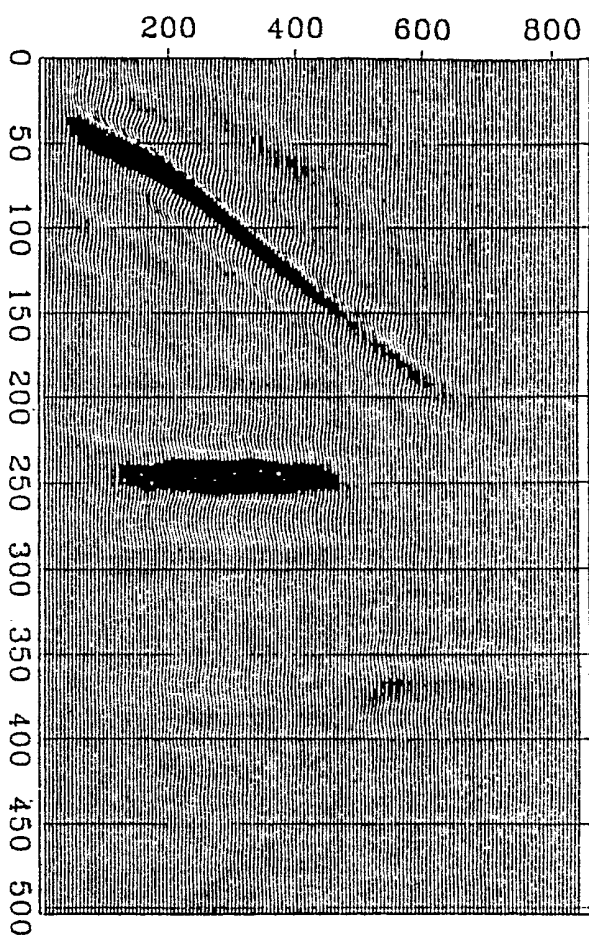


Fig. 2

INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIETE INDUSTRIELLE

**RAPPORT DE RECHERCHE**  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FR 9011498  
FA 447155

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	PROCEEDINGS OF THE IEEE. vol. 74, no. 8, août 1986, NEW YORK US pages 1133 - 1159; A.J. Berkhout: "The Seismic Method in the Search for Oil and Gas: Current Techniques and Future Developments" * page 1150, colonne de gauche, ligne 34 - page 1151, colonne de gauche, ligne 17; figures 18-20 * ---	1-3
A	GB-A-2217014 (WESTERN ATLAS INTERNATIONAL) * page 3, ligne 30 - page 4, ligne 11 * -----	1
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
		G01V
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
04 JUIN 1991		SWARTJES H.M.
<b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b> X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ..... & : membre de la même famille, document correspondant