



DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

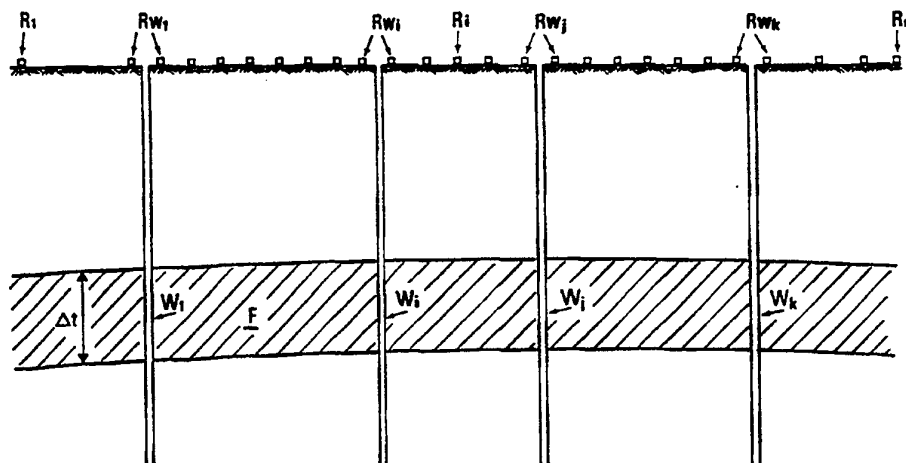
(51) Classification internationale des brevets ⁶ : G01V 1/28	A1	(11) Numéro de publication internationale: WO 95/08781 (43) Date de publication internationale: 30 mars 1995 (30.03.95)
(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR94/01087 (22) Date de dépôt international: 19 septembre 1994 (19.09.94) (30) Données relatives à la priorité: 93/11313 21 septembre 1993 (21.09.93) FR (71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): INSTITUT FRANÇAIS DU PETROLE [FR/FR]; Dépt. Brevets, 4, avenue de Bois-Préau, F-92500 Rueil-Malmaison (FR). (72) Inventeurs; et (75) Inventeurs/Déposants (US seulement): FOURNIER, Frédérique [FR/FR]; 12 bis, rue Carnot, F-95240 Corneilles-en-Parisis (FR). JOSEPH, Caroline [FR/FR]; 31, rue du Clos-Baron, F-78112 Fourqueux (FR). (74) Représentant commun: INSTITUT FRANÇAIS DU PETROLE; Dépt. Brevets, 4, avenue de Bois-Préau, F-92500 Rueil-Malmaison (FR).		(81) Etats désignés: CA, CN, JP, NO, US, brevet européen (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). Publiée <i>Avec rapport de recherche internationale.</i>

(54) Title: METHOD FOR ANALYSING SEISMIC TRACES USING A STATISTICAL CALIBRATION TECHNIQUE FOR DEDUCTION OF GEOLOGICAL CHARACTERISTICS

(54) Titre: METHODE D'ANALYSE DES TRACES SISMIQUES UTILISANT UNE TECHNIQUE DE CALIBRAGE STATISTIQUE POUR EN DEDUIRE DES PROPRIETES GEOLOGIQUES

(57) Abstract

The method applies to an underground formation for which geological data are available from core drillings or logs from wells (W_1 - W_k) made therein, and from seismic data obtained, for example, by means of a 3D type reflection seismic exploration campaign. The method uses a statistical calibration technique with statistical standardization obtained by reconciliation of local geological data (measured in the wells) with seismic attributes read from seismic traces (RW_1 - RW_k)



obtained in the immediate vicinity of each well. This calibration gives an empirical relation which can be applied to all seismic traces for the field to infer the associated geological characteristics, thus giving the benefit of a much denser spatial coverage than that possible through seismic exploration. Application, for example, to a reservoir containing petroleum effluents.

(57) Abrégé

La méthode s'applique à une formation souterraine pour laquelle on dispose de données géologiques obtenues par carottage ou diagraphies dans des puits ($W_1 - W_k$) qui la traversent et de données sismiques qui ont été obtenues par une campagne d'exploration sismique réflexion du type 3D par exemple. Elle s'appuie sur une technique de calibrage statistique avec un étalonnage statistique obtenu en rapprochant les données géologiques locales (mesurées dans des puits) avec des attributs sismiques lus sur des traces sismiques ($RW_1 - RW_k$) obtenues au voisinage immédiat de chaque puits. Par ce calibrage, on obtient une relation empirique que l'on peut appliquer à toutes les traces sismiques du champ pour en inférer les caractéristiques géologiques associées, en bénéficiant de la couverture spatiale beaucoup plus dense permise par la prospection sismique. Application à un réservoir contenant des effluents pétroliers par exemple.

UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AT	Autriche	GB	Royaume-Uni	MR	Mauritanie
AU	Australie	GE	Géorgie	MW	Malawi
BB	Barbade	GN	Guinée	NE	Niger
BE	Belgique	GR	Grèce	NL	Pays-Bas
BF	Burkina Faso	HU	Hongrie	NO	Norvège
BG	Bulgarie	IE	Irlande	NZ	Nouvelle-Zélande
BJ	Bénin	IT	Italie	PL	Pologne
BR	Brésil	JP	Japon	PT	Portugal
BY	Bélarus	KE	Kenya	RO	Roumanie
CA	Canada	KG	Kirghizistan	RU	Fédération de Russie
CF	République centrafricaine	KP	République populaire démocratique de Corée	SD	Soudan
CG	Congo	KR	République de Corée	SE	Suède
CH	Suisse	KZ	Kazakhstan	SI	Slovénie
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	SK	Slovaquie
CM	Cameroun	LK	Sri Lanka	SN	Sénégal
CN	Chine	LU	Luxembourg	TD	Tchad
CS	Tchécoslovaquie	LV	Lettonie	TG	Togo
CZ	République tchèque	MC	Monaco	TJ	Tadjikistan
DE	Allemagne	MD	République de Moldova	TT	Trinité-et-Tobago
DK	Danemark	MG	Madagascar	UA	Ukraine
ES	Espagne	ML	Mali	US	Etats-Unis d'Amérique
FI	Finlande	MN	Mongolie	UZ	Ouzbékistan
FR	France			VN	Viet Nam
GA	Gabon				

METHODE D'ANALYSE DES TRACES SISMIQUES UTILISANT UNE TECHNIQUE DE CALIBRAGE STATISTIQUE POUR EN DEDUIRE DES PROPRIETES GEOLOGIQUES

5 La présente invention concerne une méthode d'analyse des traces sismiques pour en extraire des informations géologiques relatives à une formation souterraine, telle qu'un réservoir pétrolier par exemple.

10 La méthode selon l'invention permet de rapprocher des données que l'on a pu recueillir par exploration sismique de la formation et des données géologiques résultant de mesures qui ont été obtenues en descendant des sondes de mesure dans un ou plusieurs puits forés traversant la zone réservoir. A cet effet, la méthode utilise un étalonnage statistique entre les paramètres
15 géologiques au niveau du réservoir, et les caractéristiques des mesures sismiques obtenues au voisinage des puits. Cet étalonnage statistique a pour objet essentiel d'établir une relation empirique entre les caractéristiques sismiques et les propriétés géologiques du réservoir au niveau des puits, relation qui est
20 ensuite appliquée aux traces sismiques loin des puits pour estimer les caractéristiques géologiques du réservoir.

 La méthode selon l'invention a donc pour objet d'améliorer la connaissance du réservoir entre les puits à partir de données sismiques de surface, présentant souvent une densité de
25 couverture spatiale beaucoup plus importante que celle des puits.

 Les résultats obtenus sont utiles au stade précoce de la vie du gisement quand on recherche les meilleurs emplacements pour forer des puits (phase d'appréciation ou début de phase de développement). A un stade plus tardif, les résultats sont
30 également utiles pour imposer des contraintes au modèle de réservoir que l'on a établi pour représenter la formation réservoir en question.

 Des techniques de calibrage statistique appliquées aux traces sismiques pour en extraire des paramètres géologiques au
35 niveau d'un réservoir ont déjà été décrites par Doyen, 1988,

- Porosity from seismic data: a geostatistical approach, Geophysics, 53, n° 10, 1263-1275, et par Fournier et Derain, 1992, Seismic data integration in reservoir simulations through a multivariate statistical calibration approach, 62nd Ann. Intern. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 95-98.

Les techniques de calibrage employées doivent pouvoir s'adapter facilement aux cas où plusieurs paramètres géologiques et sismiques interviennent (aspect multivariable) et aussi s'accommoder de relations éventuellement non linéaires entre les paramètres géologiques et sismiques. Il ne faut pas qu'elles soient limitées par trop d'hypothèses probabilistes sous-jacentes, et il faut en outre qu'elles fournissent une quantification éprouvée des incertitudes liées aux valeurs prédites par l'opération de calibrage.

- Les techniques connues de calibrage géologique de données sismiques ne remplissent pas toujours tous ces objectifs.

La méthode selon l'invention permet, en respectant les impératifs précédemment définis, de prédire (en faire une estimation ou bien une simulation pour représenter leurs incertitudes) des paramètres géologiques d'une formation souterraine telle qu'un réservoir pétrolier, à partir d'informations géologiques obtenues à la suite de mesures ou d'analyses effectuées dans un ou plusieurs puits forés traversant la formation et à partir d'une collection de traces sismiques. Cette collection est obtenue par exploration sismique directe de la formation ou bien encore constituée de traces sismiques synthétiques calculées à partir des données obtenues dans les puits par exemple. Elle comporte en particulier un ensemble de traces constitué de traces réelles obtenues au voisinage immédiat des puits (traces adjacentes) ou bien encore de traces synthétiques calculées correspondant à ce même voisinage. C'est dans cet ensemble de traces que l'on va choisir la population d'étalonnage définie ci-après.

- La méthode comprend les étapes suivantes: on délimite un intervalle d'analyse (en temps ou en profondeur) sur les traces

sismiques au niveau de la formation souterraine, compatible avec la configuration géométrique de la formation, on caractérise les portions de traces sismiques, à l'intérieur de cet intervalle d'analyse, par un ensemble de p attributs, on déduit desdites informations géologiques disponibles (obtenues dans les puits) un certain nombre q de paramètres géologiques et on forme une population d'étalonnage constituée de points auxquels on associe les p attributs attachés aux traces sismiques de l'ensemble de traces (adjacentes aux puits) et les q paramètres géologiques.

10 La méthode est caractérisée en ce que:

- on procède à un calibrage statistique sur la population de points dans un espace de représentation à $(p+q)$ dimensions, en recherchant une approximation de la fonction de densité multivariable relative à cette population de façon à établir une relation entre les paramètres géologiques et les attributs sismiques; et
- on applique cette relation aux traces sismiques de la collection, autres que celles de l'ensemble de traces adjacentes (proches des puits), de manière à prédire les q paramètres géologiques correspondants associés aux attributs sismiques de ces autres traces (i.e des traces plus éloignées des puits), ainsi que les incertitudes sur les paramètres géologiques prédits.

20 Ce calibrage statistique comporte par exemple la détermination d'une approximation optimale de la fonction de densité de probabilité multivariable de la population d'étalonnage par une somme finie de densités de probabilité multivariées, appartenant à une famille définie de lois de probabilité, et l'utilisation de cette approximation à des fins de calibrage. On peut choisir par exemple une famille de lois

25 gaussiennes pour déterminer cette approximation optimale.

30 Quand la formation est par exemple un réservoir recélant des effluents pétroliers, on délimite l'intervalle d'analyse en pointant sur les traces sismiques de la collection le toit et la base du réservoir.

Les attributs sismiques sont obtenus par exemple à partir des amplitudes de chaque portion de trace sismique de la collection de traces ou bien à partir du module du signal analytique, ou bien encore en déterminant le spectre d'amplitude
5 des portions de traces.

L'étape de détermination des q paramètres géologiques comporte par exemple une analyse d'échantillons prélevés dans les puits ou une analyse de diagraphies réalisées au moyen d'outils descendus dans les puits. Les traces sismiques utilisées
10 peuvent être selon les cas obtenues par exploration sismique de la formation, synthétisées à partir de données de puits, réelles ou elles-mêmes synthétiques.

Comme paramètre géologique, on peut choisir par exemple la porosité moyenne des échantillons géologiques au niveau du
15 réservoir.

La méthode selon l'invention appliquée à des fins de calibrage présente l'avantage de bien s'adapter à des cas de variables multiples, et elle permet de traiter des problèmes où des relations non linéaires existent entre les paramètres
20 géologiques et les attributs sismiques. Elle fournit également une quantification des incertitudes puisque la fonction de densité de probabilité est totalement connue. Par ailleurs, cette méthode peut être complètement non paramétrique. Elle est en outre efficace en ce qui concerne le temps de calcul requis, même dans
25 le cas où le nombre de paramètres et attributs pris en compte est élevé.

D'autres caractéristiques et avantages de la méthode apparaîtront mieux à la lecture de la description qui va suivre en se référant aux dessins annexés où :

- 30 - la Fig.1 montre schématiquement une formation souterraine traversée par des puits;
- la Fig.2 illustre la méthodologie de calibrage employée dans un diagramme réduit à deux dimensions par commodité où S et G représentent respectivement l'attribut sismique et la variable
35 géologique considérés;

- la Fig. 3 montre l'histogramme d'un paramètre géologique tel que l'épaisseur de grès T d'une formation étudiée, et superposées, la distribution marginale de l'approximation $\hat{f}(T)$ ainsi que ses six composantes gaussiennes numérotées de 1 à 6.
- 5 - la Fig. 4 montre, pour la formation testée, un diagramme des épaisseurs de grès T dans la formation en fonction d'un attribut sismique S qui est une combinaison linéaire particulière des amplitudes des traces;
- les Fig. 5A à 5D montrent, au niveau de la formation étudiée et de quatre puits particuliers, la distribution conditionnelle $\hat{f}(T/s)$ de l'épaisseur T des grès, connaissant les données sismiques S, ainsi que l'épaisseur réelle des grès mesurée dans ces puits (en pointillé sur les figures) à titre de comparaison;
- 10 - la Fig. 6 présente un diagramme des épaisseurs PT de grès prédites, en fonction des épaisseurs réelles de grès, par application de la méthode à la formation testée, les points étant codés par la probabilité PR d'obtenir l'épaisseur prédite PT; et
- les Fig. 7 et 7A montrent respectivement, et avec des échelles différentes, la répartition des épaisseurs de grès prédite par application de la méthode à la formation testée.
- 20

La méthode de calibrage statistique selon l'invention s'applique à une formation souterraine F (Fig.1) traversée généralement par plusieurs puits $W_1 \dots W_i \dots W_j \dots W_k$, telle qu'un réservoir contenant des effluents pétroliers. Sur cette formation ont été collectées des données à caractère géologique et sismique.

25

Par une analyse des échantillons prélevés dans les puits traversant la formation, ou à la suite de mesures effectuées en descendant dans les puits des outils de diagraphie, on a pu déterminer un certain nombre q de paramètres géologiques locaux à la formation, le long de ces puits. Il s'agit par exemple de la valeur de la porosité moyenne du réservoir, de l'épaisseur cumulée des lithofaciès etc.

30

On dispose également d'une collection de traces sismiques qui a été obtenue notamment par des campagnes classiques de

35

prospection sismique en répartissant en surface des récepteurs sismiques $R_1 \dots R_i \dots R_m$, et en effectuant des enregistrements au moyen de ces récepteurs. Cette collection peut encore être constituée de traces sismiques synthétiques calculées à partir de données de puits réelles ou simulées, comme le savent les spécialistes.

La méthode comporte tout d'abord la délimitation, sur les traces de la collection, d'un intervalle d'analyse. Il peut s'agir d'un intervalle de temps $\Delta\tau$ ou d'un intervalle de profondeur si les données sismiques en fonction du temps sont préalablement transformées en données en fonction de la profondeur. Cet intervalle d'analyse est obtenu par exemple en pointant sur les traces une zone d'intérêt. S'il s'agit d'un réservoir pétrolier, on pointe, par exemple, la position du toit et de la base du réservoir.

Toutes les traces de la collection sont ensuite caractérisées à l'intérieur de cet intervalle d'analyse, par un certain nombre p d'attributs sismiques qui sont obtenus par exemple à partir des amplitudes de chaque trace sismique, à partir du module du signal analytique, représentatif, on le sait, de l'énergie de la trace, ou encore en déterminant le spectre d'amplitude des traces, etc.

Parmi la collection de traces disponibles, on sélectionne un ensemble de traces $RW_1 \dots RW_i \dots RW_j \dots RW_n$ qui sont soit les traces sismiques obtenues au voisinage du (ou de chaque puits) traversant la formation, soit des traces synthétiques modélisées correspondant à ce même voisinage ou à un voisinage simulé.

La méthode comporte ensuite un rapprochement des paramètres géologiques obtenus dans les puits et des attributs sismiques des traces $RW_1 \dots RW_i \dots RW_n$ de l'ensemble de traces adjacentes, de façon à établir une relation empirique. On forme ainsi une population d'étalonnage avec cet ensemble de traces associées aux puits que l'on représente par les q paramètres géologiques et les p attributs sismiques. On peut la représenter (Fig.2) dans un espace multivariable de dimension $(p + q)$ que l'on souhaite calibrer.

On recherche alors une approximation optimale $\hat{f}$ de la fonction de densité multivariable f :

$$\hat{f}(G_1 \dots G_q, S_1 \dots S_p) = f(G_1 \dots G_q, S_1 \dots S_p)$$

5 où

G_i = paramètre géologique i , " $i = 1 \dots q$ "

S_j = attribut sismique j , " $j = 1 \dots p$ ".

f = densité empirique de la population d'étalonnage.

10 Cette partie constitue l'étape de calibrage entre les p attributs sismiques et les q paramètres géologiques, et permet d'établir la relation empirique recherchée par l'intermédiaire de la fonction de densité approchée $\hat{f}$ et de la fonction de densité conditionnelle associée $\hat{f}(G/s)$ (Fig.2).

15 Une relation empirique ayant été établie par cette étape de calibrage, on va s'en servir pour inférer la valeur des paramètres géologiques $G_1 \dots G_q$ que l'on peut associer à des valeurs des attributs sismiques $S_1 = s_1 \dots S_p = s_p$, calculées sur les traces sismiques de la collection non adjacentes aux puits. Cette étape est effectuée en calculant la fonction de densité conditionnelle de
20 $(G_1 \dots G_q)$ connaissant $(S_1 = s_1 \dots S_p = s_p)$:

$$\begin{aligned} & \hat{f}(G_1 \dots G_q / S_1 = s_1 \dots S_p = s_p) \\ &= \frac{\hat{f}(G_1 \dots G_q, S_1 = s_1 \dots S_p = s_p)}{\hat{f}(S_1 \dots S_p = s_p)} \quad \text{par définition} \end{aligned}$$

25 Il est possible alors de choisir comme prédiction des paramètres géologiques $(G_1 \dots G_q)$ pour les valeurs connues $s_1 \dots s_p$ des attributs sismiques, différentes caractéristiques de cette fonction de densité conditionnelle

$$\hat{f}(G_1, \dots G_q / S_1 = s_1 \dots S_p = s_p),$$

30

telles que moyenne, mode, quantiles etc. Connaissant entièrement la distribution de $(G_1 \dots G_q)$ pour lesdites valeurs $(s_1 \dots s_p)$, les

incertitudes associées à la valeur prédite pour ($G_1 \dots G_q$) peuvent aussi être quantifiées.

En particulier il est évident pour les spécialistes que la connaissance de la distribution ($G_1 \dots G_q$) pour lesdites valeurs
 5 ($s_1 \dots s_p$), permet aussi de réaliser des tirages aléatoires de valeurs des paramètres géologiques conditionnés par les attributs sismiques, ce qui est une autre façon de représenter l'incertitude à la prédiction.

On voit donc finalement qu'en tout point d'une formation
 10 telle qu'un champ pétrolier, où l'on dispose de données sismiques acquises au préalable, la méthode selon l'invention permet d'inférer des valeurs associées de paramètres géologiques et les incertitudes liées à ces valeurs. La méthode permet donc d'estimer ou de simuler des parois géologiques conditionnées par
 15 l'information sismique.

Suivant un mode de mise en oeuvre particulier, on obtient l'approximation recherchée de la fonction de densité empirique, sous la forme d'une combinaison de densités associées à des lois gaussiennes multivariées comme décrit par exemple dans
 20 Royer, 1988, New approaches to the recognition of anomalies in exploration geochemistry, in quantitative analysis of mineral and energy resources, Chung et al., Reidel Publishing Company, 89-112.

Dans ce cas, la fonction $\hat{f}$ s'exprime sous la forme d'une
 25 somme de fonctions de densité f_k :

$$\hat{f}(G_1 \dots G_q, S_1 \dots S_p) = \sum_{k=1}^K p_k f_k(G_1 \dots G_q, S_1 \dots S_p)$$

où

30 G_i = paramètre géologique i , " $i = 1 \dots q$ ",
 S_j = attribut sismique j , " $j = 1 \dots p$ ",
 $\hat{f}$ = densité approchée de la population d'étalonnage,
 K = nombre de sous-populations obtenues par la décomposition gaussienne,

- p_k = poids de la sous-population k, "k = 1 ... K",
 f_k = densité gaussienne de la sous-population k, "k = 1 ... K".

$$f_k(X) = \frac{1}{(2\pi)^{r/2} |\Sigma_x|^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (X - \bar{X})' \Sigma_x^{-1} (X - \bar{X}) \right]$$

5

où

r = p + q,

X = le vecteur des paramètres géologiques et des attributs sismiques ($X = [X_1, \dots, X_r]$),

10 $\bar{X}$ = la valeur moyenne des paramètres géologiques et des attributs sismiques,

Σ_x = matrice de variance - covariance associée.

Dans ce cas, la fonction de densité conditionnelle de ($G_1 \dots G_q$)

15 sachant que ($S_1=s_1, S_2=s_2, \dots S_p=s_p$) s'écrit:

$$\hat{f}(G_1, \dots G_q / S_1 = s_1 \dots S_p = s_p)$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^K p_k f_k(G_1 \dots G_q, S_1 = s_1 \dots S_p = s_p)}{\sum_{k=1}^K p_k f_k(S_1 = s_1 \dots S_p = s_p)}$$

20

$$= \frac{\sum_{k=1}^K p_k f_k(G_1 \dots G_q, S_1 = s_1 \dots S_p = s_p)}{\sum_{k=1}^K p_k \left[\int_{g_1} \dots \int_{g_q} f_k(G_1 = g_1 \dots G_q = g_q, S_1 = s_1 \dots S_p = s_p) dg_q \dots dg_1 \right]}$$

La validité de la méthode selon l'invention a été testée notamment sur un réservoir pétrolier d'environ 70 m d'épaisseur

25 contenant des hydrocarbures liquides, développé par une

soixantaine de puits et couvert par des opérations de prospection sismique de surface 2D à maille dense.

Les niveaux producteurs correspondent à des grès, des grès dolomitiques et des dolomies vacuolaires séparés par des niveaux
5 couvertures de type argile, argile anhydritique ou dolomicrite. Les caractéristiques pétrophysiques des réservoirs sont très variables d'un puits à l'autre ; elles sont essentiellement conditionnées par la nature lithologique du réservoir (grès de forte porosité ou dolomies moins poreuses).

10 Les données de puits disponibles étaient des carottes prélevées dans quelques puits, des mesures diagraphiques brutes dans tous les puits et celles obtenues par une interprétation combinée de ces mesures en termes de lithofaciès avec six lithofaciès majeurs :

- 15 - couvertures argileuses,
 - dolomicrites,
 - réservoirs dolomitiques,
 - réservoirs gréseux,
 - dolomies vacuolaires,
20 - couvertures anhydritiques.

La connaissance de la répartition spatiale des différents lithofaciès est capitale car elle conditionne les propriétés pétrophysiques du réservoir. C'est pourquoi on caractérise sur cet
25 exemple chaque puits au niveau du réservoir par les épaisseurs cumulées (sur l'ensemble de la formation étudiée) des six lithofaciès. Ces six paramètres étaient en l'occurrence les paramètres géologiques à calibrer avec les attributs sismiques.

Le toit du réservoir a été pointé sur les données sismiques disponibles sur le champ (22 profils sismiques avec 500 m entre
30 lignes, 17 m entre points miroirs, avec un pas d'échantillonnage de 4ms en temps double) après un calage entre l'échelle des temps et celle de profondeur réalisé au niveau des puits.

A partir du toit du réservoir, un intervalle de temps ou fenêtre sismique temporelle de taille constante (32 ms temps
35 double) a été analysé, correspondant donc à l'intervalle

profondeur au niveau des couches productrices. Les portions de traces sismiques ainsi définies ont été caractérisées par des combinaisons linéaires des amplitudes initiales, au nombre de quatre, qui constituent ainsi les attributs sismiques à calibrer avec les paramètres géologiques.

La population d'étalonnage retenue comprenait les données géologiques associées aux différents puits du champ et, pour chaque puits, les trois traces sismiques (telles que RWi... Rwn etc Fig.1) les plus proches.

La méthode selon l'invention a été utilisée pour prédire l'épaisseur cumulée de la lithologie "réservoirs gréseux" entre les puits, qui était le paramètre le plus intéressant pour déterminer le comportement pétrophysique du réservoir. La population d'étalonnage a donc été représentée dans un espace de dimension 5 (défini par l'épaisseur cumulée du lithofaciès grès et les quatre attributs sismiques), où une approximation de la fonction de densité multivariable par la somme de fonctions de densité gaussiennes a été recherchée. Comme le montre le diagramme de la Fig.4, la relation entre le paramètre géologique et les attributs sismiques est loin d'être linéaire.

On a décomposé la population d'étalonnage en six classes gaussiennes ce qui a permis d'approximer la densité de probabilité multivariable de la population d'étalonnage par la formule suivante :

25

$$\hat{f}(x) = \sum_{k=1}^6 p_k f_k(x)$$

$$\text{où } f_k(x) = \frac{1}{(2\pi)^{5/2} |\Sigma_k|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (x - \bar{x})' \Sigma_k^{-1} (x - \bar{x}) \right]$$

On voit sur la Fig.3 en particulier que la qualité de l'approximation est satisfaisante. La recherche de cette approximation optimale constitue la phase d'étalonnage.

A partir de l'expression de l'approximation de la densité de probabilité multivariable, on a pu calculer la fonction de densité du paramètre géologique, conditionnée par les valeurs des attributs sismiques, ce qui revenait à prédire la distribution du paramètre géologique connaissant les attributs sismiques. La distribution prédite de l'épaisseur des grès relativement aux attributs sismiques est représentée sur les Fig. 5A à 5D pour quelques puits.

La valeur prédite peut être caractérisée par des paramètres statistiques classiques comme le mode de la distribution (valeur la plus probable), la valeur moyenne, les quartiles, etc. Il est à noter que pour la plupart des puits de la population d'étalonnage, le mode de la distribution prédite est très proche de la valeur réelle de l'épaisseur des grès (cf. : Fig. 6). Puisque la distribution est entièrement connue, l'incertitude attachée à la prédiction peut être quantifiée par différentes mesures, telles l'écart-type ou l'intervalle interquartile.

Ce processus de calibrage a été ensuite appliqué à l'ensemble des traces sismiques obtenues à l'issue de la campagne d'exploration sismique 2D effectuée sur le champ, permettant de cartographier l'épaisseur possible des grès de la formation entre les puits avec un maillage fin (celui obtenu par la prospection sismique). Sur la carte de la Fig. 7, la valeur estimée est celle du mode de la distribution. Cette carte complète la connaissance du réservoir donnée par les seuls puits, permettant une implantation de nouveaux puits dans les zones les plus favorables (où il y a une forte épaisseur cumulée de grès), mais fournissant aussi une description complémentaire des caractéristiques géologiques du réservoir à prendre en compte dans l'élaboration du modèle de gisement.

REVENDICATIONS

- 1) Méthode pour prédire des paramètres géologiques d'une formation souterraine (F), à partir d'informations géologiques
5 obtenues à la suite de mesures ou analyses effectuées dans un ou plusieurs puits forés traversant la formation et à partir d'une collection de traces sismiques obtenues par exploration sismique de la formation, cette collection comprenant un ensemble de traces constitué des traces obtenues au voisinage immédiat des
10 puits, dans laquelle on délimite un intervalle d'analyse sur les traces sismiques au niveau de la formation souterraine, compatible avec la configuration de la formation, on caractérise les portions de traces sismiques, à l'intérieur dudit intervalle d'analyse, par un ensemble de p attributs, on déduit desdites
15 informations géologiques disponibles, un certain nombre q de paramètres géologiques et on forme une population d'étalonnage constituée de points auxquels on associe les p attributs attachés aux traces sismiques dudit ensemble de traces et les q paramètres géologiques, la méthode étant caractérisée en ce que:
- 20 - on procède à un calibrage statistique sur la population de points dans un espace de représentation à $p+q$ dimensions, en recherchant une approximation de la fonction de densité multivariable relative à ladite population de façon à établir une relation empirique entre lesdits paramètres géologiques et
25 lesdits attributs sismiques; et
- on applique cette relation aux traces sismiques de ladite collection, autres que celles dudit ensemble de traces, de manière à prédire les q paramètres géologiques correspondants associés aux attributs sismiques desdites autres traces, ainsi
30 que les incertitudes sur les paramètres géologiques prédits.
- 2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que la prédiction des paramètres géologiques consiste en une estimation desdits paramètres.

3) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que la prédiction des paramètres géologiques consiste en une simulation desdits paramètres pour représenter les incertitudes.

4) Méthode selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que ledit calibrage statistique comporte la détermination d'une approximation optimale de la fonction de densité de probabilité multivariable de la population d'étalonnage par une somme finie de densités de probabilité multivariées, appartenant à une famille de lois de probabilité déterminée, et l'utilisation de cette approximation à des fins de calibrage.

5) Méthode selon la revendication 4, caractérisée en ce que l'on choisit une famille de lois gaussiennes pour déterminer ladite approximation optimale.

6) Méthode selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que ladite formation est un réservoir recelant des effluents pétroliers, ledit intervalle d'analyse étant délimité en pointant sur lesdites traces le toit et la base du réservoir.

7) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que lesdits attributs sismiques sont obtenus à partir des amplitudes de chaque portion de trace sismique dudit ensemble.

8) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que lesdits attributs sismiques sont obtenus à partir du module du signal analytique.

9) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que lesdits attributs sismiques sont obtenus en déterminant le spectre d'amplitude desdites portions de traces.

10) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que lesdits paramètres géologiques sont obtenus par analyse d'échantillons prélevés dans les puits.

11) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que lesdits paramètres géologiques sont obtenus par analyse de diagraphies réalisées au moyen d'outils descendus dans les puits.

12) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on choisit comme paramètre géologique, la porosité moyenne desdits échantillons.

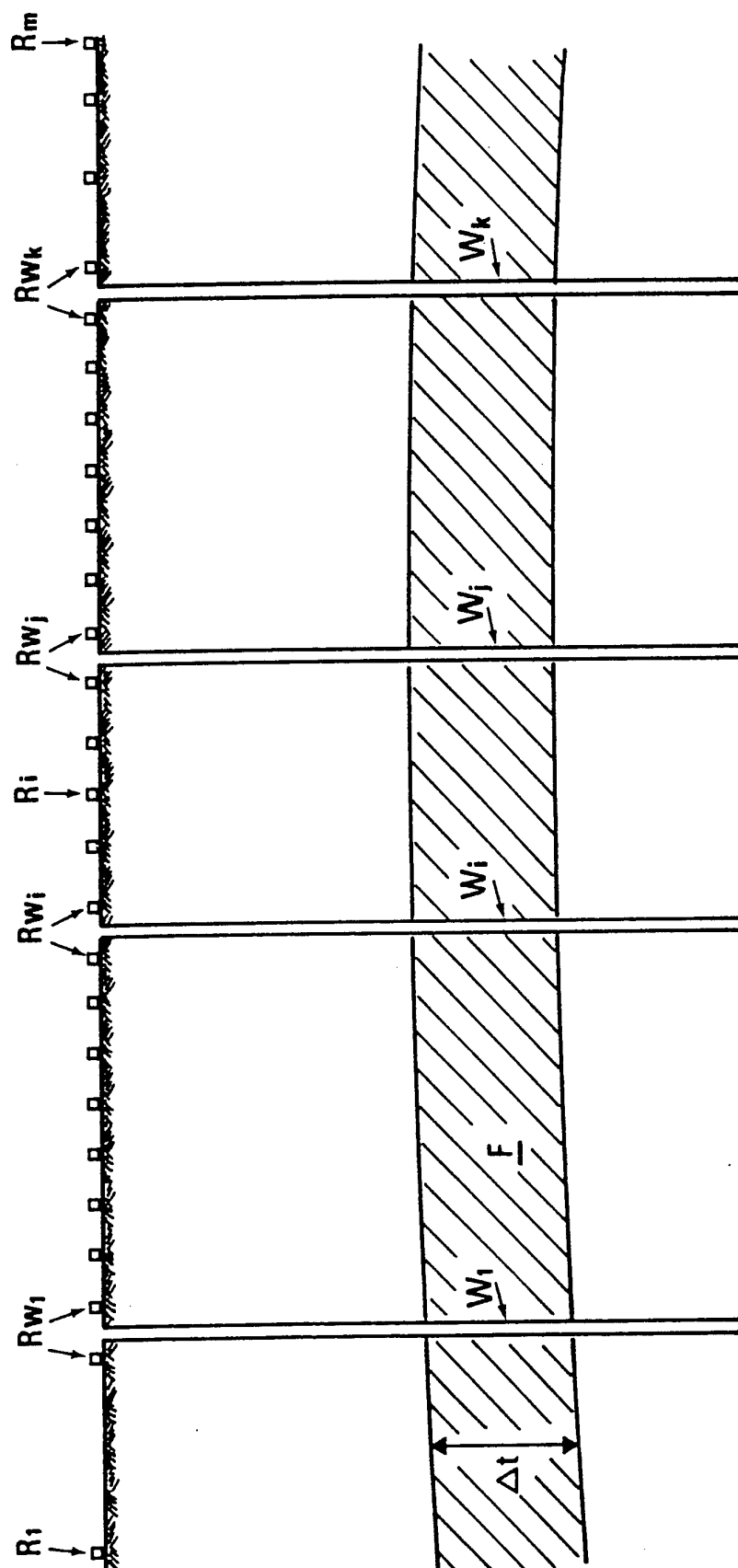
5 13) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on utilise des traces sismiques obtenues par exploration sismique de la formation.

14) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on utilise des traces sismiques synthétiques calculées à partir de données réelles de puits.

10 15) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on utilise des traces sismiques synthétiques calculées à partir de données synthétiques de puits.

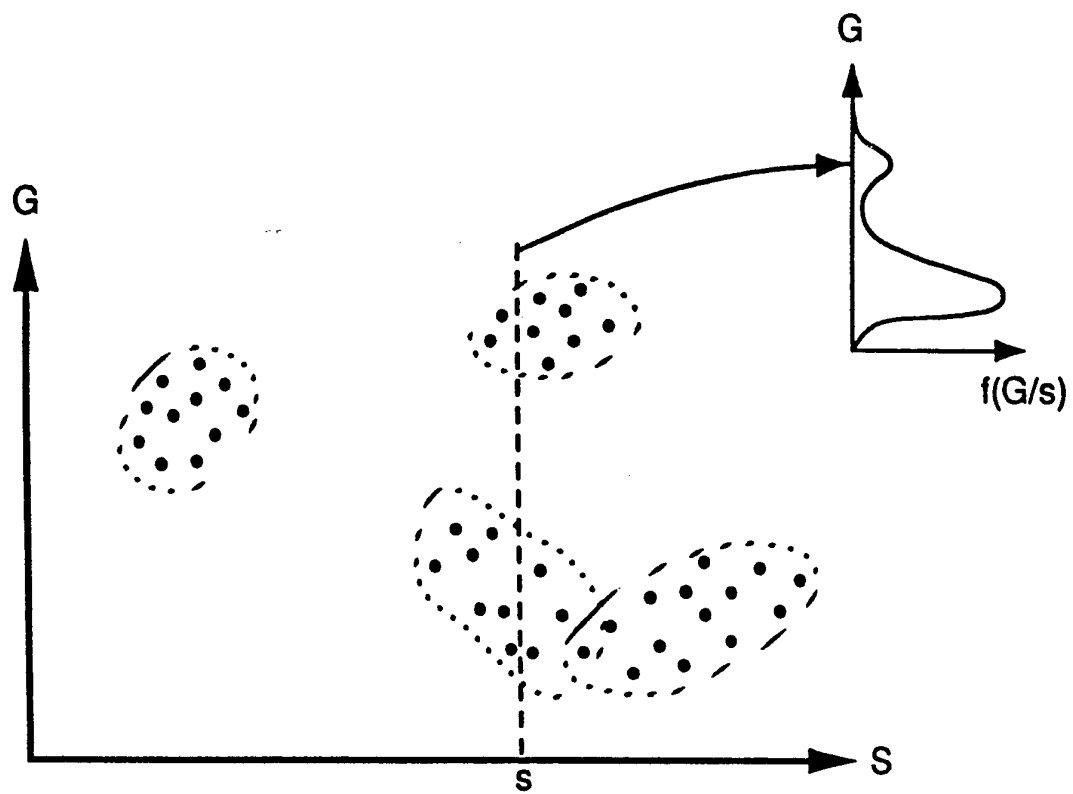
1/11

FIG.1



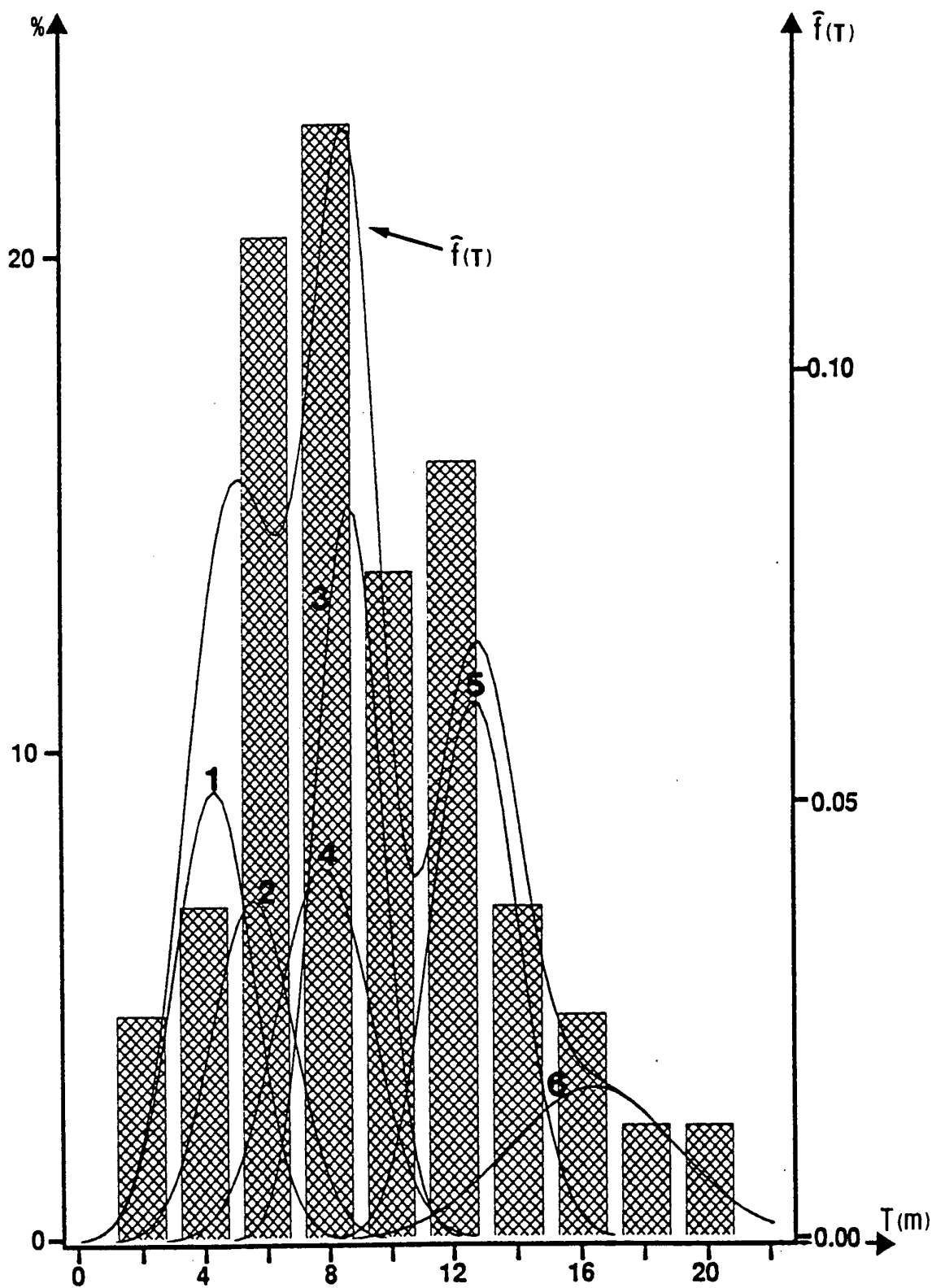
2/11

FIG.2



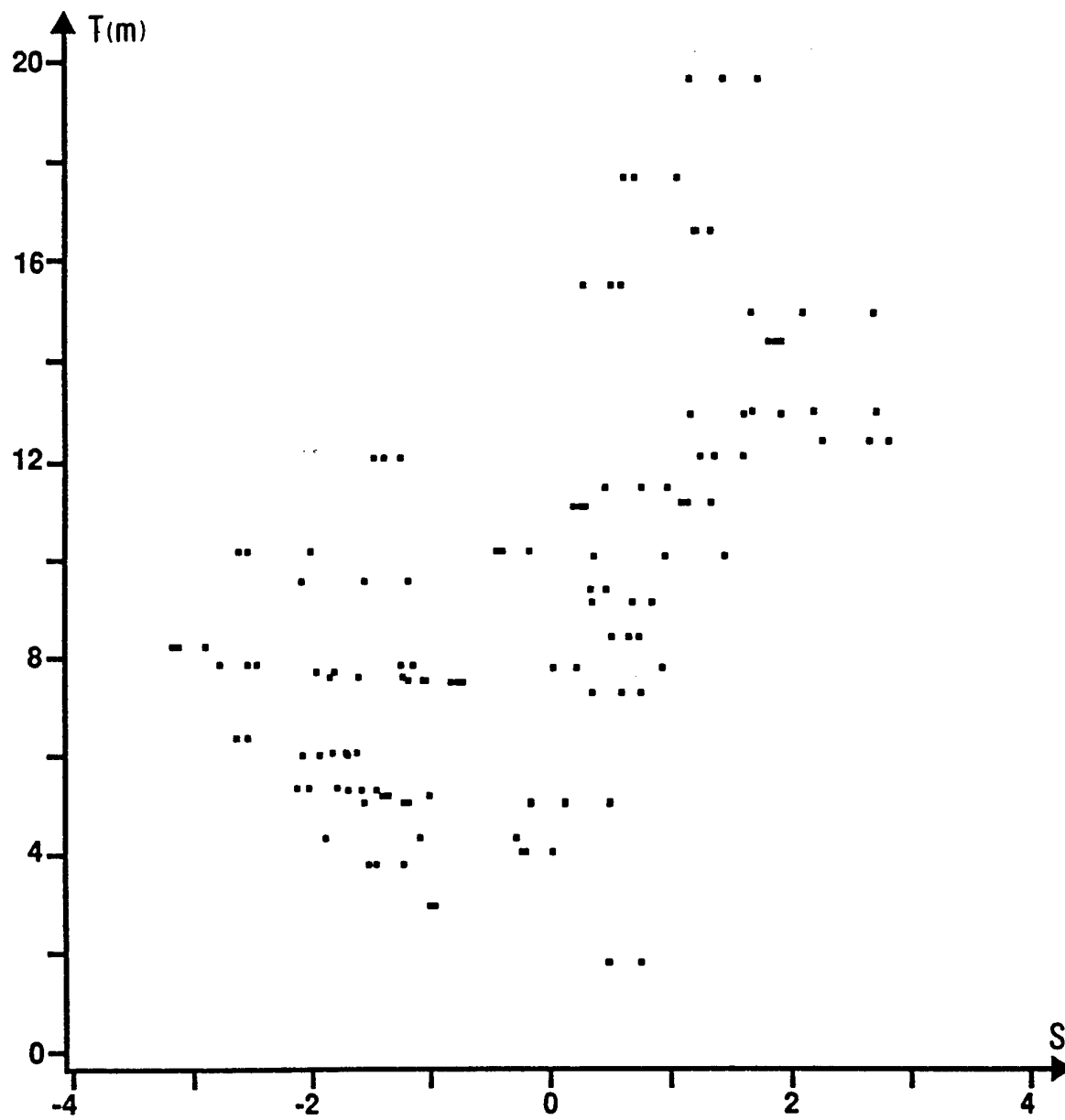
3/11

FIG.3



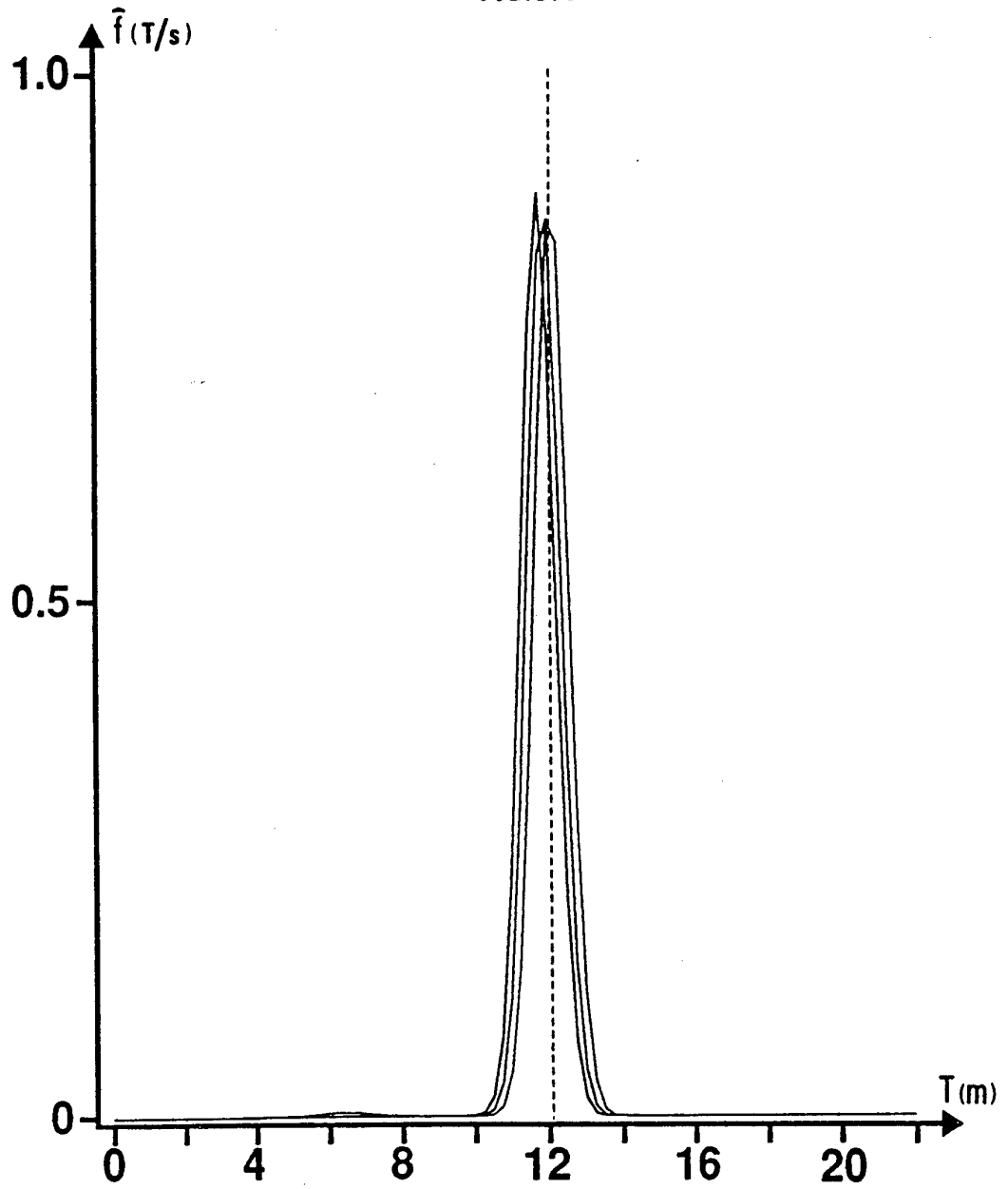
4/11

FIG. 4

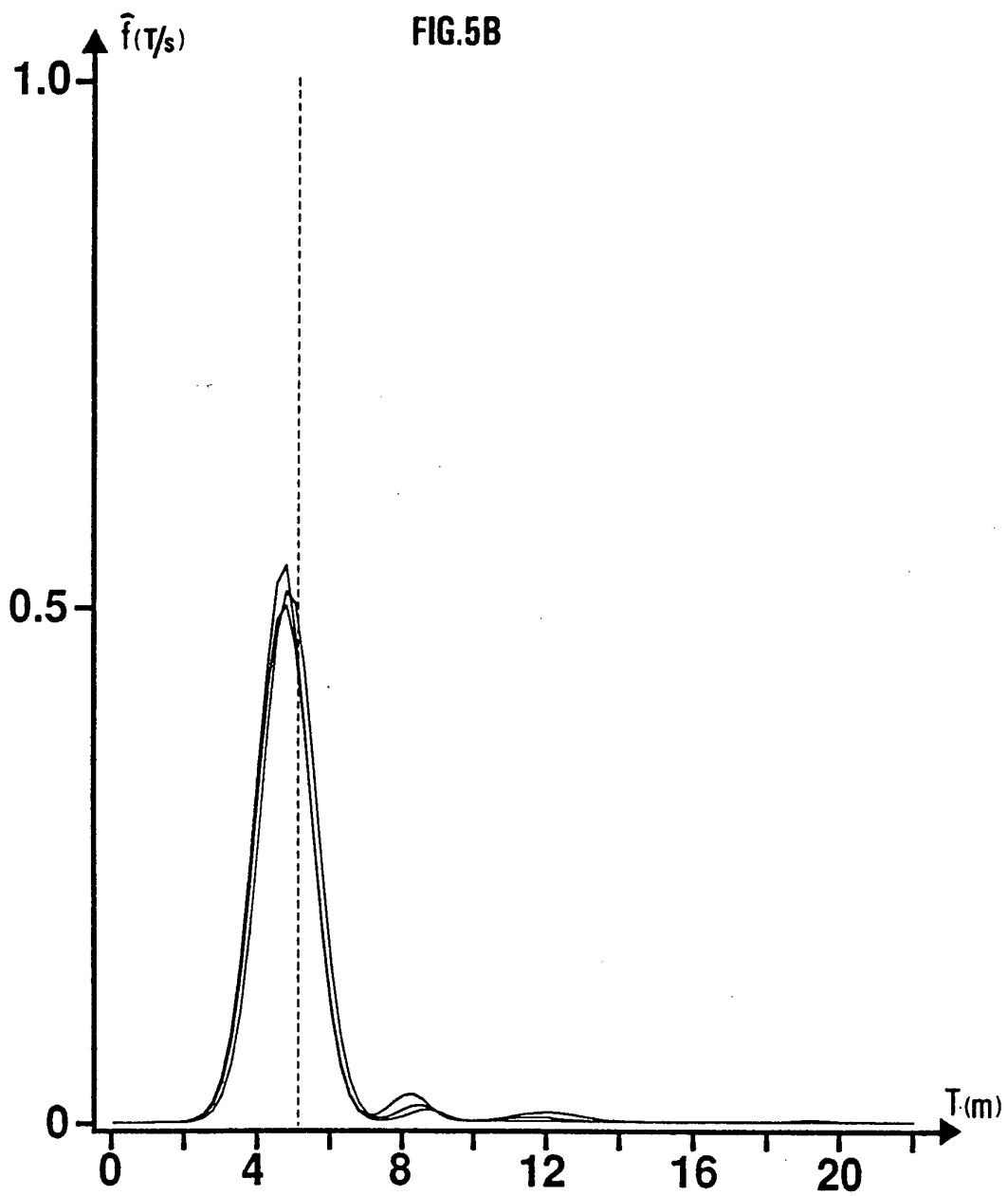


5/11

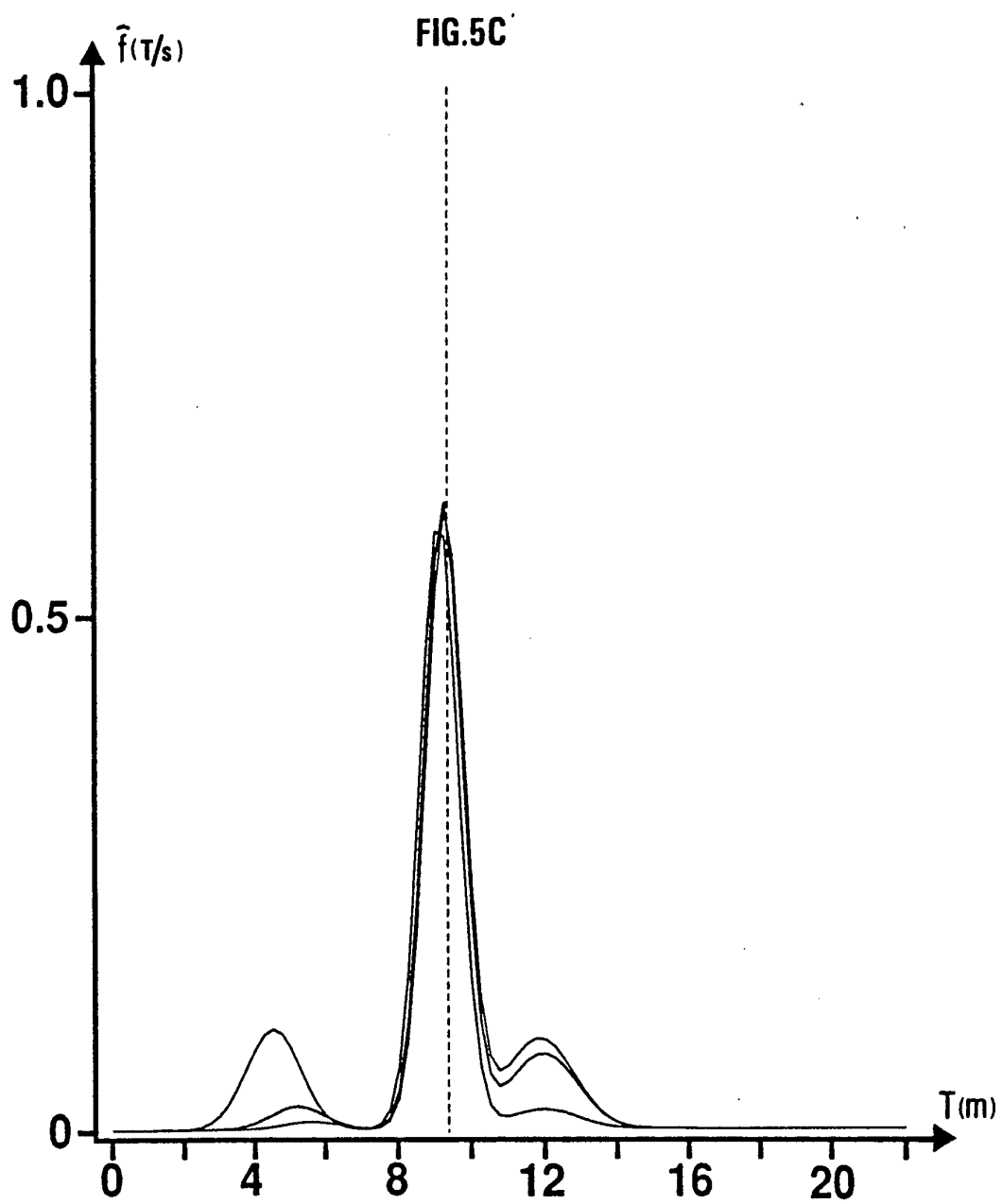
FIG.5A



6/11

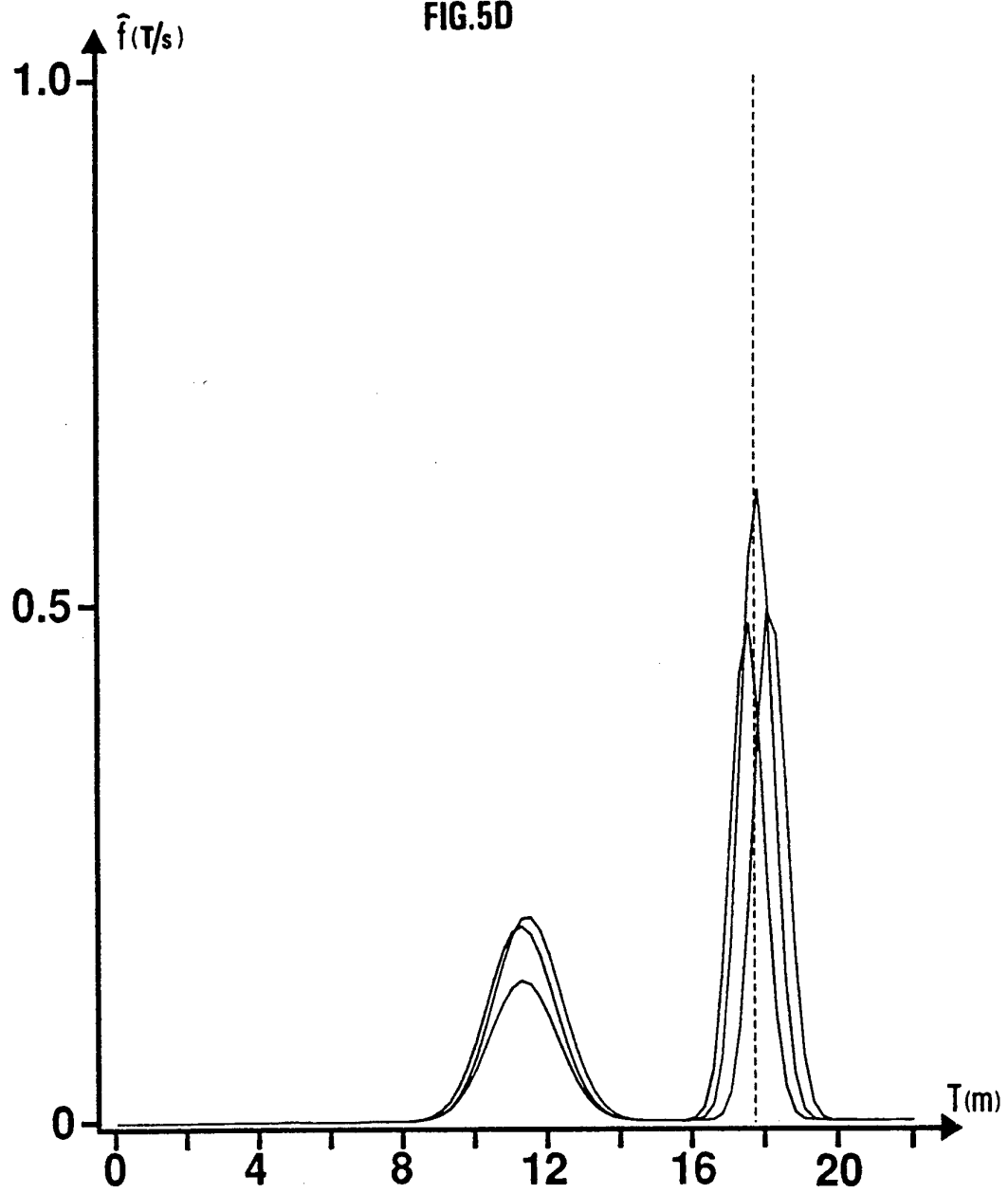


7/11



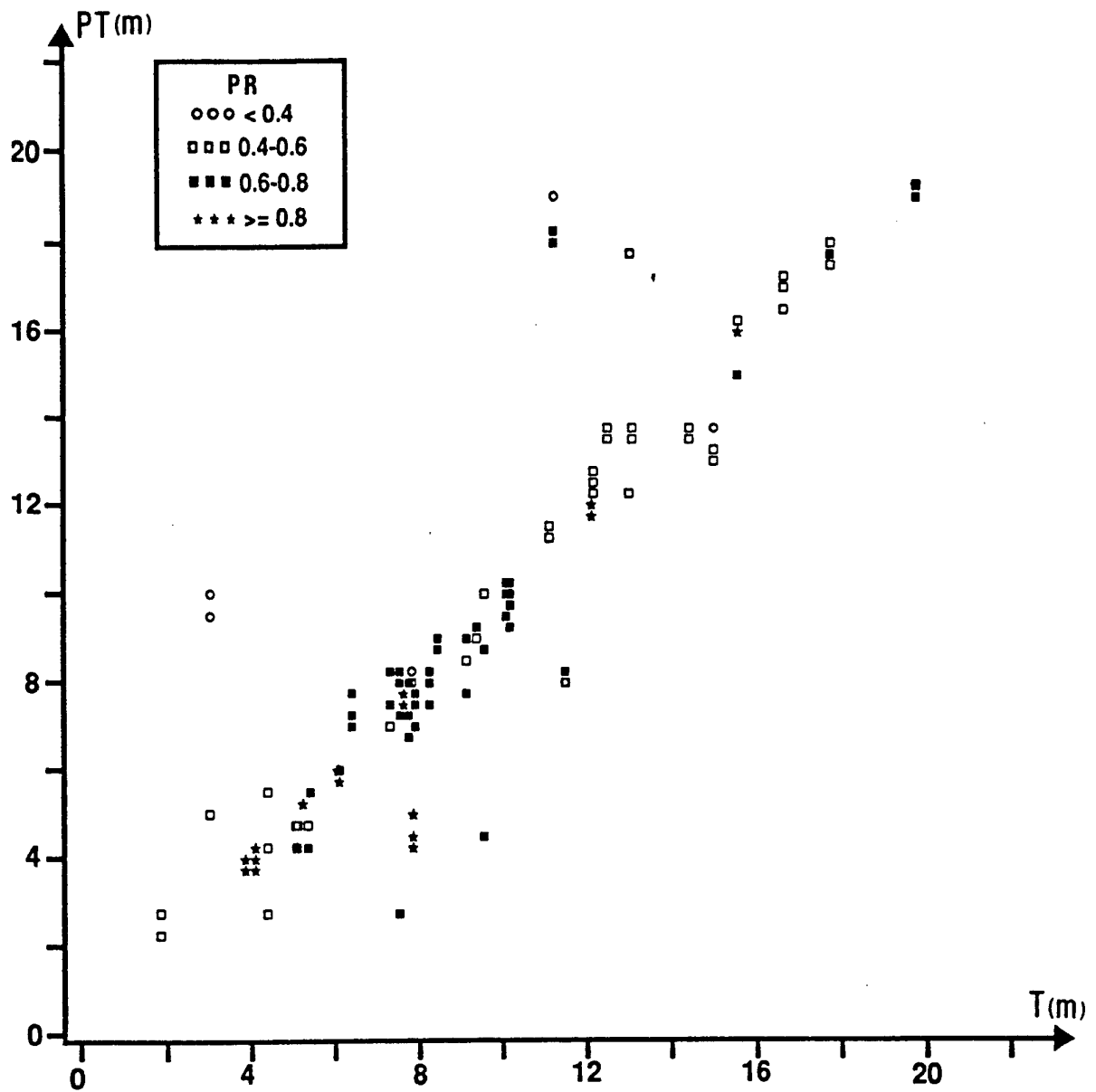
8/11

FIG.5D



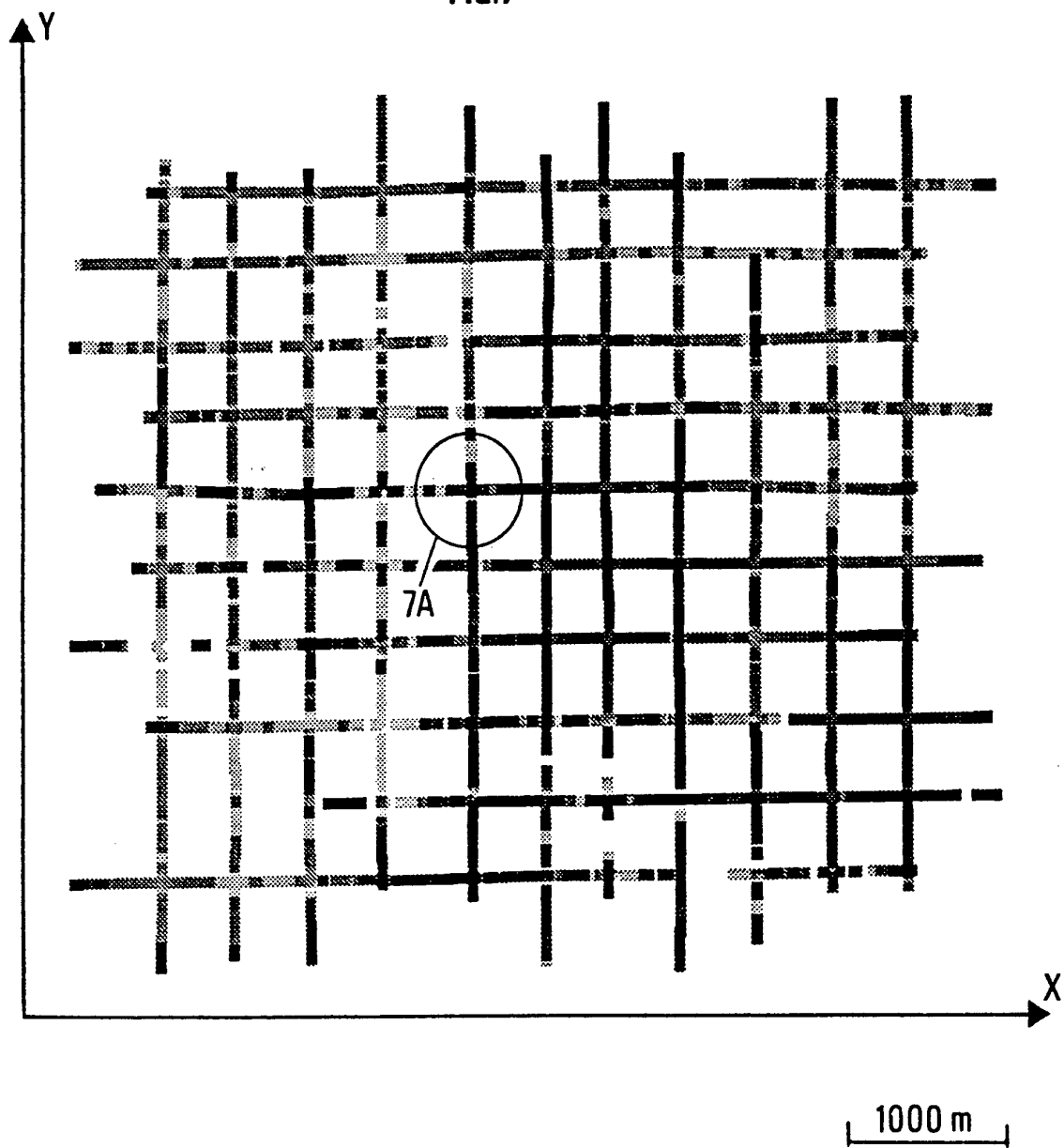
9/11

FIG.6



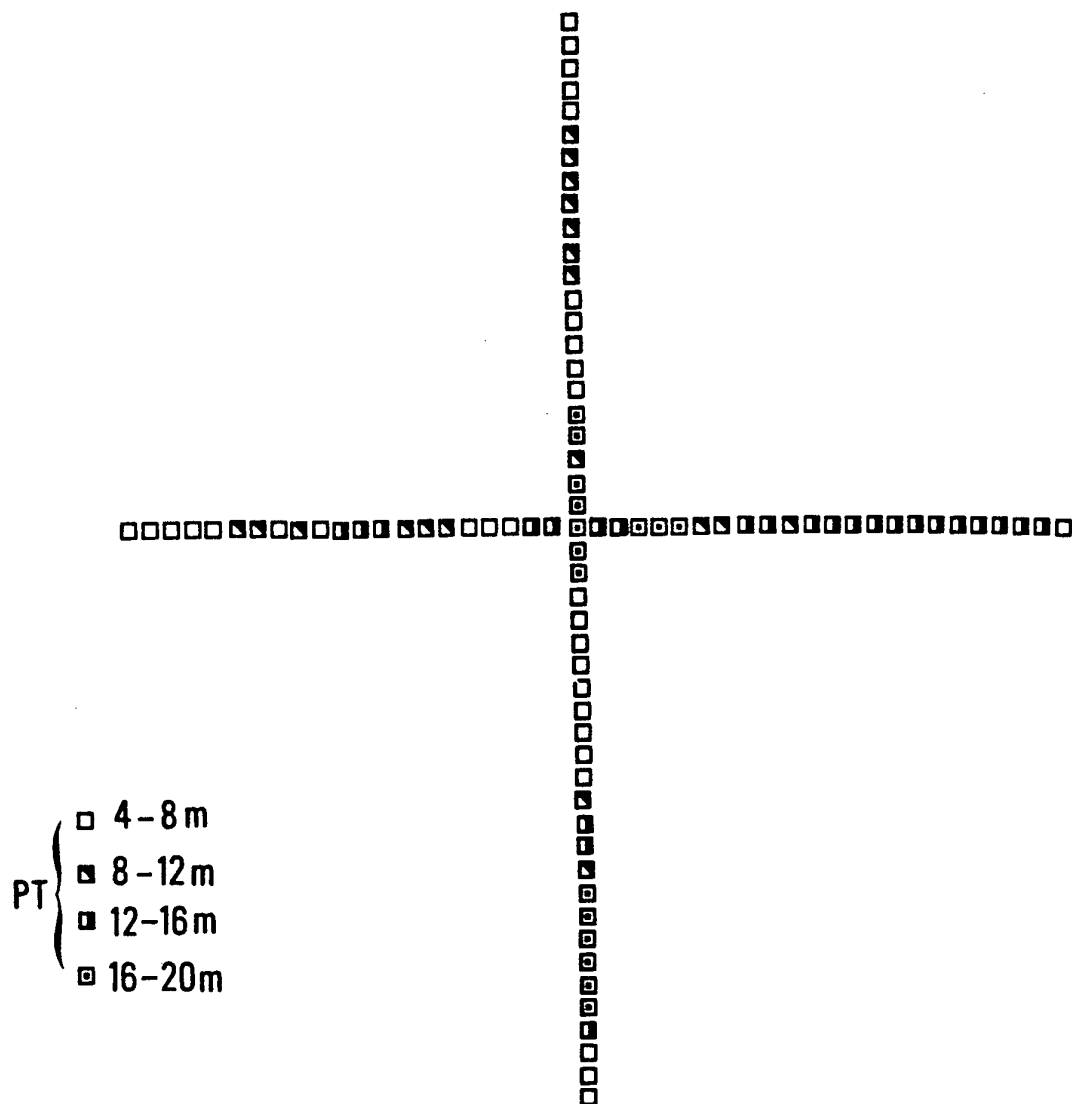
10/11

FIG.7



11/11

FIG.7A



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/FR 94/01087A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 6 G01V1/28

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 6 G01V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US,A,4 926 394 (DOYEN) 15 May 1990 see column 3, line 38 - column 5 ---	1
A	US,A,4 817 062 (DE BUYL ET AL) 28 March 1989 see claim 1 ---	1
A	US,A,4 293 309 (MILLER) 6 October 1981 see claim 1 ---	1
A	GEOPHYSICS, vol.53, no.10, October 1988, TULSA, USA pages 1263 - 1275 P.M. DOYEN 'Porosity from seismic data : a geostatistical approach' cited in the application -----	

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 December 1994

Date of mailing of the international search report

28.12.94

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+ 31-70) 340-3016

Authorized officer

Anderson, A

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

information on patent family members

International application No.
PCT/FR 94/01087

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US-A-4926394	15-05-90	GB-A, B 2244558	04-12-91
US-A-4817062	28-03-89	NONE	
US-A-4293309	06-10-81	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

 Demande Internationale No.
PCT/FR 94/01087

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE CIB 6 G01V1/28		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) CIB 6 G01V		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US,A,4 926 394 (DOYEN) 15 Mai 1990 voir colonne 3, ligne 38 - colonne 5 ---	1
A	US,A,4 817 062 (DE BUYL ET AL) 28 Mars 1989 voir revendication 1 ---	1
A	US,A,4 293 309 (MILLER) 6 Octobre 1981 voir revendication 1 ---	1
A	GEOPHYSICS, vol.53, no.10, Octobre 1988, TULSA, USA pages 1263 - 1275 P.M. DOYEN 'Porosity from seismic data : a geostatistical approach' cité dans la demande -----	
☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 15 Décembre 1994		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 28.12.94
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+ 31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Anderson, A

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Dem. Internationale No

PCT/FR 94/01087

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US-A-4926394	15-05-90	GB-A, B 2244558	04-12-91
US-A-4817062	28-03-89	AUCUN	
US-A-4293309	06-10-81	AUCUN	