

PROCEDE ET DISPOSITIF D'ACQUISITION DE DONNEES SISMIQUES MARINES

DOMAINE TECHNIQUE

5

La présente invention est relative à l'acquisition de données sismiques marines.

Plus particulièrement, elle concerne un procédé et un dispositif d'acquisition sismique marine permettant de produire des données
10 susceptibles d'être traitées en vue de la suppression de fantômes (« *ghost* » selon la terminologie anglo-saxonne).

Un « *fantôme* » est un signal parasite dû aux réflexions des ondes sismiques sur l'interface eau-air que forme la surface de l'eau.

15

ETAT DE LA TECHNIQUE

Lors d'une prospection sismique, le but est de permettre la localisation de réflecteurs sismiques situés à différentes profondeurs dans le sous-sol.
20 Les réflecteurs peuvent être de faible profondeur (événements dits « *shallow* » selon la terminologie anglo-saxonne), de profondeur moyenne ou de grande profondeur (événements dits « *deep* » selon la terminologie anglo-saxonne).

Une technique répandue de recherche de pétrole ou de gaz consiste à
25 effectuer une prospection sismique du sous-sol. Pour imager la structure du sous-sol, le géophysicien utilise les techniques de « *sismique-réflexion* ».

En sismique marine, la technique classique consiste à remorquer derrière un navire :

- une ou plusieurs source(s) d'énergie pour l'émission d'ondes
30 acoustiques, et
- des récepteurs sismiques disposés sur des flûtes (ou « *streamers* » selon la terminologie anglo-saxonne) positionnées horizontalement

à une profondeur constante Δz pour enregistrer l'onde acoustique réfléchiée par les interfaces entre formations géologiques.

La source communique une onde acoustique à l'eau, en créant un champ d'ondes (ondes de compression) qui se propage de façon cohérente vers le bas (propagation descendante) dans le sous-sol. Lorsque le champ d'ondes frappe une interface entre formations, appelées réflecteurs, il est réfléchi à travers le sous-sol et l'eau jusqu'aux récepteurs sismiques (propagation montante), où il est converti en signaux électriques et enregistré.

Les récepteurs sismiques sont disposés de façon telle que les signaux enregistrés, appelés traces, constituent des données sismiques à partir desquelles on peut construire une image des couches géologiques.

Un problème que l'on rencontre est celui de la réverbération et peut être expliqué comme suit. Une onde sismique réfléchiée par un réflecteur passe dans l'eau dans une direction généralement ascendante. Cette onde, que l'on appelle la « *primaire* », se propage dans l'eau et passe par le récepteur sismique qui enregistre sa présence.

Le champ d'ondes continue sa progression vers la surface de l'eau (qui a un coefficient de réflexion égal à -1), où il est réfléchi vers le bas. Ce champ d'ondes réfléchi ou « *fantôme* » se propage également dans l'eau et passe par les récepteurs où il est à nouveau enregistré avec une polarité inverse et un retard Δt qui vaut, pour des ondes se propageant verticalement :

$$\Delta t = 2\Delta z / c,$$

Avec :

- Δt : la différence de temps entre les enregistrements par le récepteur respectivement de l'onde primaire et du fantôme,
- Δz la distance entre la flûte et la surface de l'eau,
- c la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau (à savoir 1500m/s).

Cette réverbération du champ d'ondes sismique dans l'eau affecte les données sismiques, en amplifiant certaines fréquences et en atténuant d'autres, ce qui rend difficile la localisation des réflecteurs.

Le fantôme correspond, dans le domaine spectral, à un filtre de fonction de transfert :

$$G(f) = 1 - \exp(2j\pi f \Delta t),$$

Cette fonction de transfert $G(f)$ est nulle pour les fréquences f multiples

5 de f_n , avec $f_n = \frac{1}{\Delta t} = \frac{c/2}{\Delta z} = \frac{750}{\Delta z}$

Ces fréquences pour lesquelles une fonction de transfert est nulle sont appelées des « *notches* » (« *notch* » étant le terme anglais pour « encoche »). Les notches sont particulièrement gênants car il n'est pas possible de les déconvoluer.

10 Dans les années 1980, des techniques d'acquisition à l'aide de flûtes pentées ont été proposées. De telles techniques sont notamment décrites dans les documents US 4 353 121 et US 4 992 992.

Dans le premier document, on utilise une flûte sismique d'une longueur de 1.2 km présentant une inclinaison de l'ordre de 2 degrés avec
15 la surface de l'eau.

Avec cette configuration, c'est l'opération de sommation des données qui assure la suppression des fantômes. En effet les données acquises sont redondantes, et le procédé de traitement comporte une étape de sommation (ou « *stack* » selon la terminologie anglo-saxonne). Les enregistrements
20 contribuant à cette somme, ayant été enregistrés par des récepteurs différents, présentent des notches à des fréquences différentes, de sorte que l'information manquante du fait de la présence d'un notch sur un récepteur sismique est obtenue à partir d'un autre récepteur.

Un dispositif utilisant une flûte sismique d'une longueur de 1 km a une
25 profondeur d'investigation limitée à raison de sa longueur et ne permet pas de localiser des réflecteurs sismiques situés à plusieurs kilomètres de profondeur.

Les flûtes utilisées actuellement en sismique marine 3D, adaptées à la localisation de réflecteurs profonds, ont généralement une longueur de
30 l'ordre de 6 à 10 kilomètres. Le principe d'inclinaison proposé dans les brevets précités ne peut leur être appliqué, car il aboutirait, avec un angle de 2 degrés, à une profondeur maximum de 280 m, alors qu'en pratique on

considère comme un maximum une profondeur de l'ordre de 50 m. De fait, ce principe n'est plus utilisé depuis la fin des années 1980.

Depuis les années 1990, on s'intéresse à des structures géologiques de plus grande profondeur.

- 5 Pour la localisation de réflecteurs profonds, les ondes acoustiques de hautes fréquences ne sont pas adaptées à cause de l'atténuation élevée qu'elles subissent au cours de leur propagation.

De façon à garder une bande passante en profondeur comprenant un nombre suffisant d'octaves, ce qui est la condition nécessaire d'une bonne
10 image, il faut gagner une octave dans les basses fréquences, portant la bande passante traditionnelle de 3 octaves 5-40 Hz à une bande passante 2.5-20 Hz par exemple. Pour ce faire, il est possible d'augmenter la profondeur de la flûte. Toutefois, il ne suffit pas de privilégier les basses fréquences car les hautes fréquences sont nécessaires pour estimer
15 précisément le modèle de vitesse des couches superficielles.

Il faut donc améliorer le rapport signal-à-bruit pour les ondes acoustiques de basses fréquences sans le détériorer pour les ondes acoustiques de hautes fréquences.

Un but de la présente invention est de proposer une technique
20 d'acquisition de données sismiques marines présentant une dynamique étendue quant à la profondeur des réflecteurs susceptibles d'être localisés et qui soit simple et efficace sur le plan opérationnel et économique.

PRESENTATION DE L'INVENTION

25

Il est prévu selon l'invention un procédé d'acquisition d'ondes sismiques au moyen d'au moins une flûte remorquée par un bateau et comportant une pluralité de récepteurs sismiques, caractérisé en ce que la flûte comporte une portion de tête dans laquelle la profondeur des récepteurs augmente en
30 s'éloignant du bateau de sorte que ladite portion de tête présente une première pente, et une portion arrière comprenant au moins une section présentant une seconde pente différente de la dite première pente.

PRESENTATION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui suit, laquelle est purement illustrative et non limitative et doit être lue en regard des dessins annexés, sur lesquels :

- les figures 1 et 2 illustrent des dispositifs d'acquisition faisant partie de l'état de la technique,
- les figures 1' et 2' illustrent des spectres d'un événement peu profond obtenus en utilisant les dispositifs illustrés aux figures 1 et 2,
- les figures 3 et 4 illustrent deux modes de réalisation d'un dispositif d'acquisition selon l'invention,
- les figures 3' et 4' illustrent des spectres d'un événement peu profond obtenus en utilisant les dispositifs illustrés aux figures 3 et 4,
- la figure 5 illustre un autre mode de réalisation du dispositif d'acquisition selon l'invention
- la figure 6 est une représentation schématique illustrant un procédé permettant le traitement des données sismiques marines enregistrées par le dispositif d'acquisition selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION

25

En référence à la figure 1, on a illustré un dispositif d'acquisition de l'état de la technique, comprenant une flûte sismique 1 tractée par un navire 2. La flûte 1 comporte une pluralité de récepteurs 4a, 4b espacés à intervalles réguliers, de l'ordre de quelques mètres, le long de la flûte. Les récepteurs sont habituellement des hydrophones. La flûte 1 est en outre équipée de façon classique de dispositifs de commande de profondeur 5 (désignés en anglais par le terme « bird »), montés sur la flûte à intervalles réguliers, par exemple à environ 300 mètres l'un de l'autre. De tels

dispositifs de commande sont disponibles commercialement. Chacun des dispositifs 5 peut être réglé individuellement pour positionner la flûte à une profondeur déterminée.

Dans le dispositif représenté à la figure 1, les dispositifs 5 sont réglés à
5 des profondeurs croissantes à partir de la tête de la flûte 1 de manière que la flûte 1 présente une pente avec la surface de l'eau 3. Le récepteur sismique 4a le plus proche du navire 2 est situé à une profondeur de 7,5 mètres et le récepteur sismique 4b le plus éloigné du navire 2 (à une distance horizontale qui est généralement comprise entre 6 et 10 km dans
10 les dispositifs d'acquisition utilisés actuellement) est situé à une profondeur de 37,5 mètres. On notera que sur la figure 1 comme sur les autres figures, la représentation de la pente est très exagérée par rapport à la réalité.

Deux spectres 10, 20 d'images finales (après sommation) d'un réflecteur peu profond (profondeur de 800 mètres) sont illustrés sur la figure
15 1'.

Le premier spectre 10 (dénommé dans la suite « *spectre idéal* ») est obtenu lorsque la modélisation n'inclut pas de fantôme. Il s'agit donc du spectre idéal qui serait obtenu si le signal parasite fantôme était totalement supprimé des signaux enregistrés par les hydrophones (traces).

20 Le deuxième spectre 20 (dénommé dans la suite « *spectre effectif* ») est obtenu en utilisant le dispositif illustré à la figure 1.

On constate que ces deux spectres ont des formes très différentes. En particulier, la largeur du spectre effectif 20 est inférieure à la largeur du spectre idéal 10 : le spectre effectif 20 comporte moins d'énergie pour les
25 fréquences basses (inférieures à 10 Hz) et hautes (supérieures à 60 Hz) que le spectre idéal 10.

Or ce sont justement dans ces bandes de fréquences que le rapport signal-à-bruit doit être amélioré.

En référence à la figure 2, on a illustré un autre dispositif d'acquisition
30 comprenant une flûte 1 tractée par un navire 2. Les dispositifs de commande de profondeur 5 dont la flûte est équipée sont réglés de manière que la flûte 1 présente une pente avec la surface de l'eau 3. Le récepteur sismique 4a le plus proche du navire 2 est cette fois situé à une profondeur

de 15 mètres et le récepteur sismique 4b le plus éloigné du navire 2 (à une distance horizontale de 8 km ou davantage) est situé à une profondeur de 37,5 mètres.

Ainsi, la seule différence par rapport au dispositif de la figure 1
5 concerne la profondeur du récepteur sismique le plus proche du navire.

Le fait d'augmenter la profondeur du récepteur sismique le plus proche du navire a l'intérêt de minimiser l'effet du bruit de houle qui n'affecte que les zones proche de la surface.

Les spectres 10, 20 d'images finales (après sommation) du même
10 réflecteur peu profond (profondeur de 800 mètres) sont illustrés sur la figure 2'.

Le spectre idéal 10 est obtenu lorsque la modélisation n'inclut pas de fantôme. Le spectre effectif 20 est obtenu en utilisant le dispositif illustré à la figure 2.

15 On constate ici encore que ces deux spectres ont des formes très différentes, le spectre effectif 20 comprenant le notch d'un récepteur à 15m, situé à 50 Hz, ce notch étant toujours présent, bien que sous une forme atténuée.

La suppression de fantôme imparfaite obtenue en utilisant les dispositifs
20 d'acquisition illustrés aux figures 1 et 2 est liée à la profondeur du réflecteur considéré (800 mètres).

Pour un réflecteur à cette profondeur, les données enregistrées par les récepteurs relativement proches de la source sismique ont une influence prépondérante dans la sommation, les récepteurs lointains ayant une
25 contribution négligeable.

Donc pour un réflecteur peu profond, seuls les enregistrements des récepteurs sismiques positionnés dans la portion de tête de la flûte (les plus proches du navire) sont utilisés.

Ainsi dans le cas des dispositifs illustrés sur les figures 1 et 2, la
30 dynamique de profondeur des récepteurs, qui détermine la diversité des notches, est insuffisante pour une suppression de fantôme de bonne qualité lors du traitement.

En référence aux figures 3, 4 et 5, on a illustré différents modes de réalisation de l'invention. Par souci de simplicité, ces figures représentent une seule flûte sismique 1, mais en pratique, les dispositifs d'acquisition sismique actuels comprennent en fait une pluralité de flûtes 1 (huit, dix ou
5 davantage) remorquées par le bateau 2, et l'invention est applicable quel que soit le nombre de flûtes remorquées par le bateau.

Chaque flûte 1 comporte une pluralité de récepteurs sismiques 4, typiquement des hydrophones, qui produisent des signaux lorsqu'ils reçoivent des ondes sismiques marines émises par une source d'émission 6
10 remorquée par le bateau 2 et activée à intervalles réguliers (représentée comme ponctuelle par souci de simplicité mais constituée en pratique de plusieurs lignes de canons à air parallèles), et des dispositifs de commande de profondeur 5. Les flûtes sont de façon appropriée des flûtes de type solide, commercialisées par Sercel sous la marque Sentinel mais l'invention
15 est applicable à d'autres types de flûtes. Les dispositifs de commande de profondeur peuvent être de façon appropriée des appareils du type Nautilus (marque déposée de Sercel), qui permettent aussi le positionnement latéral des flûtes, mais là aussi d'autres types de dispositifs de commande de profondeur sont utilisables pour la mise en œuvre de l'invention. Les
20 distances entre récepteurs 4 adjacents sont de l'ordre de quelques mètres, et de façon appropriée, les distances entre dispositifs de commande de profondeur 5 adjacents sont comprises entre 200 et 400 mètres.

De façon connue, il est prévu des moyens, non représentés, pour déterminer les coordonnées de position de la source 6 et des récepteurs 4 à
25 chaque tir de la source 6.

Chaque flûte 1 comprend une portion de tête 1a et une portion arrière 1b. Chaque portion comprend une pluralité de récepteurs sismiques 4. Les dispositifs de commande de profondeur 5 de la portion de tête 1a sont réglés pour des profondeurs respectives qui augmentent en s'éloignant du
30 bateau de sorte que la portion 1a présente une pente par rapport à la surface de l'eau 3. Dans les modes de réalisation illustrés aux figures 3 et 4, les dispositifs de commande de profondeur 5 de la portion arrière 1b sont

réglés de façon uniforme de sorte que la portion 1b est horizontale, en d'autres termes elle présente une pente nulle.

Ces différentes configurations permettent d'avoir une dynamique de notches suffisante pour les réflecteurs peu profonds avec des récepteurs à
5 des profondeurs acceptables en pratique.

Dans le mode de réalisation illustré à la figure 3, le récepteur sismique le plus proche de la source sismique 6 est situé à une profondeur de 7,5 mètres. La portion de tête 1a a de façon appropriée une longueur comprise entre 1 et 3 km, par exemple égale à 2 km. Le récepteur sismique 4 de la
10 première portion 1a le plus éloigné de la source sismique 6 est situé à une profondeur de 37,5 mètres. La deuxième portion 1b étant horizontale, le récepteur 4 de la deuxième portion 1b le plus éloigné de la source 6 est également situé à une profondeur de 37,5 mètres. Bien entendu cette valeur n'est donnée qu'à titre d'illustration. La profondeur peut être choisie
15 dans chaque cas en fonction des conditions particulières (profondeur de la tranche d'eau, caractéristiques géologiques).

La figure 3' illustre deux spectres 10, 20 d'images finales (après sommation) d'un réflecteur peu profond (profondeur de 800 mètres).

Le premier spectre 10 (« *spectre idéal* ») est obtenu lorsque la
20 modélisation n'inclut pas de fantôme. Il s'agit donc du spectre idéal qui serait obtenu si le signal parasite fantôme était totalement supprimé des signaux enregistrés par les hydrophones (traces).

Le deuxième spectre 20 (« *spectre effectif* ») est obtenu en utilisant le dispositif illustré à la figure 3.

25 On constate que la suppression du fantôme est bien obtenue, puisque le spectre effectif 20 suit le spectre idéal 10. En particulier, le spectre effectif 20 a le même comportement que le spectre idéal pour les basses fréquences et les hautes fréquences.

La figure 4 illustre un mode de réalisation qui diffère de celui de la figure
30 3 par la profondeur du récepteur sismique le plus proche de la source sismique. Dans le cas de la figure 4, ce récepteur est situé à une profondeur de 15 mètres.

La figure 4' illustre les spectres d'images finales (après sommation) du même réflecteur peu profond obtenus à partir du dispositif de la figure 4 dans le cas idéal et dans le cas effectif.

En comparant le spectre idéal 10 et le spectre effectif 20, on vérifie que la suppression du fantôme a été correctement obtenue, que le comportement du spectre effectif 20 dans les basses et les hautes fréquences est similaire à celui du spectre idéal 10, et que le notch à 50 Hz est convenablement comblé.

Pour respecter des considérations hydrodynamiques, la pente dans la portion de tête 1a est de préférence inférieure à 2%. Ceci évite de créer des turbulences préjudiciables à la qualité des signaux enregistrés par les récepteurs sismiques. Cette pente est de préférence supérieure à 1%, ce qui fournit une plage de profondeurs de récepteurs suffisante pour une suppression de fantôme de bonne qualité lors du traitement.

En référence à la figure 5, on a illustré un autre mode de réalisation, dans lequel les dispositifs de commande de profondeur 5 sont réglés de telle sorte que la portion arrière 1b de la flûte 1 comprenne, à partir de la jonction avec la portion de tête, une section 1c de pente inférieure à celle de la portion de tête 1a, une section 1d de pente inférieure à celle de la section 1c et une section 1e de pente inférieure à celle de la section 1d. Dans ce mode de réalisation, le récepteur sismique le plus proche de la surface de l'eau est situé à une profondeur comprise entre 7 mètres et 8 mètres. Selon une variante de réalisation, la section 1e peut être horizontale, c'est-à-dire présenter une pente nulle. Selon une autre variante, les sections 1d et 1e forment une seule section de pente uniforme.

D'autres modes de réalisation de l'invention peuvent être envisagés. Ainsi, la portion arrière 1b peut comprendre une alternance de sections «montantes », dans lesquelles les profondeurs des récepteurs 4 diminuent en s'éloignant du bateau, et de sections « descendantes » dans lesquelles les profondeurs des récepteurs 4 augmentent en s'éloignant du bateau (comme c'est le cas pour les sections 1c et 1d de la figure 5). Les sections montantes et descendantes peuvent être de même longueur et de même pente. Comme indiqué précédemment, cette pente peut être comprise de

manière appropriée entre 1 et 1,5 %, et chacune des sections peut avoir une longueur de l'ordre de 1 km. Une telle disposition assure une variation de la profondeur des récepteurs tout au long de la flûte, ce qui assure une diversité des fréquences de notches permettant la suppression des fantômes par traitement, tout en maintenant la profondeur des récepteurs à l'intérieur d'une plage convenable du point de vue opérationnel. Par exemple, chacune des sections peut avoir une longueur de l'ordre de 1 km et une pente comprise entre 1 et 1,5%.

10 Procédé de traitement

Dans le cas de la présente invention, les données sismiques sont enregistrées par des récepteurs situés à des profondeurs différentes. Les procédés de traitement de données sismiques marines sont en général adaptés à des récepteurs situés tous à une même profondeur.

L'opération de « datuming » consistant à construire à partir des données enregistrées les données qui auraient été obtenues si les récepteurs avaient été à la même profondeur. Le procédé de traitement de données provenant d'une flûte pentée décrit dans US 4 353 121 comprend une étape de datuming 1D qui suppose que la propagation des ondes est verticale. Le brevet US 4 992 992 remplace le datuming 1D de US 4 353 121 par un datuming 2D, qui prend en compte l'angle de propagation dans le sens de la flûte, supposant implicitement que la propagation se fait dans le plan vertical passant par la flûte. Il est par ailleurs limité au cas où la flûte présente une pente d'angle constant.

La généralisation en 3 dimensions du procédé décrit dans US 4 992 992 en remplaçant le datuming 2D par un datuming 3D se heurte à la contrainte d'échantillonnage en y des géométries 3D actuelles : en effet l'on dispose avec les géométries d'acquisitions modernes de plusieurs flûtes qui échantillonnent la dimension y, mais le pas d'échantillonnage (la distance transversale entre 2 flûtes) est de l'ordre de 150m, un ordre de grandeur plus grand que la distance entre 2 récepteurs consécutifs sur une flûte (12.5m).

On en déduit que les procédés décrits dans US 4 353 121 US 4 992 992 ne sont pas applicables avec la géométrie d'acquisition correspondant aux modes de réalisation de l'invention décrits plus haut.

Le procédé de traitement ci-après permet d'obtenir directement une
5 image du sous-sol à partir des données provenant de l'acquisition 3D décrite ci-dessus en prenant en compte les directions de propagation non verticales.

Ce procédé comprend la réception des données sismiques marines provenant de l'acquisition 3D, la migration 3D des données sismiques et
10 l'obtention d'une image représentative de la topographie du sous-sol.

La migration 3D par point de tir est un procédé de traitement moderne des données sismiques, qui permet d'obtenir une image précise du sous-sol en tenant compte avec exactitude de la propagation des ondes dans des milieux complexes.

15 Une telle migration consiste à synthétiser l'onde incidente à partir des informations sur la source sismique et l'onde réfléchie à partir des données enregistrées.

Dans le cas d'une migration de type « *one-way* », le principe est le suivant.

20 L'onde incidente D (c'est-à-dire l'onde émise par la source) est supposée descendante. Cette onde incidente $D(x,y,z,t)$ est synthétisée de façon récursive en profondeur z , l'onde descendante étant initialisée à la profondeur de la source sismique z_s . L'onde incidente D à toutes les profondeurs $n\Delta z$ est ensuite calculée de manière récursive en calculant
25 l'onde incidente à la profondeur $z+\Delta z$ à partir de l'onde incidente à la profondeur z .

De façon analogue, l'onde réfléchie $U(x,y,z,t)$ est supposée montante et est initialisée en $z=z_r$ avec les données enregistrées par les récepteurs sismiques (dans le cas où tous les récepteurs ont la même profondeur).

30 L'onde réfléchie U dans tout le volume est ensuite calculée de manière récursive en calculant l'onde montante U à la profondeur $z+\Delta z$ à partir de l'onde montante à la profondeur z .

L'image du sous-sol est calculée par la cross-corrélation temporelle des deux volumes $D(x,y,z,t)$ et $U(x,y,z,t)$.

- L'altimétrie, c'est-à-dire le fait que la source et les récepteurs peuvent
5 avoir des profondeurs non nulles (et toutes différentes), peut être prise en compte en introduisant les sources et les récepteurs au cours des calculs récursifs en z : par exemple un récepteur à une profondeur z_r comprise entre $n\Delta z$ et $(n+1)\Delta z$ est introduit lors du calcul récursif de $U((n+1)\Delta z)$ à partir de $U(n\Delta z)$.
- 10 Par ailleurs, l'étape de migration est de façon appropriée une migration miroir adaptée, ainsi nommée par analogie avec la migration miroir (ou « *mirror migration* » selon la terminologie anglo-saxonne) et le filtre adapté utilisé en traitement du signal (consistant à convoluer une mesure $s(t)$ perturbée par une convolution par un filtre $h(t)$ par $h(-t)$ de façon à optimiser
15 le rapport signal-à-bruit).

Dans le cas d'une migration miroir, on utilise la surface de la mer comme un miroir : au lieu de « *regarder* » vers le fond marin, on « *regarde* » vers la surface de l'eau pour voir les réflecteurs situés en dessous des récepteurs sismiques.

- 20 En pratique, on considère les données sismiques non pas comme si elles avaient été enregistrées au niveau des récepteurs sismiques de la flûte, mais à une altitude au dessus de la surface de l'eau aussi haute que le récepteur situé à la plus grande profondeur, comme illustré à la figure 6.

Une technique d'imagerie par migration miroir est décrite par exemple
25 dans la publication "*Facilitating technologies for permanently instrumented oil fields*", Dan Ebrom, Xiuyuan Li, and Dwight Sukup, The Leading Edge, Vol. 19, No 3, pp. 282-285, March 2000.

- Dans cette publication, cette technique est utilisée dans le cadre d'une acquisition avec des récepteurs sismiques situés au fond de la mer 8a. On
30 utilise le principe de réciprocité et on considère donc fictivement des sources au fond de la mer (aux positions récepteurs) et des récepteurs en surface (aux positions sources).

L'imagerie miroir consiste à utiliser le fantôme source fictive pour obtenir l'image, ce qui peut s'effectuer en plaçant les sources fictives à leur position miroir par rapport à la surface de l'eau, les positions sources (x_s, y_s, z_s) étant changées en $(x_s, y_s, -z_s)$.

5 L'imagerie miroir permet de mieux éclairer les réflecteurs peu profonds.

Dans le cas de la migration miroir adapté, (x_r, y_r, z_r) étant les positions des récepteurs sur les flûtes, on initialise l'onde réfléchie (supposée montante) U d'une migration avec altimétrie à une altitude $-z_{\max}$, $z_{\max}$ étant la profondeur maximale des récepteurs sismiques (le maximum des z_r) et
10 l'altitude 0 correspondant à la surface de l'eau.

Lors de la descente récursive en z de l'onde U entre les valeurs $-z_{\max}$ et 0, on introduit aux positions miroirs des récepteurs par rapport au fond de l'eau, c'est-à-dire en $(x_r, y_r, -z_r)$, l'enregistrement du récepteur en question avec un changement de signe.

15 Continuant la descente pour $z=0$ à $z_{\max}$, on introduit à leurs positions réelles (x_r, y_r, z_r) , l'enregistrement du récepteur en question. La suite du calcul récursif de U, la génération de l'onde incidente (supposée descendante) D ainsi que l'étape de cross-corrélation entre onde incidente et réfléchie pour obtenir l'image s'effectuent de manière analogue à une
20 migration unidirectionnelle conventionnelle.

On obtient de la sorte directement l'image du sous-sol à partir des données acquises selon le procédé de l'invention, en prenant en compte les positions exactes des récepteurs et la propagation exacte en 3D des ondes.

L'étape d'introduction des enregistrements aux positions miroirs des
25 récepteurs, permet le renforcement du rapport signal-à-bruit par une imagerie basée sur le fantôme récepteur, sans doubler le temps de calcul de la migration, ce qui serait le cas si on calculait deux images pour les sommer ensuite, comme proposé dans *"Facilitating technologies for permanently instrumented oil fields"*. Le traitement décrit ci-dessus permet
30 d'obtenir directement une image du sous-sol à partir des données provenant de l'acquisition 3D selon l'invention.

Contrairement aux procédés décrits dans US 4 353 121 et US 4 992 992, le procédé de traitement décrit ci-dessus ne comprend pas

d'étape consistant à reconstituer les données sismiques qui auraient été enregistrées par une flûte horizontale à partir des données sismiques enregistrées par la flûte pentée, préalablement à leur migration.

Le procédé de traitement décrit ci-dessus tient compte des angles de
5 propagation à la fois en x et en y.

Ce procédé permet également d'améliorer le rapport signal-à-bruit en utilisant les données fantômes pour renforcer les données réflexions primaires.

Lorsque la diversité des profondeurs de capteurs ne permet pas
10 d'enlever complètement les ondes fantômes, la perturbation résultante sur les données finales est la convolution par un filtre symétrique (à phase nulle) et déconvoluable (sans notch). Cette étape de déconvolution est simplifiée par le fait que c'est une déconvolution à phase nulle.

Le descriptif de la migration miroir adapté ci-dessus concerne le cas
15 d'une migration 3D pour point de tir « *one-way* ». Il existe d'autres types de migrations que l'on peut adapter en migration miroir adapté en introduisant, dans le calcul de l'onde réfléchie, outre les enregistrements des récepteurs à leurs positions exactes, l'opposé des enregistrements à leurs positions miroirs.

20 Il existe en outre une migration 3D par point de tir appelée « *Reverse Time Migration* », qui ne fait pas l'hypothèse que l'onde incidente est une onde descendante et l'onde réfléchie une onde montante. La migration miroir adapté peut s'effectuer dans ce cas en introduisant les récepteurs à leur position effective (x_r, y_r, z_r) mais en utilisant à la surface de l'eau des
25 conditions aux limites dites de surface libre, à la place des conditions aux limites de surface absorbantes habituellement utilisées.

Dans les modes de réalisation décrits ci-dessus, les récepteurs sismiques 4 portés par les flûtes 1 sont des hydrophones. Les géométries d'acquisition décrites sont également applicables lorsque les flûtes 1 portent
30 en combinaison des hydrophones, sensibles à la pression, et des récepteurs sensibles au déplacement tels que géophones ou accéléromètres.

En pareil cas, le traitement de migration miroir adaptée tel que décrit plus haut peut également être utilisé, étant entendu qu'il est à effectuer séparément pour chaque type de récepteur. De plus, l'inversion de signe ne doit pas être appliquée pour les enregistrements des géophones verticaux, 5 mais seulement pour ceux des géophones horizontaux. Les résultats obtenus peuvent être combinés à l'aide d'un opérateur de calibration, outil connu de l'homme du métier.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'acquisition d'ondes sismiques au moyen d'au moins une
5 flûte (1) remorquée par un bateau et comportant une pluralité de récepteurs
sismiques (4), caractérisé en ce que la flûte comporte une portion de tête
(1a) dans laquelle la profondeur des récepteurs augmente en s'éloignant du
bateau de sorte que ladite portion de tête présente une première pente, et
une portion arrière (1b) comprenant au moins une section présentant une
10 seconde pente différente de la première pente.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la portion de tête (1a)
est inclinée par rapport à l'horizontale selon une pente comprise entre 1 et
2%.
- 15 3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la
portion de tête (1a) a une longueur comprise entre 1 et 3 km.
4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le
20 récepteur sismique (4) le plus proche de la surface de l'eau (3) est situé à
une profondeur comprise entre 7 mètres et 8 mètres.
5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la portion
arrière (1b) a une pente nulle.
- 25 6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la portion
arrière (1b) comprend au moins deux sections (1c ;1d) dont les récepteurs
ont une profondeur qui augmente en s'éloignant du bateau, la section (1c)
la plus proche du bateau ayant une pente supérieure à celle de la section
30 (1d) la plus éloignée du bateau.
7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la portion
arrière (1b) comprend au moins une portion comprenant une section dont

les récepteurs ont une profondeur qui augmente en s'éloignant du bateau et une section dont les récepteurs ont une profondeur qui diminue en s'éloignant du bateau.

5 8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel les récepteurs sismiques (4) portés par les flûtes (1) sont des hydrophones.

9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel les récepteurs sismiques (4) portés par les flûtes (1) comprennent une combinaison
10 | d'hydrophones et de géophones.

10. Dispositif d'acquisition d'ondes sismiques remorqué par un bateau (2) et incluant au moins une flûte (1) comportant une pluralité de récepteurs sismiques (4) et équipée d'organes de commande de profondeur (5)
15 espacés selon sa longueur, caractérisé en ce que les dits organes (5) sont réglés de telle sorte que dans la portion de tête (1a) de la flûte, la profondeur des récepteurs augmente en s'éloignant du bateau, la flûte présentant une première pente par rapport à la surface de l'eau (3), et que sa portion arrière (1b) comprenne au moins une section ayant une seconde
20 pente différente de la première pente.