



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

FILTRAGE ET CONTRACTION DES HYPERBOLES DE DIFFRACTION

par A. FONTANEL, G. GRAU, CH. HEMON

(Institut Français du Pétrole)

RESUME Il arrive très souvent que les enregistrements acoustiques faits en mer présentent des hyperboles de diffraction ; celles-ci apparaissent lorsque l'on dispose côte à côte les enregistrements fonction du temps obtenus en différents points. Elles sont engendrées, soit par des corps flottant dans l'eau, soit par des irrégularités du fond, soit par des lèvres de faille, etc...

Il est possible, en appliquant à ces enregistrements un traitement numérique qui utilise les propriétés de l'holographie, de contracter toutes ces hyperboles et de ne conserver que les points diffractants qui leur ont donné naissance.

On montre des restitutions de points diffractants qui se trouvent les uns isolés, les autres voisins d'objets réfléchissants, tant sur des exemples synthétiques que sur des enregistrements réels obtenus en mer.

SUMMARY

Very often marine acoustical records show diffraction hyperbolae ; they appear when time recordings obtained simultaneously at different locations are printed close to each other in the same order as the hydrophones actually are. They are due to objects floating in the water or to the unevenness of the sea-bottom or to faulted beds, etc.

If a digital data processing similar to holography is applied to these recordings, the hyperbolae may be compressed. Only the diffracting points which caused the hyperbolae to appear are kept:

Diffracting point restitution are shown from synthetic examples as well as from real marine records. Some of them are isolated, others are close to reflecting surfaces.



FILTRAGE ET CONTRACTION DES HYPERBOLES DE DIFFRACTION

par A. FONTANEL, G. GRAU, CH. HEMON

I - INTRODUCTION

Il arrive très souvent que les enregistrements acoustiques faits en mer présentent des hyperboles de diffraction. Celles-ci apparaissent lorsque l'on émet des impulsions courtes et que l'on dispose côte à côte les enregistrements fonction du temps obtenus en différents points. Dans le cas des sondeurs verticaux que l'on utilise pour évaluer la hauteur d'eau sous la quille des bateaux, la détection se fait en un seul point, mais l'on représente côte à côte les différentes pistes obtenues, lorsque le bateau se déplace, au cours des cycles successifs d'émission-réception. En prospection sismique, les ondes acoustiques sont enregistrées à l'aide d'un ensemble de capteurs régulièrement espacés et disposés sensiblement en ligne droite.

Les hyperboles sont engendrées, soit par des corps flottant dans l'eau, soit par des irrégularités du fond, soit par des lèvres de failles, etc... qui jouent le rôle de points ou d'ensemble de points diffractants. Dans le cas où les ondes acoustiques utilisées ont une fréquence assez basse pour pénétrer dans les terrains, les hyperboles peuvent aussi provenir de points diffractants situés à l'intérieur des couches situées sous le fond.

Lorsque l'enregistrement, au lieu d'être fait sur une ligne de récepteurs, est obtenu grâce à une mosaïque bidimensionnelle, les hyperboles précédentes se traduisent par des hyperboloïdes lorsque l'on fait une représentation tridimensionnelle des signaux reçus, au cours du temps, aux différents capteurs.

II - PRINCIPE DE LA CONTRACTION DES HYPERBOLES DE DIFFRACTION

Ce phénomène de diffraction des ondes par les différents points des objets éclairés est très général, aussi bien en optique qu'en acoustique ; c'est lui qui permet de voir les objets puisque c'est grâce à la diffraction que chacun des points éclairés renvoie de la lumière vers le récepteur : cristallin de l'oeil, objectif photographique, etc... ; en effet, lorsque les objets sont parfaitement réfléchissants on ne peut les voir.



On utilise des lentilles pour réaliser une correspondance point à point entre les différentes parties des objets et les parties correspondantes de l'image. On peut également se servir de lentilles acoustiques, mais leur emploi est beaucoup moins souple qu'en optique. On peut aussi former des images sans lentilles, par voie holographique ; on détecte alors les amplitudes et les phases, ou les différences de phase, des ondes qui arrivent sur la surface d'enregistrement. Dans les deux cas, l'enregistrement se fait pendant un temps très court qui est juste nécessaire à la détection de l'amplitude complexe des ondes ou de leur intensité.

Dans les enregistrements fonction du temps dont nous parlons ici, il n'y a pas de correspondance directe entre les différentes parties des objets et les différents points de l'enregistrement ; c'est ainsi que les ondes renvoyées par les objets, ondes diffractées, réfléchies, etc..., sont mélangées les unes aux autres et la représentation que l'on en donne, à la sortie des récepteurs, ne constitue pas une image. On peut cependant y parvenir par deux moyens, l'un est bien connu et est utilisé dans les sonars (ou radars) latéraux, l'autre fera l'objet de notre exposé.

Dans le sonar latéral, on s'arrange pour n'éclairer, à chaque émission, qu'une bande étroite de terrain, et cela sous une incidence oblique. Les différents points de la bande renvoient des échos qui sont donc enregistrés à des temps différents ; on dispose côte à côte les différentes bandes obtenues au cours d'émissions successives pendant que le bateau se déplace, et on forme ainsi une image acoustique du fond.

Nous allons voir qu'il est également possible d'éclairer simultanément, soit une grande surface du fond, soit un grand volume d'eau, et de restituer dans l'espace, sans utiliser ni lentille, ni faisceau étroit, les différents points de cette surface ou de ce volume qui ont joué le rôle de sources ou d'images de source. On pourrait imaginer faire cette restitution par des moyens analogiques, mais nous allons décrire ici un procédé de restitution numérique.

Considérons la figure 1 où S représente un point d'émission, P un point diffractant et $R_1, \dots, R_i, \dots, R_n$ des capteurs disposés suivant une ligne droite.

L'enregistrement fonction du temps est représenté sur la figure 1 b ; soit $s(t)$ l'impulsion détectée aux différents points d'enregistrement et t_1, t_i, t_n les temps, comptés à partir du moment de l'émission, auxquels ces impulsions arrivent aux capteurs.

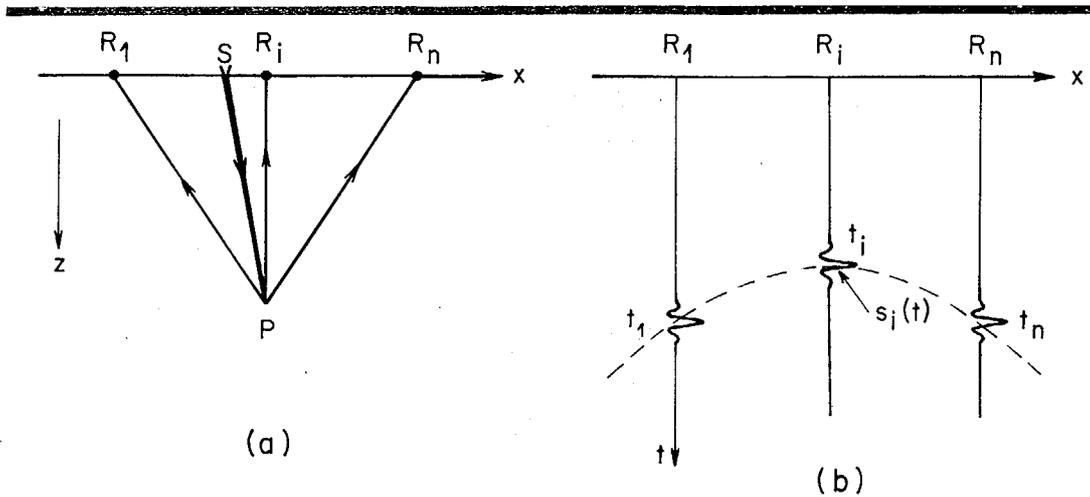


Fig. 1

Si le milieu est homogène et si la vitesse de propagation des ondes acoustiques est égale à V , le temps t_i peut s'exprimer par :

$$t_i = (SP + PR_i)/V.$$

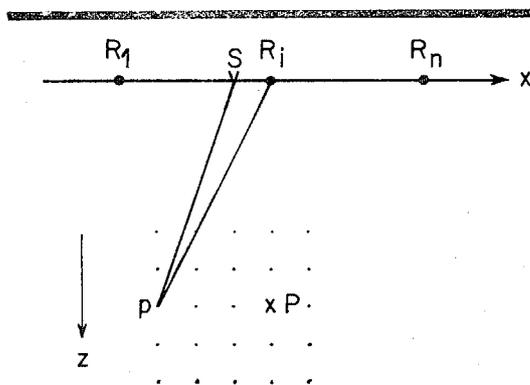
Si, comme c'est le cas de la figure 1, le capteur R_i est situé à la verticale du point P , les impulsions $s_1(t)$, $s_i(t)$, $s_n(t)$ se trouvent réparties sur une hyperbole qui a son sommet à la verticale de R_i . On observe, sur l'enregistrement, autant d'hyperboles qu'il y a de points diffractants "éclairés" par la source S . La forme des hyperboles dépend de la vitesse de propagation V et de la distance de P au dispositif de réception.

Le décalage en temps Δt_{in} qui sépare les impulsions reçues aux capteurs R_n et R_i (figure 1 b) peut s'exprimer par la formule :

$$\Delta t_{in} = -t_i + (t_i^2 + \overline{R_i R_n}^2 / V^2)^{1/2}$$

où $\overline{R_i R_n}$ représente la distance entre les capteurs R_i et R_n et V la vitesse moyenne de propagation dans le milieu.

On peut donc, pour chacun des points du milieu, connaître la forme de l'hyperbole que l'on aurait enregistrée si ce point avait effectivement joué le rôle de point diffractant. Il suffit donc, pour contracter les hyperboles, d'utiliser une technique de reconnaissance des formes appliquée en chacun des points de l'espace. On peut, par exemple, effectuer une corrélation entre l'enregistrement obtenu et les hyperboles théoriques relatives à tous les points de l'espace situés dans le champ que l'on explore. Lorsque, compte tenu du bruit, le facteur de corrélation dépasse un certain seuil, on peut en



conclure que le point envisagé a joué le rôle de point diffractant ; seul ce point est alors conservé dans la restitution et on l'affecte d'un facteur, d'une "pondération" qui dépend de l'énergie totale contenue dans l'hyperbole.

Fig. 2

III - PROCÉDE PRATIQUE DE RESTITUTION

Nous allons maintenant indiquer un procédé pratique pour la contraction des hyperboles (Fontanel et Grau, 1969). Nous supposons, pour simplifier, que le milieu est homogène, que le dispositif de réception est linéaire, et nous envisageons le cas où les points diffractants se trouvent dans un plan de coordonnées x et z , passant par ce dispositif. La figure 2 est dessinée dans ce plan.

Echantillonons le plan en des points régulièrement répartis aux sommets d'une grille dont le pas suivant la direction x est Δx et Δz suivant la direction z . Dans le cas théorique où il n'y a qu'un seul point diffractant, l'enregistrement fonction du temps a l'allure de celui qui est schématisé par la figure 1 b. Disposant de cet enregistrement et connaissant la position des points $S, R_1, \dots, R_i, \dots, R_n$, nous allons chercher successivement si chacun des points p de la grille de restitution que nous avons définie plus haut a pu jouer le rôle de point diffractant, en opérant de la manière suivante.

Pour chacun des points p , calculons la distance l_i :

$$l_i = Sp + pR_i .$$

Nous pouvons, à condition de connaître la vitesse de propagation V des ondes dans le milieu que l'on étudie, en déduire des temps de propagation fictifs :

$$t'_i = (Sp + pR_i) / V .$$

Relevons, sur chacune des pistes de l'enregistrement de la figure 1 b, l'amplitude $g(t')$ aux temps t' ainsi calculés. Nous pouvons ensuite sommer, par exemple, les différentes amplitudes $g(t')$ et affecter la valeur de cette somme au point courant p de la grille. Tous les points de la grille sont ainsi



passés en revue et se trouvent affectés de pondérations différentes. Il est bien évident que la pondération la plus forte sera obtenue lorsque la position du point courant p sera confon- due avec celle du point P qui a effectivement joué le rôle de point diffractant. En effet, c'est uniquement en ce point que s'additionnent en phase les différentes impulsions de l'enre- gistrement représenté à la figure 1 b.

S'il existe plusieurs points diffractants, on les déterminera ainsi successivement, à leur vraie position dans l'espace, compte tenu des hypothèses formulées plus haut.

Pour effectuer cette restitution, il est essentiel de connaître la vitesse de propagation des ondes V. Lorsque les points diffractants se trouvent dans l'eau ou sur le fond de la mer, on peut adopter, en première approximation, une vitesse voisine de 1 500 m/s. Si les points diffractants sont situés en dessous du fond de la mer, les choses sont plus compliquées et nous n'entrerons pas ici dans le détail. Nous rappellerons seulement qu'il est possible, à partir de l'enre- gistrement fonction du temps, d'estimer une vitesse moyenne de propagation entre chacun des points du sous-sol et le dis- positif de réception (Garotta et Michon, 1967 ; Robinson, 1969).

IV - EXEMPLES SYNTHÉTIQUES

La figure 3 se rapporte à un exemple théorique. La figure 3 a représente une hyperbole de diffraction que l'on

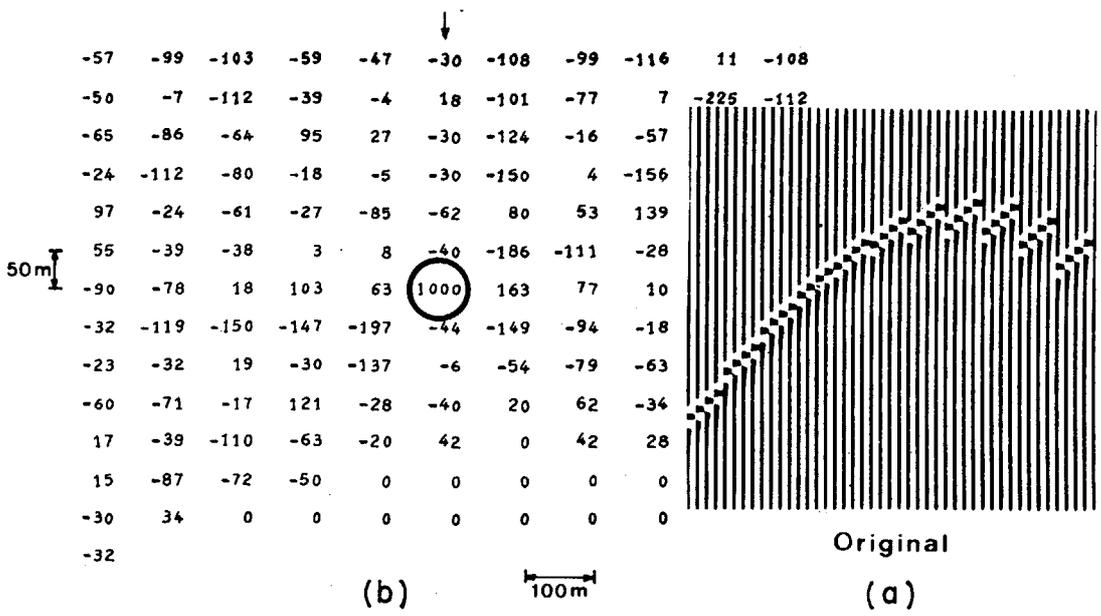


Fig. 3



aurait enregistrée avec un dispositif d'enregistrement comprenant 4 capteurs distants de 30 m si un point diffractant était situé à 100 mètres sous le dispositif ; la figure 3a (original) a été réalisée en mettant côte à côte 11 enregistrements successifs obtenus en faisant, à chaque fois, subir au dispositif de réception une translation de 60 m, suivant la direction de ce dispositif.

La figure 3b (à gauche) montre le résultat de la restitution obtenue avec la méthode précédente. On a entouré le sommet de la grille qui correspond au point diffractant P. Le pas de la grille est ici de 50 m suivant la direction z et de 100 m suivant la direction x. On a supposé que la vitesse de propagation est constante et égale à 2 250 m/s ; l'impulsion $s(t)$ utilisée pour réaliser cet exemple est une impulsion dite de Ricker dont l'expression est :

$$s(t) = (\sqrt{\pi}/a) \left[1 - 2(t/a)^2 \right] e^{-(t/a)^2}$$

où a est une constante.

Cette impulsion a comme caractéristiques d'avoir une aire nulle et de posséder un spectre réel et positif.

Les différentes valeurs de la grille de la figure 3 peuvent être présentées sous forme de densité variable, par exemple, en interpolant entre les valeurs obtenues aux différents sommets de la grille. On peut ainsi donner une représentation photographique du milieu étudié.

La figure 4 a représente un enregistrement fonction du temps où apparaissent 4 hyperboles de diffraction, D'_1 , D'_2 , D'_3 et D'_4 dont les sommets sont respectivement à l'aplomb des points d'émission T_1 pour D'_1 , T_3 pour D'_2 et T_5 pour D'_3 et D'_4 . Cette figure a été obtenue en mettant côte à côte les dix enregistrements successifs correspondant aux points d'émission T_1, \dots, T_{10} indiqués dans le haut de la figure ; chacun des enregistrements élémentaires est censé avoir été obtenu avec 4 capteurs distants de 60 m ; la distance entre les points d'émission successifs est égale à 240 m. La loi de vitesse utilisée dans cet exemple varie en fonction de la distance des points diffractants à la surface ; elle passe de 2 600 m/s près du dispositif à 3 700 m/s pour le point le plus éloigné. Les différentes pistes de la figure 4 b correspondent aux colonnes de la grille de restitution ; les amplitudes y ont été représentées sous forme d'aire variable. Cette figure montre le résultat de la contraction des hyperboles de la figure 4 a ; les différents points diffractants D_1 , D_2 , D_3 et D_4 y apparaissent avec une bonne résolution en bonne position par rapport aux points d'émission T_1, \dots, T_{10} .



RESTITUTION DE POINIS DIFFRACTANTS

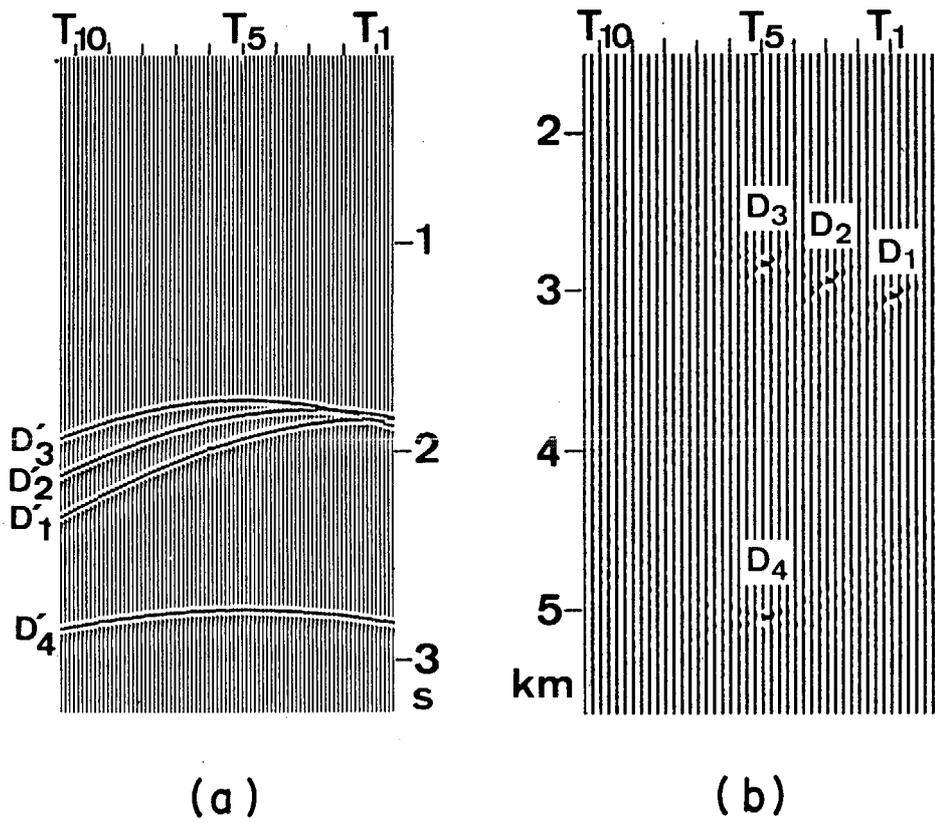


Fig. 4



V - RESOLUTION ET FORME DES IMAGES

La forme et l'étendue de l'image d'un point sont difficiles à définir dans un cas général ; elles dépendent bien sûr de la distance qui sépare l'image du récepteur, mais aussi de la forme de l'impulsion. Nous allons donner ici un procédé pratique pour déterminer la forme de ces images.

Soit $s(t)$ l'impulsion (figure 5) et $s(t_0)$ sa valeur maximale ; dans le plan (Ox, Oz) passant par le dispositif, $S(x_0, 0)$ représente le point d'émission et $P(x_0, z_0)$ un point diffractant ; $R_i(x_i, 0)$ désigne un point d'enregistrement ; $P_j(x_j, z_j)$ représente un point courant de la grille de restitution.

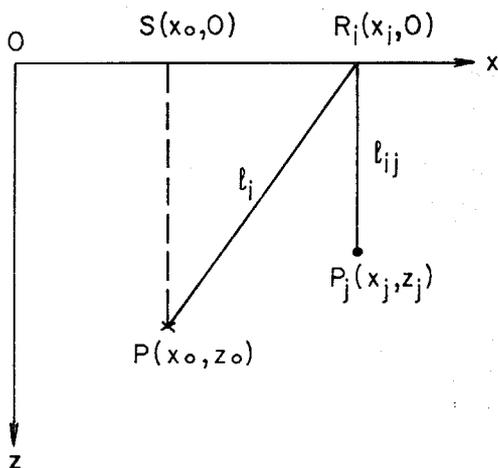


Fig. 5

Le point P est affecté, suivant la technique que nous avons indiquée plus haut, d'une valeur a_0 égale à

$$a_0 = \sum_{i=1}^N s(t_0) = N \cdot s(t_0)$$

où N représente le nombre de capteurs. En effet, toutes les impulsions se somment en phase au point P.

Par contre, en un point tel que P_j , point courant de la grille, les N impulsions sont plus ou moins décalées les unes par rapport aux autres ; ce décalage, évalué

en fonction du temps, peut s'exprimer par :

$$\Delta t_{ij} = (l_{ij} - l_j) / V$$

où l_{ij} représente la distance $P_j R_i$
 l_j la distance $P R_i$,
 V la vitesse de propagation de $s(t)$.

L'amplitude résultante en P_j est donc :

$$a_j = \sum_{i=1}^N s(t_0 + \Delta t_{ij}) .$$

Sur la figure 5, il est facile d'évaluer Δt_{ij} :



La résolution longitudinale de ces images est bien meilleure que celle que l'on aurait obtenue avec une onde monochromatique et cela que l'on utilise une lentille acoustique ou les techniques de l'holographie. Nous disposons en effet, dans la méthode que nous venons de décrire, d'une coordonnée supplémentaire, celle du temps d'enregistrement compté à partir du moment de l'émission.

Les résultats d'expérience montrent qu'en première approximation, on peut obtenir une valeur approchée de la résolution latérale Δx en utilisant la formule classique de l'optique, en y faisant intervenir la longueur d'onde moyenne λ de l'impulsion :

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{D} z$$

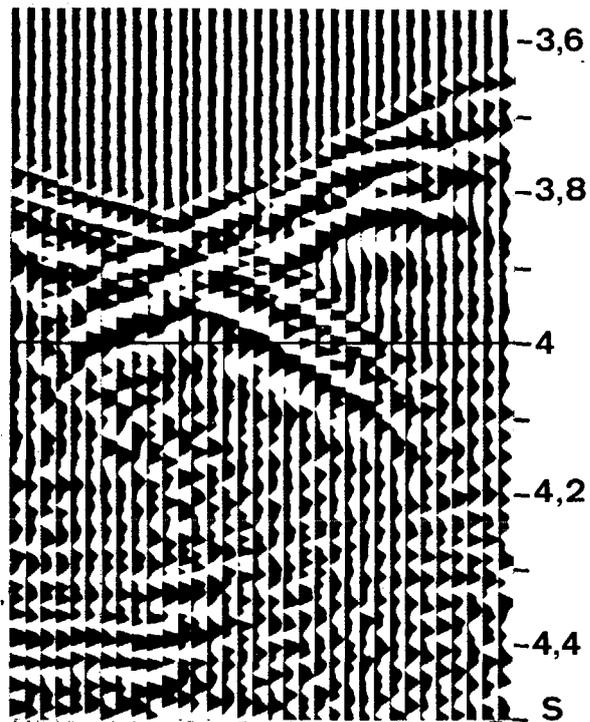
où D représente la longueur du dispositif d'enregistrement et z la distance de l'image à ce dispositif. Quant à la résolution longitudinale, elle est à peu près égale à la longueur qu'occupe l'impulsion dans le milieu considéré.

VI - EXEMPLE

La figure 7 a représente un enregistrement de sismique-réflexion obtenu en mer par une profondeur d'eau voisine de 2 600 m. L'axe vertical représente le temps d'enregistrement ; on trouve sur les différentes pistes le signal reçu par les différents capteurs. La distance entre ces derniers était égale à 30 m. Le fond de la mer y apparaît comme une succession d'hyperboles de diffraction qui masquent complètement l'image véritable du fond. Nous avons appliqué à cet enregistrement le procédé de contraction des hyperboles que nous avons exposé plus haut et avons ainsi obtenu la figure 7 b sur laquelle les hyperboles de diffraction n'apparaissent plus. L'axe vertical de la figure 7 b représente des kilomètres ; nous avons utilisé pour cette restitution une vitesse de propagation égale à 1 500 m/s.

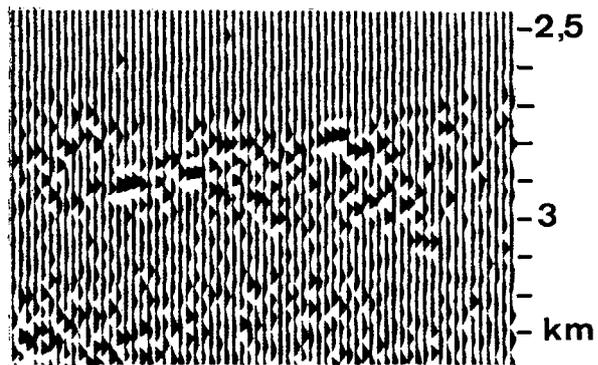


Enregistrement de
sismique-réflexion
fait en mer par une
profondeur de 2600 m.



(a)

Le même enregistrement
après contraction des
hyperboles de diffrac-
tion.



(b)

Fig. 7



CONCLUSION

Nous avons vu qu'il est possible de former des images de corps flottant dans l'eau, ou de la surface du fond de la mer, en émettant des impulsions courtes ne comportant que quelques arches et en enregistrant en fonction du temps les ondes renvoyées par les objets. On peut, pour ce faire, utiliser le procédé de restitution que nous avons exposé. La restitution se fait alors par calcul, soit dans un plan, soit dans un volume, suivant que le dispositif de réception est à une ou deux dimensions. Un procédé analogue peut également être utilisé pour obtenir la représentation de la surface des corps réfléchissants qui donnent lieu à une réflexion spéculaire comme c'est le cas en sismique-réflexion ; c'est d'ailleurs dans cette application que ce procédé a été jusqu'à présent le plus utilisé.

R E F E R E N C E S

- A. FONTANEL, G. GRAU, 1969, Principes de l'holographie sismique, 31e Congrès, European Assoc. of Geophysicists, Venise.
- R. GAROTTA, D. MICHON, 1967, Continuous analysis of the velocity function and of the move out corrections, Geophysical Prospecting, 15, p. 584-587.
- J.C. ROBINSON, 1969, A velocity analysis technique applied to seismic data, 34, p. 330-356.