

ATTENUATION DES MULTIPLES PAR LA DECONVOLUTION PREDICTIVE DANS LE DOMAINE (x, t) ET (τ, p) .

Abderrahmane BOUGUERN*et Hayder Azziz BAKER**

RÉSUMÉ

Le problème auquel se heurtent souvent les géophysiciens est celui de la suppression des ondes multiples en sismique marine et terrestre. Pour filtrer ces bruits, ils appliquent habituellement la déconvolution prédictive dans le plan (x, t) .

Cette technique donne des résultats tout juste acceptables car elle atténue les multiples enregistrés par les traces proches de la source et sans effet d'atténuation pour les traces à grandes distances .

Pour pallier à cette insuffisance, les géophysiciens, à l'aide de la transformation de Radon linéaire, travaillent parfois dans le plan (τ, p) . La périodicité des multiples est respectée dans ce domaine et la distance de prédiction est variable ; d'un autre mot les décalages entre les arrivées sont égaux suivant une trace radiale. Dans notre travail, on a appliqué la déconvolution prédictive dans les domaines (x, t) et (τ, p) pour supprimer les multiples enregistrés à partir d'un même modèle afin de rendre les résultats comparables .Pour réaliser cette étude les programmes informatiques utilisés ont été confectionnés par nous mêmes. Les résultats obtenus montrent que la déconvolution prédictive appliquée dans le domaine (τ, p) atténue fortement l'énergie des multiples le long de toutes les traces du dispositif d'enregistrement.

Mots clés : Déconvolution - Prédictive - Sismique - Atténuation - Multiple.

THE MULTIPLES ATTENUATION BY PREDICTIVE DECONVOLUTION IN DOMAIN (x, t) AND (τ, p) .

ABSTRACT

The problem the geophysicists have to solve is the attenuation of the multiples attenuation in land and marine seismics.

In order to filter this noise, they apply the predictive deconvolution in the (x, t) plane. This technique is able to give some acceptable results only for the traces situated near the source and has no effect on those traces of large offset.

To overcome this problem, geophysicist often work in the (τ, p) plane. The multiple period is verified in this domain and the prediction distance is variable. In other words the shift between arrivals are equal along a radial trace. In this work, we have applied the predictive

* Département Géophysique Université de Boumerdes Algérie

** Département géophysique Université Houari Boumediène Bab-Ezzouar Algérie..

- Manuscrit déposé le 25 Juin 2002, accepté après révision le 26 Avril 2003.

deconvolution in the (x, t) and (τ, p) domain to a synthetic model for suppressing a second order multiple. The results show that the deconvolution, applied in the (τ, p) domain, attenuates the multiples energy for all the traces.

Key words : Deconvolution - Predictive - Attenuation - Multiple.

INTRODUCTION

Un enregistrement sismique est une combinaison de signaux utiles et de bruits. Les réflexions multiples sont considérées comme des bruits parce qu'elles s'interfèrent avec les primaires et rendent l'identification du signal difficile. Dans le cas où ces bruits ne sont pas filtrés ils peuvent créer des structures géologiques fictives et les résultats de l'interprétation seront erronés. Les réflexions multiples sont des énergies qui ont subi plus d'une réflexion avant d'être enregistrées, elles ont des caractéristiques presque identiques à celles des primaires ce qui rend leur filtrage délicat. Cependant il existe des moyens pour les atténuer, qui se basent sur certains critères de leur reconnaissance:

- la différence en courbure entre les multiples et les primaires;
- le contenu en fréquences;
- la périodicité des multiples.

La déconvolution prédictive est une technique de suppression des réflexions multiples. Elle se base sur le caractère de périodicité de ces dernières à offset nul. Son application dans le domaine (x, t) (Preacock et Treitel, 69-) donne des résultats acceptables de point de vue atténuation des multiples pour les traces proches de la source et sans effet pour les traces lointaines. Cette insuffisance de la déconvolution prédictive (x, t) ne vient pas de la méthode elle-même, mais elle est causée par la non-périodicité des réflexions multiples à grande offset. Taner (1980) a démontré que la périodicité des réflexions multiples est vérifiée le long d'une direction radiale; d'un autre mot, les décalages entre les

arrivées sont égaux suivant une trace radiale appelée aussi trace de Snell. Cette trace change d'angle à chaque interface lors de son propagation dans un milieu à plusieurs couches suivant la loi de Snell (Clairbout, 1985). Dans le but de pallier au problème de périodicité des multiples les géophysiciens, à l'aide de la transformée de Radon linéaire, travaillent dans le plan (τ, p) . A travers ce travail, on montre que, dans le plan (x, t) , la périodicité des multiples existe uniquement pour les traces très proches de la source. Les résultats obtenus après filtrage montrent que dans le plan (x, t) les ondes multiples sont éliminées pour les traces proches de la source; cependant dans le plan (τ, p) elles sont atténuées au niveau de toutes les traces du dispositif.

LA Périodicité des multiples.

A partir du triangle EM_1R_1 , le temps d'arrivée au premier récepteur est donné par :

$$t_1^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \quad (1)$$

t_0 : temps double vertical

x : distance de la source à la trace considérée.

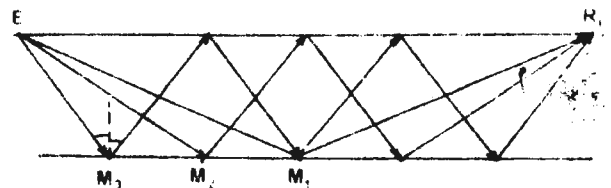


Fig.1 - Schéma des multiples de différents ordres

Sketch of different order multiples

Le temps d'arrivée d'un multiple de second ordre est donné par la relation suivante :

$$t_{3/2}^2 = (2t_0)^2 + \frac{x^2}{v^2} \quad (2)$$

Le temps d'arrivée d'un multiple de troisième ordre est donné par l'équation ci-dessous :

$$t_3^2 = (3t_0)^2 + \frac{x^2}{v^2} \quad (3)$$

Il est facile de démontrer que cette relation est vérifiée pour un multiple d'ordre n , d'après la formule récursive précédente on a :

$$t_n = \left[(nt_0)^2 + \frac{x^2}{v^2} \right]^{1/2}, t_{n+1} = \left[((n+1)t_0)^2 + \frac{x^2}{v^2} \right]^{1/2}$$

$$t_{n+1} - t_n = ((n+1)t_0) \left[1 + \frac{x^2}{2(n+1)t_0^2} \right]^{1/2} - nt_0 \left[1 + \frac{x^2}{2nt_0^2} \right]^{1/2}$$

Après le développement en série Mac Laurin, de la relation, on obtient alors :

$$t_{n+1} - t_n = t_0 + \frac{x^2}{2(n+1)t_0 v^2} - \frac{x^2}{2nt_0 v^2} = t_0 + \frac{x^2}{2t_0 v^2} \left[\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n} \right]$$

$$t_{n+1} - t_n = t_0 - \frac{x^2}{2t_0 v^2 n(n+1)} \quad (4)$$

On remarque que la périodicité des réflexions multiples est vérifiée seulement au voisinage de zéro ($x=0$), c'est-à-dire pour les petites distances (faible offsets).

NOTION DE TRACE RADIALE ET PÉRIODICITÉ RADIALE

Soit un milieu constitué d'une couche d'épaisseur h et de vitesse V_1 qui surmonte une autre couche de vitesse V_2 , (la figure.2, l'inter-trace est Xc)

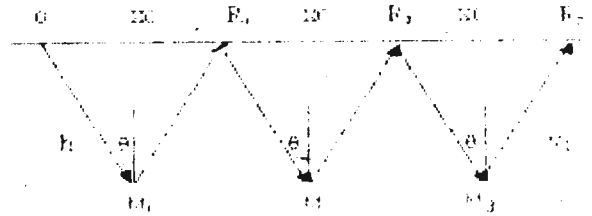


Fig. 2 - Schéma d'un multiple simple

Sketch of first order multiple

calcul du temps d'arrivée et des distances émetteurs-récepteurs

Pour pouvoir démontrer la périodicité des réflexions multiples, on détermine d'abord leurs temps d'arrivées en fonction de la distance (l'offset) respective :

A partir du triangle OM_1R_1 on écrit

$$\begin{cases} OR_1 = 2htg\theta \\ OR_2 = 4htg\theta \\ OR_3 = 6htg\theta \end{cases}$$

Pour chaque distance le temps de parcours correspondant est exprimé par les équations ci-dessous :

$$\begin{cases} tc(1) = \frac{2.h}{v.\cos\theta} \\ tc(2) = \frac{4.h}{v.\cos\theta} \\ tc(3) = \frac{6.h}{v.\cos\theta} \end{cases} \quad (5)$$

On détermine une formule de récurrence :

$i=1, \dots, n$

n : est le nombre de traces.

$$\begin{cases} OR(i) = i.2.h.tg\theta \\ et \\ tc(i) = i. \frac{2.h}{v.\cos\theta} \end{cases} \quad (6)$$

à partir de (5) on constate que:

$$tc(i) = \frac{1}{v.\sin\theta}.OR(i) \quad (7)$$

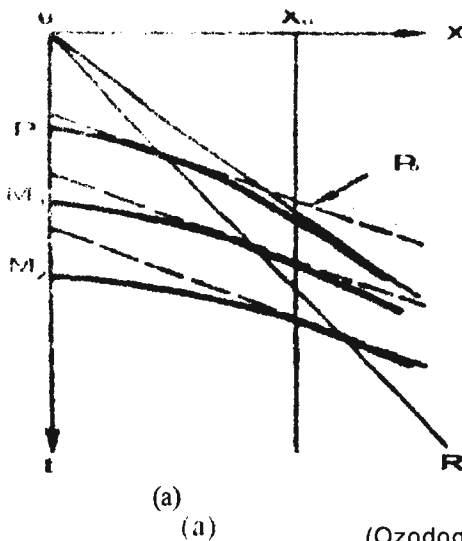
cette expression représente l'équation d'une droite de pente

$$p = \frac{1}{v.\sin\theta} \quad (8)$$

pour chaque i les multiples arrivent et ils sont séparés par une période constante qui est égale à :

$$\tau = tc = \frac{2.h}{v.\cos\theta} \quad (9)$$

p : représente le paramètre de rai, et τ l'intercept.



(Ozodogan .Y, 1987)

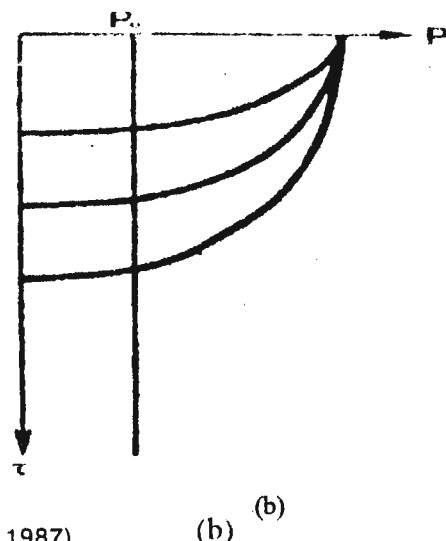


Fig. 3b - Ellipse des événements réfléchis et des multiples dans le plan (τ, p)

Ellipses of reflected events and multiples in the (τ, p) plane.

Fig. 3a - Hyperboles de réflexion primaire et de multiples M_1 et M_2 dans le plan (x, t)

Hyperbolic primary reflection and multiples M_1 and M_2 in the (x, t) plane

La périodicité est vérifiée suivant la direction radiale de pente p et d' intercept τ .

La notion de trace radiale conduit à la projection des données du plan (x, t) vers le plan (τ, p) , c'est-à-dire que la périodicité suivant des traces radiales est la même que la périodicité dans le plan (τ, p) . La projection des événements sismiques du plan (x, t) vers le plan (τ, p) est illustrée par la figure,3a et la figure,3b.

La périodicité est vérifiée suivant chaque pente p et la période varie d'une pente à une autre. Les réflexions multiples dans le domaine (τ, p) se caractérisent par des ellipses plus aplaties que celles des primaires. Par conséquent on peut procéder à leur différenciation visuelle.

DÉCONVOLUTION PRÉDICTIVE DANS LE PLAN (τ, p)

La déconvolution prédictive dans le plan (τ, p) s'effectue comme suit:

Projection des données sismiques du plan (x, t) vers le plan (τ, p)

La projection se réalise à l'aide de la transformée de Radon linéaire (addition oblique directe ou slant stack direct). L'intégration se fait le long du faisceau de droites $t = \tau + px$.

Dans le domaine continu la transformée de Radon s'écrit :

$$u(\tau, p) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, \tau + px) dx \quad (10)$$

dans le domaine discret elle s'écrit

$$U_i(\tau, p) = \sum_{i=1}^n f_i(x, \tau + px) \quad (11)$$

(relation de Chapman)

x : distance de source à la trace considérée (offset).

p : pente.

n : nombre de traces dans le plan (x, t).

$U_i(\tau, p)$: représente les données sismiques projetées dans le plan (τ, p).

Réalisation de la déconvolution Prédictive

Supposons que 'on veuille prédire une partie d'une trace y(t). La base de notre prédiction de cette trace est une autre trace $b(t)$ ayant le long de la direction radiale un multiple tel qu'il est représenté sur la figure, 3a; cette trace est appelée trace de prédiction.

La trace prédite est obtenue en appliquant un opérateur de prédiction $f(t)$, qui est calculé par la méthode des moindres carrés. La trace prédite $\hat{b}(t)$ est donnée par la relation:

$$\hat{b}(t) = f(t) * y(t) \quad (12)$$

Le signe (*) représente la convolution. La trace prédite est différente de la trace réelle $y(t)$.

L'opérateur de prédiction $f(t)$ est déterminé par la minimisation des différences au sens des moindres carrés entre la trace réelle et la trace prédite.

$$\frac{\partial}{\partial f_i} \sum [y(t) - \hat{b}(t)]^2 = 0 \quad (13)$$

Le développement de la relation (13) conduit à un système d'équations identique à celui de la déconvolution prédictive exprimée dans le plan (x, t) (Preacock et Treitel, 69-). Cependant la distance de prédiction n'est plus la même pour toutes les traces., elle varie avec la variation de la pente.

D'après Ozdogan (1987) la distance de prédiction est donnée par la relation suivante :

$$\alpha(p) = \alpha(0) \cdot (1 - p^2 \cdot v^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

où :

$\alpha(p)$: distance de prédiction,

$\alpha(0)$: distance de prédiction à offset zéro,

p : paramètre de rai et V la vitesse des réflexions multiple.

Projection des données du plan (τ, p) vers le plan (x, t).

Cette opération s'effectue à l'aide de la transformée inverse de Radon (addition oblique inverse ou slant stack inverse). Dans ce cas l'intégration se fait le long d'un faisceau de droites $\tau = t - px$.

Dans le domaine continu la transformée de Radon s'écrit :

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(p, t - px) dp \quad (15)$$

*Dans le domaine discret
elle s'écrit :*

$$f_i(x,t) = \sum_{i=1}^n U_i(x,t - px) \quad (16)$$

n : représente le nombre de traces dans le plan (τ, p) ;

$f(x,t)$: représente la section sismique filtrée dans le plan (x, t) .

APPLICATION SUR MODÈLE SYNTHÉTIQUE

Le modèle synthétique est calculé par la méthode du tracé de rayon. Les réflexions simples sont enregistrées à partir de chaque horizon du modèle.

a. Les vitesses et les épaisseurs respectives des couches sont :

$v_1 = 2400$ m/s	$h_1 = 400$ m
$v_2 = 3200$ m/s	$h_2 = 850$ m
$v_3 = 4000$ m/s	$h_3 = 750$ m
$v_4 = 4800$ m/s	$h_4 = 450$ m.
$v_5 = 5200$ m/s.	$h_5 = \infty$

b. Les paramètres de l'enregistrement du modèle synthétique sont :

Le nombre de traces :	$Nt=80$.
L'offset minimal :	$X_{min}=100$ m.
L'offset maximal :	$X_{max}=2075$ m
L'inter-trace :	$\Delta X=25$ m.
Le pas d'échantillonnage :	$\Delta t=0.004$ s.
La fréquence du signal émis :	$f=30$ hz.
Le temps d'enregistrement :	$t=3$ s

Atténuation des multiples par la deconvolution prédictive dans le domaine (x,t) .

La section sismique brute est représentée par la figure 4; elle correspond au modèle géologique choisi. Elle est constituée de quatre réflexions primaires et de multiples qu'on veut atténuer.

Choix de la longueur de l'opérateur

Pour la détermination de la longueur de l'opérateur on a effectué plusieurs tests : on a fixé la distance de prédiction égale au pas d'échantillonnage ($\Delta t = 4$ ms) et le pourcentage du bruit blanc égal à un pour-cent ($\epsilon\% = 1$). Ensuite, on a varié la longueur de l'opérateur de 350 à 550 ms avec un pas de 50 ms; pour chaque longueur de l'opérateur, l'autocorrélogramme est calculé.

On a constaté que lorsque la longueur de l'opérateur atteint la valeur de 450 ms et plus, l'énergie de l'autocorrélogramme reste la même. Par conséquent la valeur 450 ms est choisie comme la longueur de l'opérateur. Les tests ont été réalisés avec les valeurs suivantes : 350, 400, 450, 500 et 550 ms.

Choix de la distance de prédiction

De la même manière, on a procédé par des tests pour la détermination de la distance de prédiction.

On a retenu la longueur de l'opérateur de prédiction choisie précédemment ($op=450$ ms), et le bruit blanc de un pour-cent ($\epsilon\% = 1$). On a choisi une distance initiale égale à ($\alpha=12$ ms). et progressivement on a varié cette grandeur avec un pas de 4 ms jusqu'à 28 ms. A chaque nouvelle distance l'autocorrélogramme est déterminé, le deuxième zéro (crossing-zéro) est atteint avec une distance de prédiction égale à $\alpha=16$ ms

Choix du pourcentage de bruit blanc (prewhithening)

Dans le cas des modèles synthétiques le problème de stabilité du système ne se pose pas, d'après Ozdogan (1987) on utilise alors un bruit blanc égal à un pour-cent ($\epsilon\% = 1$); une fois que les paramètres optimaux sont déterminés, la déconvolution prédictive est appliquée à la section sismique brute et le résultat de ce filtrage est illustré par la figure 5, où on remarque que les ondes multiples sont supprimées au niveau des traces proches de la source.

ATTÉNUATION DES MULTIPLES PAR LA DÉCONVOLUTION PRÉDICTIVE DANS LE DOMAINE (x, t) ET (τ, p)

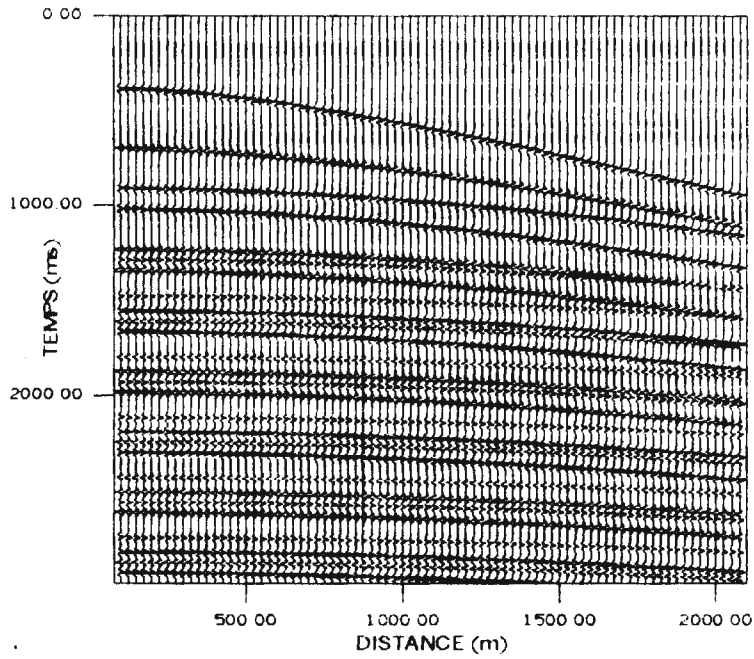


Fig. 4 - Section sismique avant déconvolution (x, t)
Seismic section before deconvolution (x, t)

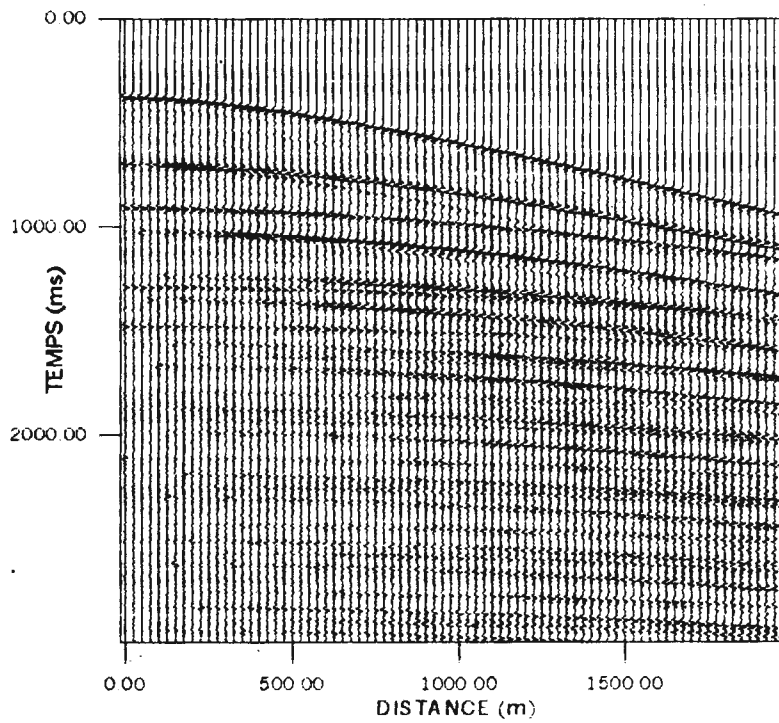


Fig. 5 - Section sismique après déconvolution dans le plan (x, t)
Seismic section after deconvolution in the (x, t) plane

*Atténuation des multiples par la
déconvolution prédictive
dans le domaine (τ, p)*

L'insuffisance des résultats de la déconvolution réalisée dans le plan (x, t), nous a conduit à travailler dans le plan (τ, p). Les résultats obtenus dans ce plan sont de meilleure qualité, le critère de périodicité des multiples est respecté, d'où l'intérêt d'appliquer ce type de déconvolution. Le modèle géologique utilisé est le même que celui qui a été utilisé auparavant afin de rendre les résultats comparables.

*Projection des données sismiques
dans le plan (τ, p)*

La figure 6 représente les données sismiques projetées dans le plan (τ, p) qui contient des ellipses qui caractérisent les réflexions primaires et les pseudo-ellipses qui décrivent des réflexions multiples. Cette application est réalisée par la transformée de Radon directe avec les paramètres suivants : $np = 100$ (nombre de pentes) ; $p_{\max} = 0,005$ (pente maximale), $p_{\min} = 0$ (pente minimale) et le pas d'échantillonnage de la pente $\Delta p = 0,0000625$.

*détermination de la vitesse
des réflexions multiples*

La vitesse utilisée est celle de la première couche supposée comme vitesse des réflexions multiples. Dans notre cas, elle est égale 2400m/s.

*détermination de la longueur
de l'opérateur de prédiction*

On a fixé la distance de prédiction, le taux du bruit blanc égaux respectivement au pas d'échantillonnage ($\Delta t = 4\text{ms}$) et à un pour-

cent ($\varepsilon = 1\%$). On a varié la longueur de l'opérateur de prédiction de 350ms à 550ms avec un pas de 50ms. A chaque nouvelle longueur de l'opérateur, on calcule l'autocorrélogramme. Ce dernier est calculé dans les deux plans (x, t) et (τ, p), on a remarqué que l'énergie des multiples s'atténue en utilisant un opérateur d'une longueur de 450ms. Au delà de ce seuil aucune amélioration n'est observée dans l'atténuation des multiples. La valeur de 450 ms est retenue comme longueur optimale de l'opérateur.

*Détermination de la distance
de prédiction*

Dans le plan (x, t), elle prend une valeur fixe pour toutes les traces, dans le plan (τ, p), la distance de prédiction varie en fonction de la pente. Pour la détermination de la distance de prédiction initiale (pour une pente nulle, $p=0$). On a procédé de la façon suivante :

On a fixé les paramètres déjà déterminés, tels que la longueur de l'opérateur de prédiction, la vitesse des multiples et le pourcentage du bruit blanc qui est pris égal à un pour-cent ($\varepsilon = 1\%$); les tests sont réalisés avec un pas de 4ms à partir de 12 ms à 28 ms. On a remarqué sur l'autocorrélogramme que le deuxième passage par zéro (crossing-zéro) est atteint pour une distance de prédiction égale à 16 ms. Cette valeur est égale à la distance initiale de prédiction. Une fois les paramètres optimaux déterminés, on a appliqué la déconvolution prédictive aux données sismiques projetées dans le plan (τ, p); le résultat est mis en évidence par la figure 7. La section sismique finale filtrée est représentée par la figure, 8; sur cette dernière on constate que les ondes multiples sont fortement atténuées au niveau de toutes les traces du dispositif.

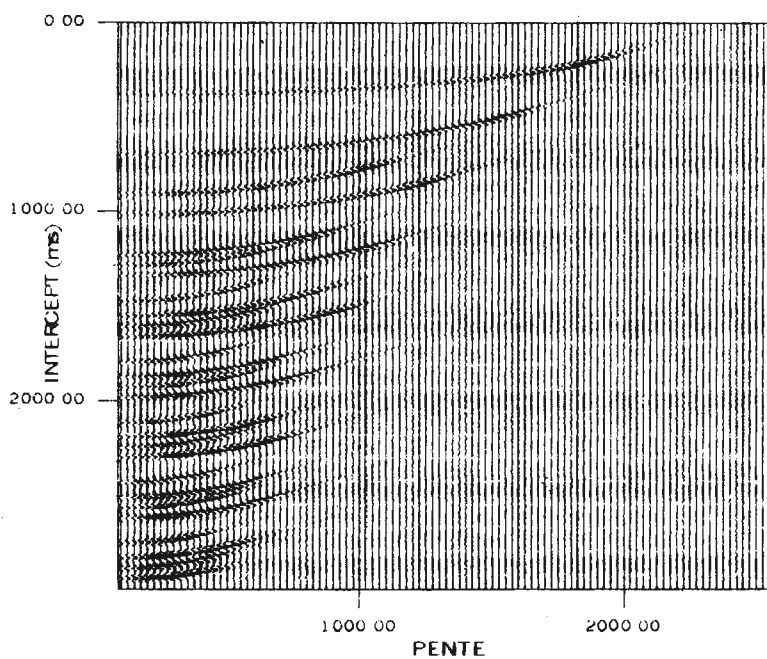
ATTÉNUATION DES MULTIPLES PAR LA DÉCONVOLUTION PRÉDICTIVE DANS LE DOMAINE (x, t) ET (τ, p) 

Fig. 6 - Projection des données sismiques dans le plan (τ, p)

Seismic data projected in the (τ, p) plane.

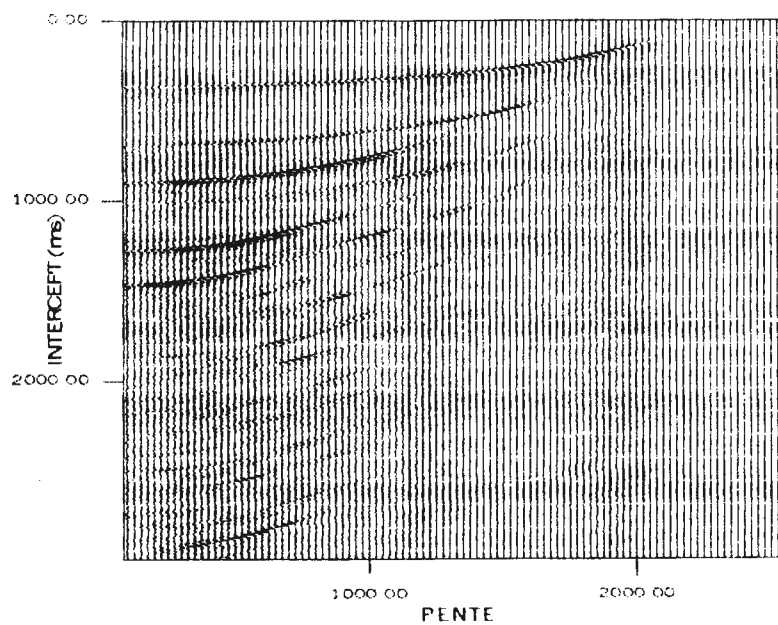


Fig. 7 - Données sismiques filtrées dans le plan (τ, p)

Seismic data filtered in the plane (τ, p)

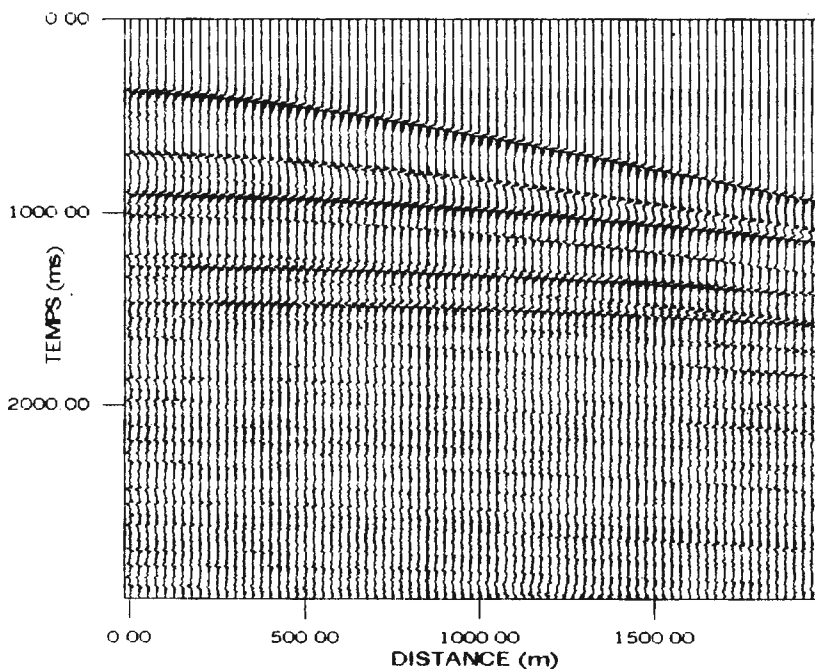


Fig. 8 - Section sismique après déconvolution dans le domaine (τ, p)

Seismic section after deconvolution in the (τ, p) plan

CONCLUSION

En comparant les enregistrements sismiques avant et après application de la déconvolution prédictive dans le plan (x, t) , on remarque que l'énergie des multiples est fortement atténuée pour les traces proches du point de tir (faibles offsets). Cependant, il a été constaté que l'efficacité de la déconvolution diminue avec l'augmentation de l'offset: les réflexions multiples sont alors faiblement atténuées. Ce phénomène s'explique par la non périodicité des multiples pour les grandes distances (large offsets); quant à l'énergie des primaires, elle est conservée. Dans le plan (τ, p) la périodicité des multiples est respectée mais elle varie d'une pente paramètre du rai à une autre. Les énergies des réflexions multiples sont atténuées au niveau de toutes les traces du dispositif d'enregistrement. Il ressort de cette étude que la déconvolution prédictive dans le plan (τ, p) donne des résultats meilleurs par rapport à ceux obtenus par son

homologue dans le plan (x, t) . Cependant, elle exige un grand temps machine et un choix précis du pas d'échantillonnage de la pente. La déconvolution dans le plan (τ, p) n'est pas appliquée au niveau des centres de traitements Algériens; test probable que les spécialistes estiment que les résultats obtenus par la déconvolution dans le plan (x, t) sont satisfaisants.

BIBLIOGRAPHIE

- BINZHONG ZHOU AND STEAWART, A. GREENHLGH, 1994. Linear and parabolic (τ, p) transforms. *Geophysics* vol 59, n°7 p :1133-1149.
- BINZHONG ZHOU AND STEAWART, A. GREENHLGH, 1996. Multiple suppression by 2-D filtering in the (τ, p) domain; a wave-equation-based methode. *Geophysical prospecting*, vol 44, p 375-401.
- BRIAN RUSSEL AND DAN HAMPSON, 1990. Noise élimination and the Radon transform. *Geophysics the leading EDGE of exploration*.

ATTÉNUATION DES MULTIPLES PAR LA DÉCONVOLUTION PRÉDICTIVE DANS LE DOMAINE (x, t) ET (τ, p)

- CLAERBOUT J.F, 1985.** Imaging the earth's interior
Blackwell scientific publication
- DURRANI-D. BISSET, T.S. , 1984.** The Radon transform
and its properties. Geophysics, 49, 8, p. 1180-
187.
- EVGENY LANDA, IGOR BELFER, AND SHEMER KYEDAR
1999.** Multiple attenuation in the parabolic $(\tau,$
 $p)$ domain using wave front characteristics of
multiple generating primaries. Geophysics, 64,
6, p 1806-1813.
- FOSTER, D.J , AND MOCHER C.C., 1992.** Suppression
of multiple reflections using the Radon transform.
Geophysics 57, p. 386- 395.
- OZDOGAN YILMAZ, 1987.** Seismic data processing by
society of exploration geophysic sts P.O Box
702740 Tulsa ok 74170-2740.
- PREACOCK, R.L. AND SVEN TREITEL, 1969.** Predictive
deconvolution : theory and practice. Geo-
physics, vol 34, n°2, p. 155-169
- SINGH, SC. WEST, GF. AND CHAPMAN, CH., 1989.** The
simplest discrete Radon Transform on plane-
wave decomposition alias removal . Geophysics
54, p. 1339-1343.
- TANER, M.T., 1980.** Long - period sea-floor multiples
and their suppression. Geophysical Prospecting
vol 18, n° p. 30-48.