

SUPPRESSION DES REFLEXIONS MULTIPLES PAR FILTRAGE NON LINEAIRE DANS LE DOMAINE (k, f)

Reçu le 25/02/2002 – Accepté le 10/11/2002

Résumé

La suppression des réflexions multiples, dans le domaine (k, f) par le filtrage conventionnel, donne des résultats satisfaisants pour les offsets lointains. Se basant sur la différence des vitesses apparentes des réflexions primaire et multiple, ses limites apparaissent vite lorsque il y a superposition des énergies de ces réflexions. De même, on peut avoir dans le domaine (k, f) le chevauchement de ces énergies ou un repliement du spectre. On a alors une partie de l'énergie du multiple qui est préservée, ou une distorsion de l'énergie de la réflexion primaire. De plus, le filtre k - f conventionnel donne une réponse impulsionnelle pauvre, causée par le phénomène de Gibbs.

Le filtre non linéaire pallie à cette difficulté. Il permet de définir automatiquement la zone du domaine (k, f) à rejeter, plutôt que de remettre à zéro (brutalement) la partie non désirée du spectre. Nous avons utilisé le modèle de données original (réflexions primaires et multiples) et celui (prédit par équation d'onde) des multiples. La fonction utilisée pour comparer les énergies est la fonction de Butterworth. L'application du filtre non linéaire donne de meilleurs résultats en utilisant le modèle multiple prédit.

Mots clés : – Suppression des réflexions multiples, aliasing, offsets, domaine (k, f) , filtre k - f conventionnel, filtrage non linéaire, model multiple prédit.

Abstract

The conventional filter for suppression of multiples in the (k, f) domain has proved efficient namely for the far offsets. However, due to some arising geological difficulties (especially when the multiple energy superposes to that of the primary reflection) this filter is no more appropriate. New techniques are then required. We suggest using non linear filtering, that presents important advantage. Indeed, it automatically defines the zone to eliminate, even energies of events (multiple and primary reflections) are superposed or are overlapped.

To release this filter, we used the Butterworth gain function to compare the energies of the primaries and multiples reflections, we applied the non linear filter using the original model and the predicted multiple model. This latter leads to better results.

Key words : – Multiple suppression, aliasing, offsets, (k, f) domain, k - f conventional filter, non linear filtering, predicted multiple model.

R. SELLAM¹

M. DJEDDI²

M. DJEDDI¹

¹ Laboratoire de Physique de la Terre; Université de Bouverdès (Algérie)

² Laboratoire des Signaux et Système (L2S) – SUPELEC Gif-sur-Yvette (France)

ملخص

إن إزالة الأمواج المتعددة الانعكاس في التمثيل $(k-f)$ بواسطة الترشيح التقليدي قد أعطت نتائج مرضية فيما يتعلق بالمسافات البعيدة بين المنبع ونقطة التسجيل، وهذا على أساس الفرق بين السرعة الظاهرية للأمواج الأولية والمتعددة الانعكاس محدودة وهذا النوع من الترشيح يظهر بسرعة عندما يكون هناك تراكب في طاقة هاته الأمواج، كما يمكن أن نلاحظ في التمثيل $(k-f)$ تداخل وتراكب لطيف وطاقة هاته الأمواج. وهو ما ينجم عنه بقاء جزء من طاقة الأمواج المتعددة الانعكاس بعيد عن الازالة، أو تشويه لطاقة الأمواج الأولية. بالإضافة إلى أن المرشح $(k-f)$ التقليدي يعطي إجابة نقطية فقيرة بسبب ظاهرة جيبس.

الترشيح الغير خطي يسمح بتجاوز هذا القصور، وهو ما يسمح بإنشاء أوتوماتيكيا المنطقة من التمثيل $(k-f)$ التي يجب إزالتها. أو بالأحرى، إعادة إلى الصفر النقطية الغير مرغوب فيها من الإشارة قمنا باستخدام معطيات نموذج أصلي (أولية ومتعددة) والأخر متحصل عليه بواسطة معادلة الموجة لأمواج متعددة الانعكاس. الدالة المستعملة لمقارنة طاقة الأمواج هي دالة بيتروير تطبيق الترشيح الغير خطي أعطى نتائج أفضل وهذا باستخدام نموذج الأمواج المتعددة الانعكاس المتنبى به.

الكلمات المفتاحية: إزالة الانعكاس المتعددة، الاليزيثق. لاوقساط، التمثيل $(k-f)$ ، المرشح $(k-f)$ التقليدي، الترشيح الغير خطي، نموذج الأمواج المتعددة المتنبى به.

La présence de réflexions multiples sur une section sismique constitue un problème pour le pointé ou l'identification des événements. Ils peuvent en effet, soit être interprétés comme des horizons fictifs, soit masquer des réflexions primaires.

Il est donc impératif de les supprimer ou de les atténuer avant toute interprétation des données sismiques. Tout un processus est nécessaire pour y parvenir.

L'outil mathématique utilisé (dans le filtrage k, f) est la transformation de Fourier rapide (FFT) qui a la propriété de séparer les événements sismiques dans le domaine k, f . Il devient alors aisé de supprimer, par leur remise à zéro, les événements indésirables.

Le problème devient compliqué lorsque les réflexions primaire et multiple se superposent dans le domaine (x, t) . Une fois leur transformée de Fourier calculée, ces événements resteront toujours superposés (dans le domaine k, f). Le filtrage, dit conventionnel, n'est alors plus efficace.

Bien que les corrections dynamiques améliorent la séparation des événements, une solution réside néanmoins dans le filtre non linéaire. La propriété principale de ce dernier est la définition automatique de la zone indésirable ou à rejeter.

OUTIL MATHEMATIQUE

La transformée bidimensionnelle de Fourier (appelée aussi transformée k, f) est l'outil mathématique utilisé dans le filtrage k, f pour constituer de ce fait l'un des filtres multicanaux les plus utilisés en

utilisés en sismique. Concrètement, il s'agit d'une double application de la transformée de Fourier à une dimension. Cette dernière est utilisée en traitement sismique pour sa propriété de séparation des événements dans le domaine (k, f) suivant leurs vitesses apparentes dans le domaine (x, t) .

La transformée de Fourier à deux dimensions d'une fonction continue $f(x, t)$ définie dans le plan R^2 est obtenue à partir de l'expression suivante :

$$F(k, f) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} f(x, t) e^{-2\pi j(kx+ft)} dx dt \quad (1)$$

La transformée inverse de reconstitution de la fonction originale est obtenue par:

$$f(x, t) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} F(k, f) e^{+2\pi j(kx+ft)} dk df \quad (2)$$

En pratique, la fonction $f(x, t)$ est la traduction de la configuration géométrique imagée de la subsurface (la section sismique), où x et t représentent respectivement les variables spatiale et temporelle. Ces dernières sont échantillonnées et limitées suivant les temps et distances.

La transformée de Fourier bidimensionnelle discrète est donnée par:

$$F(I, J) = \sum_{\alpha=0}^{M-1} \sum_{\beta=0}^{N-1} f(\alpha\Delta x, \beta\Delta t) \exp\left[-2\pi j\left(\frac{\alpha I}{M} + \frac{\beta J}{N}\right)\right] \quad (3)$$

$f(\alpha\Delta x, \beta\Delta t)$: un échantillon de la fonction dans le domaine (x, t) ,

$F(I, J)$: un échantillon du spectre dans le domaine (k, f) ,

M : le nombre de traces sismiques,

N : le nombre d'échantillons dans la trace considérée,

α, β : les indices spatial et temporel,

I, J : les indices en nombre d'ondes et en fréquences.

La transformée k - f discrète inverse est donnée par la relation :

$$f(\alpha\Delta x, \beta\Delta t) = \frac{1}{MN} \sum_{I=0}^{M-1} \sum_{J=0}^{N-1} F(I, J) \exp\left[2\pi j\left(\frac{\alpha I}{M} + \frac{\beta J}{N}\right)\right] \quad (4)$$

Cette transformée peut être représentée par un calcul simultané de deux transformées de Fourier discrètes à une dimension.

$$G(I, \beta\Delta t) = \sum_{\alpha=0}^{M-1} f(\alpha\Delta x, \beta\Delta t) \exp\left(-2\pi j\frac{\alpha I}{M}\right) \quad (5)$$

$$F(I, J) = \sum_{\beta=0}^{N-1} G(I, \beta\Delta t) \exp\left(-2\pi j\frac{\beta J}{N}\right) \quad (6)$$

Ces transformées à une dimension peuvent être calculées par l'algorithme FFT. Cela représente la transformée de Fourier suivant l'axe des distances x (offsets) puis celui des temps t .

REFLEXIONS SIMPLES ET MULTIPLES

Réflexion simple (ou primaire)

Pour un milieu homogène et isotrope de vitesse V , l'expression du temps de trajet t (en fonction de l'offset x) d'une onde réfléchie est donnée par :

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (7)$$

Pour N couches, l'expression du temps t devient :

$$t^2 = \left(\sum_{i=1}^N t_{0i}\right)^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad \text{avec} \quad V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N V_i^2 t_{0i}}{\sum_{i=1}^N t_{0i}}} \quad (8)$$

t_{0i} : le temps double à incidence normale pour une couche donnée,

V : la vitesse de stack (somme),

x : l'offset (distance émetteur-récepteur).

Dans le cas d'une couche inclinée d'un angle α , l'expression du temps est donnée par :

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2 \cdot \cos^2 \alpha}{V^2} \quad (9)$$

C'est l'équation d'une hyperbole, comme dans le cas de couches horizontales, avec cependant un décalage par rapport à l'origine.

Réflexions multiples

Les réflexions multiples sont des arrivées d'énergie qui, au cours de leurs trajets, ont subi plusieurs réflexions. C'est un phénomène qui prend naissance à chaque fois qu'il y a un contraste d'impédance acoustique entre deux couches géologiques.

On distingue les réflexions multiples à longs trajets (multiples longs) et celles ayant un trajet plus court (multiples courts). Les multiples longs sont des réflexions produites à l'intérieur des couches épaisses. Ils sont particulièrement fréquents en sismique marine dans la tranche d'eau. C'est ce type de multiples qui sera traité dans le présent article.

Les multiples courts sont aussi appelés réverbérations. Ils affectent la forme de l'ondelette sismique avec apparition d'oscillations secondaires, ce qui diminue le pouvoir de résolution.

Les figures 1 et 2 en sont des illustrations [6].

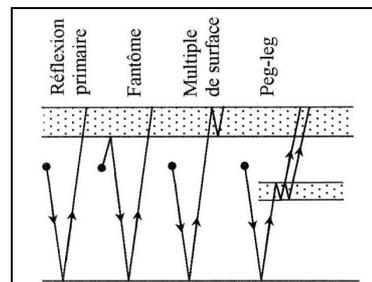


Figure 1 : Multiples courts.

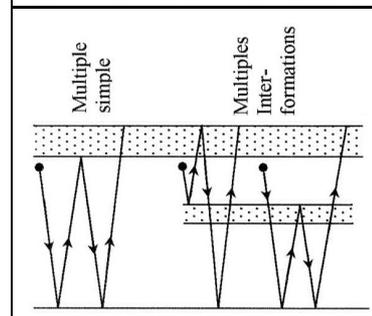


Figure 2 : Multiples longs.

Les techniques de suppression des ces effets indésirables sont aussi variées que leur nature et leurs caractéristiques [5]. Elles se basent sur :

- La différence de courbure entre les réflexions primaires et les multiples (discrimination par les vitesses),
- La différence de pendage entre les réflexions primaires et les multiples sur un stack CMP (Common Depth Point),
- La différence du contenu fréquentiel entre les primaires et les multiples,
- La périodicité des multiples.

Les réflexions multiples sont également atténuées lors de la technique d'addition en couverture multiple. A partir d'une loi de vitesses, les réflexions sont corrigées dynamiquement, les primaires sont alignées horizontalement tandis que les multiples sont généralement sous-correctés. Après addition, les réflexions primaires seront préservées alors que les multiples seront atténués.

La déconvolution prédictive, autre technique d'atténuation, a pour but de déterminer un opérateur qui puisse supprimer la partie indésirable de l'autocorrélation englobant les multiples. Ces derniers étant répétitifs, ils sont donc "prédictibles". On calcule alors à partir d'un certain temps appelé distance de prédiction et, sur toute la trace sismique, la partie "prédictible" du signal qu'on remet à zéro.

Pour un modèle géologique à couches horizontales, l'expression du temps d'arrivée d'une réflexion multiple d'ordre m est :

$$t_M^2 = (mt_0)^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (10)$$

t_M : temps d'arrivée d'une réflexion multiple,
 m : ordre du multiple.

Pour N couches, cette expression devient :

$$t_M^2 = \left(\sum_{i=1}^N (OR_i + 1)t_{0i} \right)^2 + \frac{X^2}{V^2} \quad (11)$$

avec
$$V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N V_i^2 \cdot (OR_i + 1)t_{0i}}}{\sum_{i=1}^N (OR_i + 1)t_{0i}}$$

i étant l'ordre du multiple pour la $i^{ème}$ couche.

FILTRAGE k - f CONVENTIONNEL

La première étape consiste à corriger dynamiquement (correction Normal Move Out ou NMO) l'enregistrement original avec une loi de vitesse intermédiaire. Ainsi, les réflexions (primaires) seront sur-correctées, alors que les multiples seront eux, sous-correctés.

L'application de la FFT projette les réflexions dans le cadran négatif du domaine k - f et les multiples dans le cadran positif.

Le filtre conventionnel consiste en une remise à zéro de la zone des multiples dans le domaine (k, f) .

La FFT inverse donne la section sismique nettoyée des multiples [4].

La figure 3 illustre le filtre k - f conventionnel.

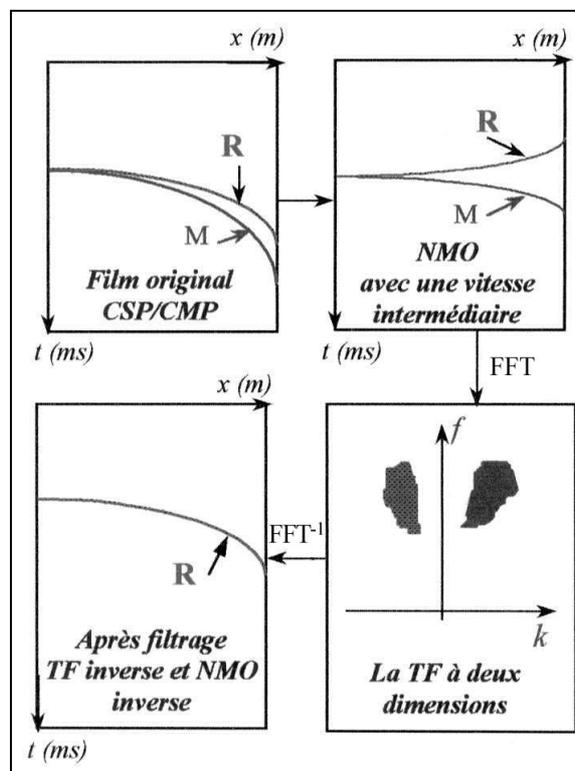


Figure 3 : Principe du filtrage k - f conventionnel.

FILTRE k - f NON LINEAIRE

Lorsque les réflexions primaire et multiple se superposent, leurs représentations dans le domaine $(k$ - $f)$ le sont également, ce qui rend impossible leur séparation.

La superposition des réflexions primaires et multiples est due à deux raisons principales: l'aliasing ("chevauchement") des spectres d'énergie du multiple et/ou de la réflexion primaire dans le domaine $(k$ - $f)$ peut causer un recouvrement de l'un des quadrants sur l'autre.

Quelques multiples de la section originale peuvent avoir un résidu d'énergie dans le quadrant négatif (celui du primaire) ou inversement. Ce cas est fréquent si les couches sont inclinées. Même après correction dynamique avec une vitesse intermédiaire, une partie de l'hyperbole du multiple dans le domaine (x, t) aura une vitesse apparente qui ressemble à celle des réflexions (vitesse négative). La représentation de ce dernier dans le domaine $(k$ - $f)$ sera sur le quadrant des réflexions utiles. De forts résidus d'énergie du multiple sont donc susceptibles de se trouver dans ce quadrant; une atténuation de l'énergie du primaire est observée lors du filtrage.

Si l'énergie du multiple est située dans le même quadrant que celle des réflexions, une zone étroite de rejet des multiples doit être sélectionnée pour éviter l'atténuation des primaires. Pour cela chaque data (données) du CSP est traité individuellement. Cette technique est moins efficace lorsque l'énergie du multiple est superposée sur l'énergie des primaires.

Le filtre non linéaire est présenté ici sous deux versions: la première est basée sur le modèle original alors que la seconde prend en compte le modèle multiple prédit.

Filtere non linéaire utilisant le film original

Ce filtre, basé sur l'enregistrement original, sert à la construction d'une autre section sismique dans le domaine $(k-f)$. Ce dernier ne contient que la partie indésirable (la zone des multiples située dans le quadrant positif du domaine $(k-f)$). En comparant l'énergie de ces deux enregistrements, le filtre non linéaire va préserver automatiquement la partie utile.

L'utilisation du filtre idéal crée des sauts d'amplitudes (phénomène de Gibbs) par ses rampes de coupure verticales. L'utilisation de rampes inclinées évite ce problème mais laisse des résidus de la zone à filtrer.

L'avantage du filtre non linéaire est le lissage automatique, plutôt que de fixer des rampes pour chaque échantillon. Cette méthode ne va cependant pas résoudre le problème d'aliasing ou le problème de superposition du multiple avec la réflexion utile ou encore celui du à la présence de couches inclinées.

Filtere non linéaire calculé à partir d'un enregistrement avec multiples

Cette méthode de filtrage utilise le modèle multiple prédit. Ce dernier est constitué seulement de l'énergie (du multiple) à supprimer dans le modèle original. Il est prédit par extrapolation de l'onde.

Les sections d'entrée du data original et du modèle multiple sont corrigées par NMO avec une vitesse intermédiaire pour maximiser le degré de séparation entre le multiple et le primaire avant transformation dans le domaine $(k-f)$. Le filtrage est réalisé par application d'un filtre non linéaire dans ce dernier.

Ce filtre fonctionne comme un comparateur d'énergie entre les deux enregistrements (original et avec multiples) pour chaque échantillon dans le domaine $(k-f)$.

L'utilisation de cette version du filtre non linéaire permettra de résoudre les problèmes causés par le phénomène de Gibbs ainsi que ceux dus à une mauvaise définition de la zone à rejeter. Une meilleure suppression des multiples dans le domaine $(k-f)$ peut être achevée avec une bonne information sur le modèle multiple prédit.

Fonction de gain du filtre

Le choix de la fonction de gain du filtre non linéaire est arbitraire. C'est la fonction Butterworth qui est utilisée dans le présent travail. Sa formule est la suivante :

$$G(k, f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{B(k, f)}{\varepsilon \cdot A(k, f)}\right)^n}} \quad (12)$$

$B(k, f)$ est la sommation sur une fenêtre à deux dimensions (k et f) du spectre d'amplitude de l'échantillon centré du modèle multiple prédit; $A(k, f)$: la sommation sur la même fenêtre du spectre (k, f) de l'enregistrement original; n : paramètre de lissage du filtre; ε : le paramètre de rejet du multiple.

Le filtre est non linéaire en ce sens que l'équation (12) est dépendante de l'entrée A ; par contre, le filtre conventionnel en est indépendant.

Pour un échantillon donné dans le plan $(k-f)$ pour lequel le rapport B/A est plus petit que la valeur déterminante du rejet du multiple ε (le multiple n'existe pas) la fonction de gain est approximativement égale à l'unité ; elle prendra une valeur très proche de zéro pour un ε plus grand que le rapport B/A (présence de multiples).

Le filtre non linéaire définira donc automatiquement la zone à rejeter sans toucher aux réflexions utiles.

Le filtre est appliqué pour chaque échantillon après la correction NMO et la transformée $(k-f)$ du data d'entrée pour mieux séparer le primaire du multiple qui sera alors éliminé sans distorsion du primaire même si les spectres d'énergie de ces deux événements "chevauchent".

Ce filtre n'est pas utilisé comme un filtre passe-bas pour le filtrage dans le domaine fréquentiel, mais plutôt comme un comparateur des énergies entre le modèle original et le modèle multiple.

Pour mieux voir l'effet du paramètre n ainsi que le gain du filtre pour des données du rapport B/A et des constantes ε et n , la figure 4 illustre un exemple de fonctions de gain obtenues avec les paramètres suivants :

- B/A varie de 0 à +1,
- n prend une des valeurs 2, 4, 6, et 8,
- $\varepsilon = 0.25$.

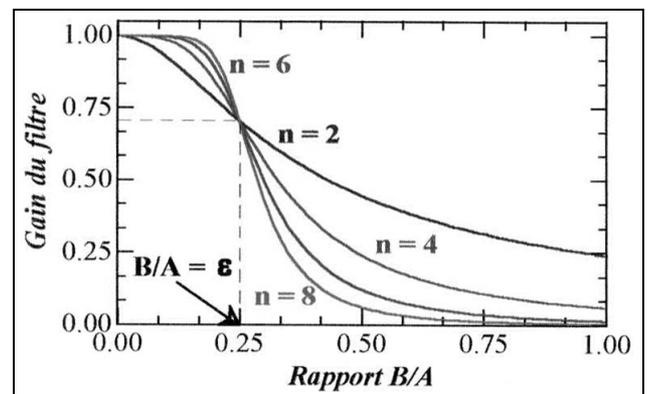


Figure 4: Fonction de gain du filtre non linéaire.

La valeur de n contrôle le lissage du spectre d'amplitude. Pour une faible valeur du paramètre n , les pentes seront adoucies, ce qui nous évitera le phénomène de Gibbs. Néanmoins, cela donnera un mauvais filtrage. L'utilisation d'une valeur de n plus grande permettra d'améliorer le filtrage mais causera des pentes raides.

Il faudra donc choisir soigneusement ce paramètre de façon à éviter les deux inconvénients.

APPLICATIONS

Description des modèles

Les modèles géologiques sont choisis de façon à ce qu'ils soient proches de cas réels. Ces modèles sont les suivants:

Modèle à couches horizontales (fig.6)

C'est un modèle à 5 couches. Les vitesses et les épaisseurs sont données dans le tableau suivant:

Surface du sol	
Couche N°1	$V_1=1500$ m/s $h_1= 225$ m
Couche N°2	$V_2=2000$ m/s $h_2= 300$ m
Couche N°3	$V_3= 2500$ m/s $h_3= 250$ m
Couche N°4	$V_4=3200$ m/s $h_4= 320$ m
Couche N°5	$V_5=3800$ m/s $h_5= 380$ m
Couche N°6 (Socle)	$V_6=4500$ m/s

V_i = Vitesses de stack
 H_i = épaisseurs

Modèle sismique

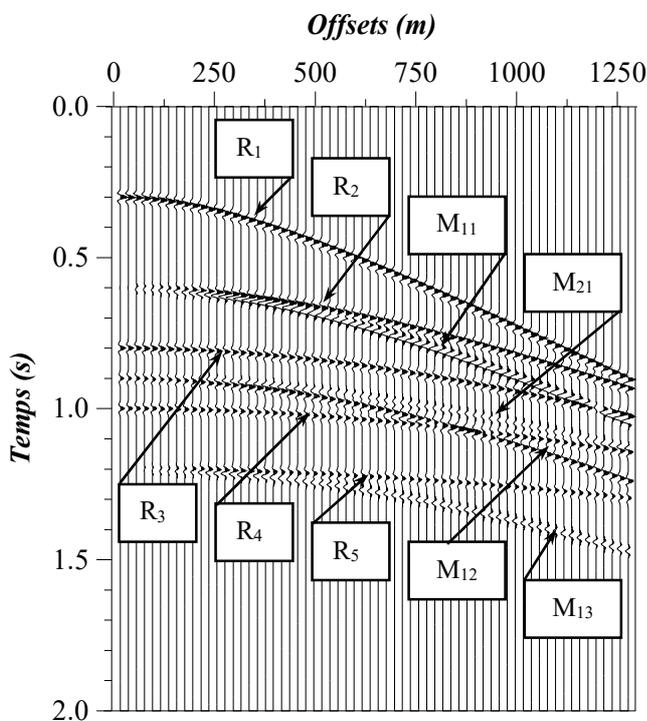


Figure 6: Modèle à couches horizontales.

Modèle à couches inclinées (fig.7)

Le même modèle est repris avec les mêmes vitesses et épaisseurs des couches. La différence est que la première couche est inclinée d'un angle $\alpha = 4^\circ$ par rapport à l'horizontale.

Les paramètres du film synthétique pour les deux modèles géologiques sont :

Nombre de traces : 64; Temps d'enregistrement : 2 secondes; Pas d'échantillonnage : 1 ms; Intertrace: 10 m; Offset : 20 m; Les coefficients de réflexion pour chaque réflecteur sont respectivement égaux à 1, 0.85, 0.70, 0.55 et 0.45.

A chaque modèle on a associé trois multiples M_{11} , M_{12} et M_{13} (multiples d'ordre 1, 2 et 3, engendrés par la première couche) et un multiple d'ordre 1 de la deuxième couche M_{21} .

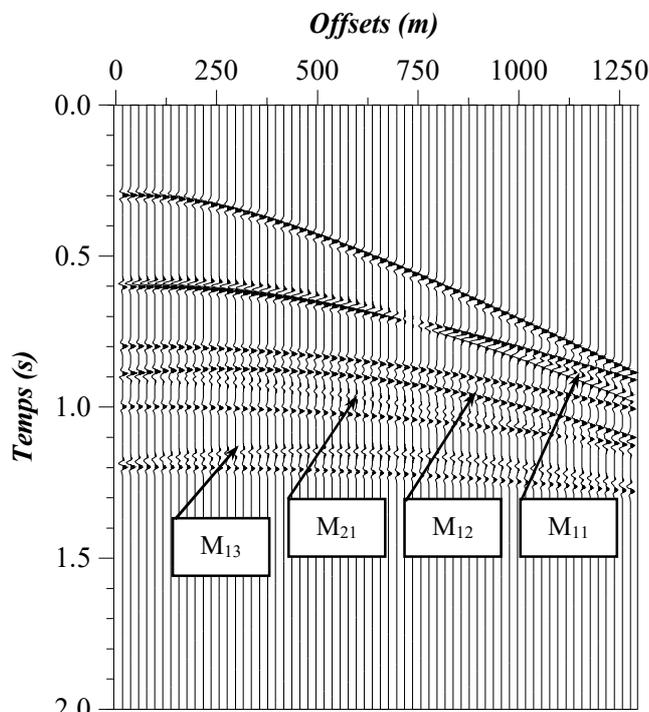


Figure 7: Modèle à couches inclinées.

Filtrage $k-f$

En utilisant le modèle original, le filtre non linéaire est équivalent au filtre conventionnel. Nous remarquons des résidus importants de multiples. De plus, l'énergie des réflexions primaires est supprimée avec celle des multiples.

L'avantage du filtre non linéaire utilisant le modèle original est sa facilité de mise en œuvre (Planches 1 à 4).

Le filtre non linéaire basé sur le modèle multiple prédit donne de meilleurs résultats que le filtre conventionnel. Il permet de récupérer l'énergie des réflexions utiles atténuées du fait de la superposition des énergies de la réflexion primaire et celle du multiple. Il travaille également tant sur les offsets lointains que les offsets proches (Planches 1 à 4).

Le filtre non linéaire est également efficace dans le cas du modèle à couches inclinées. Cela confirme son efficacité même dans les cas les plus délicats où l'énergie des multiples est confondue avec celle de la réflexion utile (Planches 3 et 4).

La présence de bruit (20% de bruit blanc) ne diminue en rien l'efficacité du filtre (Planches 2 et 4).

CONCLUSION

L'idée maîtresse de la séparation des réflexions multiples des primaires donne des résultats appréciables lorsque ces événements sont distincts dans le plan (x,t) . Le filtrage conventionnel dans le domaine $(k-f)$ n'est plus efficace dès lors que les énergies des multiples et des primaires se superposent.

Le filtre non linéaire permet de résoudre ce problème par la définition automatique de la zone à rejeter (celle des multiples).

S'il est possible d'améliorer ce filtre en explorant notamment sa fonction de gain, il est de loin préférable de

penser à une transformation qui, dans un autre domaine, concentrerait l'énergie du multiple de façon à faciliter son élimination.

Dans le prolongement du présent travail, nous proposons l'outil mathématique qu'est la transformation $\tau - p$ notamment dans sa forme parabolique. Elle pourrait donner de meilleurs résultats pour la suppression des multiples.

La forme hyperbolique de l'indicatrice du multiple pouvant être approchée par une parabole, cette transformation donne du multiple un point comme image.

REFERENCES

[1]- Binzhong Zhou et Stewart A. Greenhalgh, "Wave-equation extrapolation-based multiple attenuation : 2-D filtering in the f-k domain", *Geophysics*, vol. 59, n°9, pp. 1377-1379, (september 1994).
 [2]- Arthur B. Weglein, "Multiple attenuation : an overview of

recent advances and the road ahead", *The leading EDGE (SEG)*, Vol. 18, n°1, January (1999), pp. 40-44.
 [3]- Wendell Wiggins, "Multiple attenuation by explicit wave extrapolation to an interpreted horizon", *The leading EDGE (SEG)*, Vol. 18, n°1, January (1999), pp. 46-54.
 [4]- Fail I.P. et Grau G., "Les filtres en éventail", *Geophysical prospecting*, Vol. XI, n°2, (1963), pp. 131-163.
 [5]- Özdoğan Yilmaz, "Seismic data processing", *SEG* 6th edition, (1993), pp. 445-462.
 [6]- Sheriff R.E. et Geldart L.P., "Traitement et prospection sismiques", tome 2, Cambridge University Press, 2nd Edition (1998) pp 367- 387.
 [7]- Taner M.T., "Long-period sea-floor multiples and their suppression", *Geophysical prospecting*, Vol.18, (1980), pp.30-48.
 [8]- Benchikh M., Djeddi M., "Utilisation de la KL combinée avec un filtre de polarisation : application en sismique de surface et en sismique de puits", *Bulletin du service géologique de l'Algérie*, Vol. 13, n°1, (2002), pp. 81-92. □

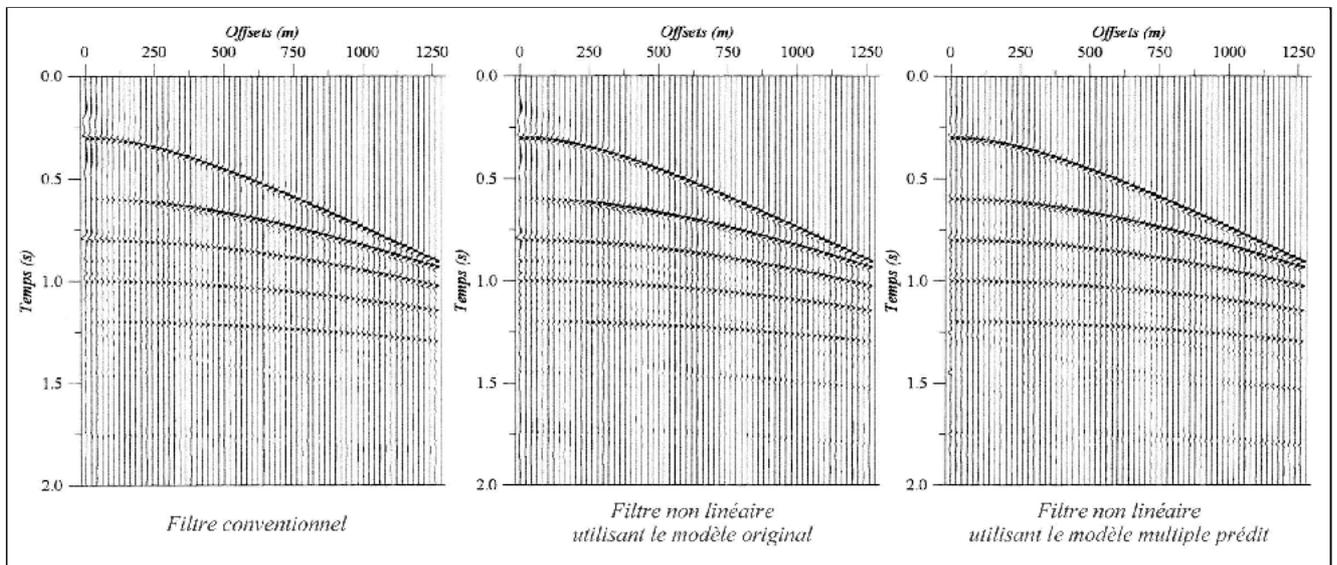


Planche 1: Filtrage k-f (modèle à couches horizontales).

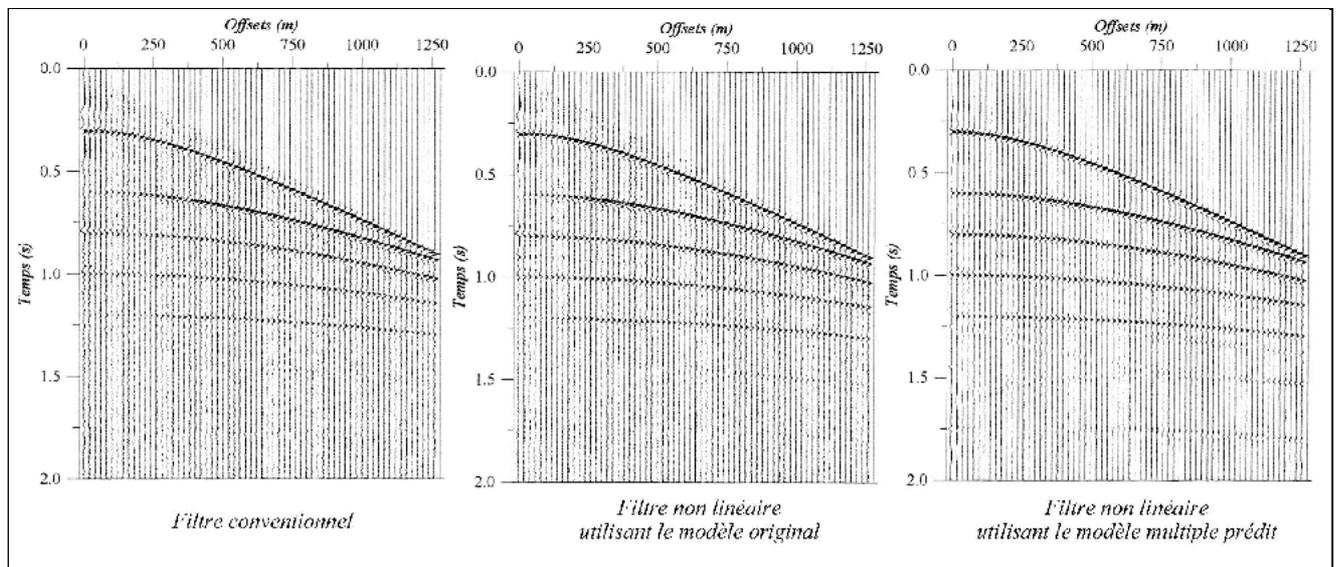


Planche 2: Filtrage k-f (modèle à couches horizontales avec 20% de bruit).

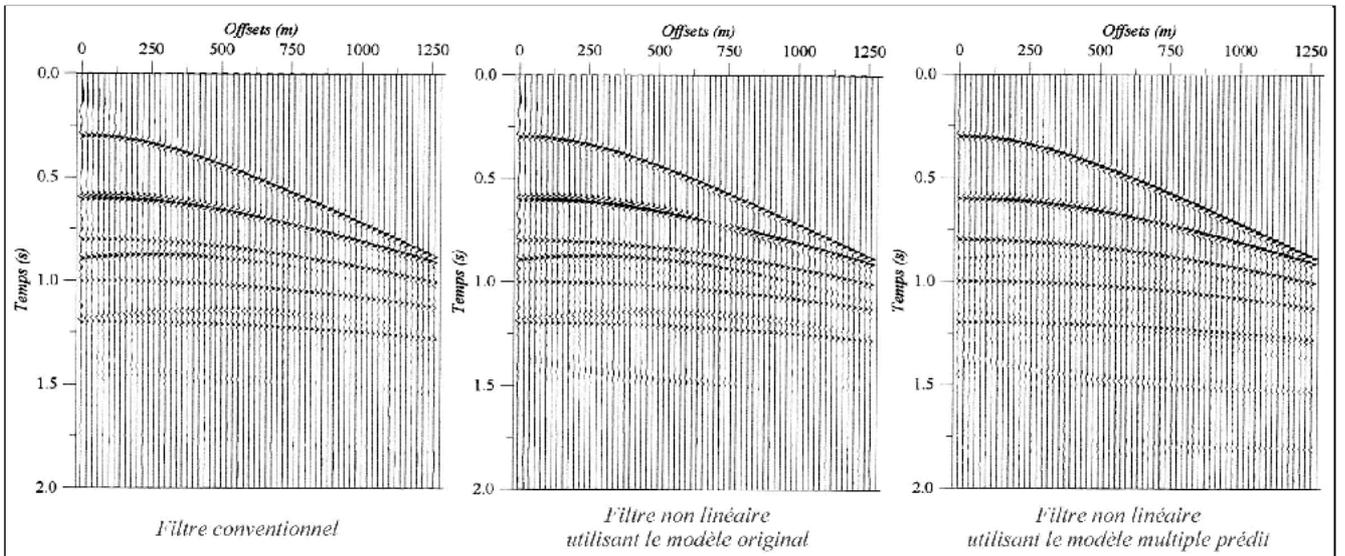


Planche 3: Filtrage k-f (modèle à couches pentées).

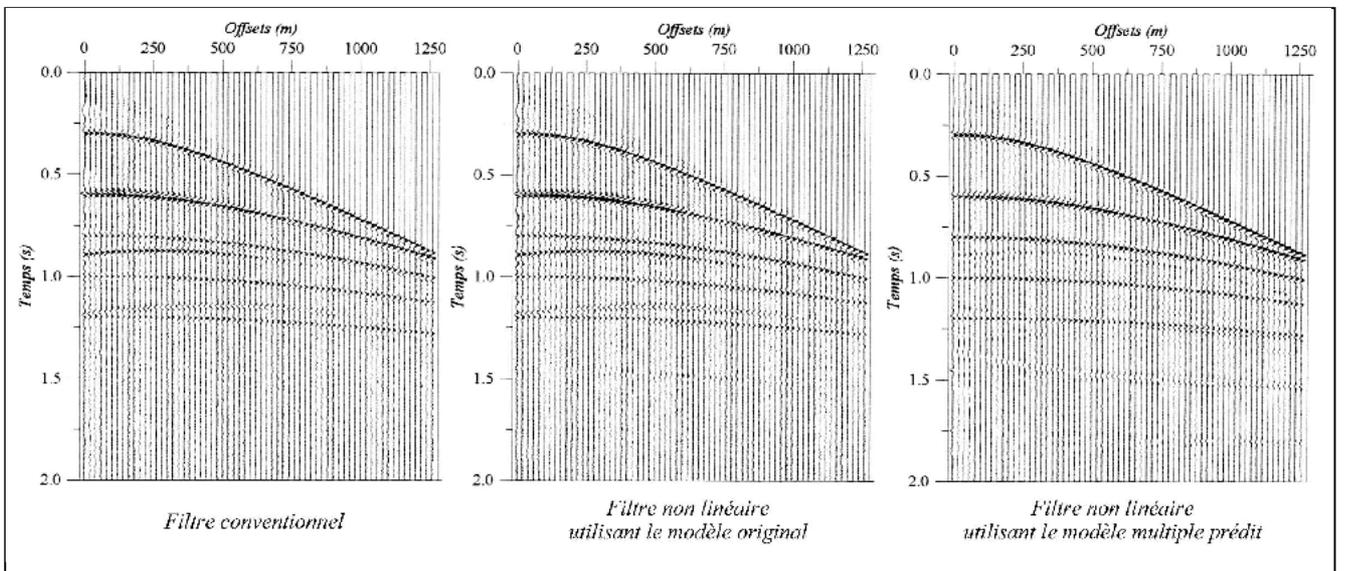


Planche 4: Filtrage k-f (modèle à couches pentées avec 20% de bruit).