

SÉPARATION DES CHAMPS D'ONDES DANS UN PROFIL SISMIQUE VERTICAL ET ATTÉNUATION DES MULTIPLES PAR LA TRANSFORMATION DE KARHUNEN - LOEVE

Abdelhafid MIHOUBI*, Mabrouk DJEDDI, Moh-Amokrane AITOUCHE**, Mounir
DJEDDI*** et Messaoud BENIDIR*****

RÉSUMÉ

La transformation de Karhunen-Loeve (TKL) est une transformation linéaire analogue aux transformations de Fourier ou de Radon avec la particularité que les coefficients de transformation sont déduits directement des données à transformer, à l'inverse des autres techniques où la définition de ces coefficients est indépendante du vecteur sur lequel on désire opérer.

Le principe de la transformation de Karhunen – Loeve consiste en la décomposition des données sismiques en composantes principales. L'opération de filtrage est effectuée à l'aide d'une reconstruction des données initiales par la sélection des composantes principales correspondant à l'énergie estimée cohérente.

Parmi les objectifs attendus de la transformation de Karhunen – Loeve dans le traitement des données sismiques, nous retenons l'amélioration du rapport signal sur bruit (atténuation des bruits aléatoires), la séparation des champs d'ondes ascendant et descendant dans un Profil Sismique Vertical (PSV) et l'atténuation de la redondance de l'information à travers les réflexions multiples.

Mots-clé: Covariance - Valeurs propres - Vecteurs propres - Profil sismique vertical - Champ d'ondes - Filtrage - Multiples.

SEPARATION OF WAVE FIELDS IN A VERTICAL SEISMIC PROFILE AND ATTENUATION OF MULTIPLES USING THE KARHUNEN-LOEVE TRANSFORM

ABSTRACT

The Karhunen-Loeve transformation is a linear multichannel method, that shares many similarities with Fourier or Radon transforms with the particularity that in K-L transform the transformation coefficients are extracted directly from the data set which we need to transform, but in the other methods these coefficients are independent from the initial data set.

* SONATRACH Division *DATA CONTROL*, 02 Rue du 24 Février 35000 Boumerdes-Algérie.

** Laboratoire de Physique de la Terre. Département de Géophysique. Université de Boumerdes-Algérie.

*** Laboratoire Signaux et Systèmes Supelec, 3 Rue Joliot Curie 91 192 Gif sur Yvette Plateau du Moulon-France

- Manuscrit déposé le 03 Décembre 2003, accepté après révision le 15 Décembre 2004.

In K-L transform, the seismic data is decomposed into a set of principal components, and to filter data, we simply reconstruct the original data set with the principal component which correspond to the coherent energy.

The K-L transform is used for three specific problems in seismic data processing: enhancement of the signal-to-noise ratio, The separation between two wave fields and the suppression of the multiple in CMP or CDP gather- Example of this technique for synthetic and needed data are presented.

The object of this study is the application of the TKL to solve two problems in the seismic data processing: The first is the separation of wave's fields', up going and down going, in a Vertical Seismic Profile (V.S.P).

The second is the attenuation of the multiple:

The multiple arrivals pose a serious problem in the seismic data processing. The TK-L is one of the methods which solve this problem. This technique offers a possibility of insulation and attenuation of this type of noise. Insulation because it enables us to project the noise (multiple) in a space, represented in our application by the first two principal components, and a signal space (primary arrivals) corresponding to the rest of the principal components.

T K-L does not require any resampling because it does not change the domain of application (no aliasing problem). This last condition is essential for other methods like Fourier transform (F-K Filter).

The TKL operates on the matrix of the data to filter and not on a predefinition associated matrix.

Key-words: Covariance - Eigen values - Eigen vectors - Vertical seismic profile - Wave field - Filtering - Multiple.

INTRODUCTION

La technique corrélative d'analyse des signaux a montré toute son efficacité dans l'évaluation quantifiée de la similitude des événements au cours de leur évolution. Le degré de «corrélabilité» peut cependant être source d'inconvénients. Quel intérêt pourrait présenter une similarité quand une différence est plus porteuse d'informations. La technique de décorrélation des signaux permet à ces derniers de partager plus leurs différences que leurs similitudes.

Comme pour l'ensemble des transformations mathématiques de large emploi en traitement du signal (Transformation de Fourier, de Laplace, de Hartley, de Radon,...), il s'agit de définir

une transformation réversible permettant une redistribution de l'information globale à traiter. Précisément, ni cette décorrélation, ni cette redistribution ne peuvent avoir lieu sans le diagnostic d'un, ou de plusieurs paramètres de discrimination ou de différenciation et la construction d'un espace de projection. Ces deux arguments constituent le centre d'intérêt du présent article: la décomposition spectrale de la matrice-événements sismiques donc de la construction de l'espace de projection, la séparation des champs d'ondes dans un Profil Sismique Vertical (PSV), le filtrage des événements multiples ou répétitifs répertoriés comme bruits par rapport à l'information utile.

La mise en œuvre de la Transformation de Karhunen-Loeve, eu égard à la décomposition

spectrale de la matrice- événements nécessite au préalable l'option pour un algorithme de calcul des valeurs propres et de leur classification. Dans la phase d'application de la Transformation de Karhunen-Loeve, il est surtout remarqué l'absence de critères fiables de troncature de la distribution classée des valeurs propres. Pour pallier à cette carence, nous avons procédé par tests pour assigner un caractère utile à une sous classe de valeurs propres et attribuer par là même le caractère de bruit au sous groupe restant. Ceci est le principe de l'Analyse en nombre de composantes (CP), la qualité des sections sismiques obtenues, tant en filtrage qu'en séparation des champs d'ondes montant et descendant en dépend fortement.

PRINCIPE DE LA TRANSFORMATION DE KARHUNEN-LOEVE (TKL)

Opportunité de la TKL en traitement sismique

L'origine des ondes sismiques tant en prospection géophysique conventionnelle (sismique de surface), ou en géophysique de profondeur (sismique de puits) est diverse. Issues de réflexions, de réfractions, de diffractions, évoluant individuellement ou en champ, les ondes sismiques, quelque soit leur nature, tendent vers un même objectif: révéler l'image géométrique de la subsurface. Cependant, l'état de forte corrélation des données d'enregistrement, l'émergence de bruits corrupteurs, poussent à l'adoption de méthodes de traitement particulièrement adaptées telles que la Transformation de Karhunen-Loeve (Hemon, Ch. et al., 1978).

SUR UNE RÉORGANISATION DES DONNÉES SISMQUES

Une donnée sismique est caractérisée par deux états: sa valeur en tant qu'échantillon numérique et son appartenance à une trace sismique. Cette caractérisation bidimensionnelle offre une

opportunité de représentation matricielle de tout enregistrement X en posant :

$$X = \{X_i^j\} \mid i = 1, p; j = 1, n \quad (1)$$

l'indice i désignant la trace sismique ou individu, l'indice j l'échantillon ou variable. Plus explicitement:

$$X = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_1^2 & \dots & X_1^j & \dots & X_1^n \\ X_2^1 & X_2^2 & \dots & X_2^j & \dots & X_2^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_i^1 & X_i^2 & \dots & X_i^j & \dots & X_i^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_p^1 & X_p^2 & \dots & X_p^j & \dots & X_p^n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Représentation spatiale des données de la matrice X

La lecture de la matrice X peut être effectuée par rapport aux individus (traces sismiques), donc pour un «balayage» des variables (échantillons). La distribution spatiale des données sismiques fournit un nuage de points de dimension égale au nombre de traces p (fig1).

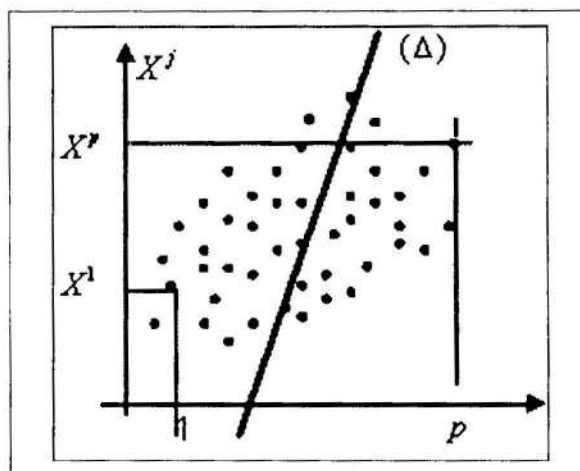


Fig. 1- Distribution spatiale des données sismiques
Spatial distribution of the seismic data

La dimension p de l'espace de représentation étant relativement élevée et compte tenu de la préservation de l'information, l'un des objectifs de la transformation est alors de réaliser une projection des données sur un espace de dimension p' tel que $p < p'$. Pour cela, on définit la droite moyenne (Δ) traversant le nuage de points et accueillant les projections orthogonales de ces derniers ; la droite moyenne (Δ) sera alors représentative du nuage de points en question.

L'approche inertielle du nuage de points consiste à déterminer la droite (Δ) ou tout au moins une direction par rapport à laquelle son inertie est minimale. Les données sismiques ayant été organisées sous forme matricielle, une direction qui peut avoir la faveur de la projection serait celle, définie par les vecteurs propres associés aux valeurs propres d'une matrice que nous aurons à construire.

UNE FORMULATION GÉNÉRALISÉE DE TRANSFORMATION DE KARHUNEN-LOEVE

Partant du système de fonctions orthonormées $B = \{\varphi_i(t)\}_{i=1,n}$ donc vérifiant la relation :

$$\int \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = \delta_{ij} \quad (3)$$

δ_{ij} étant le symbole de Kronecker défini par :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Soit une suite de variables aléatoires $\{X_k(t)\}_{k=1,n}$ décomposée dans la base B telle que :

$$X_n(t) = \sum_{k=1}^n Y_k(t) \varphi_k(t) \quad (4)$$

Exprimons l'espérance mathématique des deux membres de l'expression (4) :

$$E[X_n(t), \overline{X_n(t')}] = \sum_{k=1}^n \lambda_k \varphi_k(t) \overline{\varphi_k(t')} \quad (5)$$

Sous l'hypothèse de convergence de (4), on pose :

$$X(t) = \lim_{n \rightarrow +\infty} X_n(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} Y_k \varphi_k(t) \quad (6)$$

Cette hypothèse de convergence appliquée à (5) donne :

$$E[X(t), \overline{X(t')}] = \sum_{k=1}^{+\infty} \lambda_k \varphi_k(t) \overline{\varphi_k(t')} \quad (7)$$

Le premier membre de (7) n'est autre que la fonction de covariance $Cov(t, t')$ de la variable aléatoire X . Pour une durée d'observation T , on exprime l'intégrale définie suivant :

$$\int_{(T)} Cov(t, t') \varphi_m(t') dt' = \sum_{k=1}^{+\infty} \lambda_k \varphi_k(t) \int_{(T)} \overline{\varphi_k(t')} \varphi_m(t') dt' \quad (8)$$

En tenant compte de la condition d'orthonormalité (3) appliquée au second membre de (8) :

$$\int_{(T)} Cov(t, t') \varphi_m(t') dt' = \alpha_m \varphi_m(t) \quad (9)$$

Nous déduisons de l'expression (9) que les termes α_m et $\varphi_m(t)$ représentent respectivement la valeur propre et le vecteur correspondant de l'opérateur $Cov(t, t')$. La fonction de covariance d'une variable aléatoire est donc composable comme un développement en série de fonctions orthonormées, correspondant aux fonctions propres liées aux valeurs propres de l'opérateur de covariance, (Watanab, S., 1965).

AXES ET FACTEURS PRINCIPAUX

Le caractère de la distribution spatiale des données du nuage de points est un indicateur révélateur du degré de corrélation des données sismiques. Une distribution «elliptique» (fig.2)

renseigne à la fois sur un fort coefficient de corrélation et sur le choix du grand axe comme droite moyenne de projection de ces données.

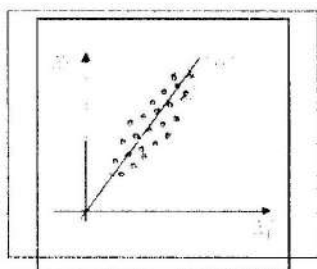


Fig. 2 - Distribution spatiale de données à forte corrélation

Spatial distribution of data for strong correlation

La droite de projection (Δ) perd le statut d'axe de symétrie dès lors que les données sont contaminées par du bruit ou à très faible corrélation. L'objectif consiste alors, à déterminer la droite ou tout au moins son vecteur unitaire V répondant aux hypothèses de projection souhaitées. Interviennent dans sa construction l'approche inertielle du nuage de points par rapport au plan (π) passant par le centre de gravité, le calcul du moment d'inertie $I_{(\pi)}$ par rapport à ce plan et la matrice d'inertie C de terme général $C_{k,l} = \sum_j X_k^j X_l^j$. Ces trois facteurs de construction de la droite de projection (Δ) sont reliés par l'expression :

$$I_{(\pi)} = V^T C V \quad (10)$$

L'objectif est alors de rendre le moment d'inertie $I_{(\pi)}$ maximal par rapport au vecteur unitaire V soit :

$$\frac{\partial I_{(\pi)}}{\partial V} = 0 \quad (11)$$

L'introduction de la méthode des multiplicateurs de Lagrange revient à introduire la matrice unité V et le facteur λ vérifiant l'équation :

$$\frac{\partial}{\partial V} [V^T C V - \lambda (V^T V - 1)] = 0 \quad (12)$$

Il est alors déduit de l'expression (12) la relation :

$$C V = \lambda V \quad (13)$$

Le vecteur V apparaît donc, comme le vecteur propre associé à la valeur propre λ de la matrice de covariance C , construite à partir de la matrice des données sismiques X en posant :

$$C = X X^T \quad (14)$$

LA TRANSFORMATION DE KARHUNEN-LOEVE COMME OPERATEUR DE FILTRAGE

Il est à remarquer le rôle clé joué par la décomposition spectrale de la matrice de covariance. Les valeurs propres issues de cette décomposition elles-mêmes porteuses d'informations, permettent d'opérer une discrimination entre les bruits et l'information utile. On estime cette dernière localisée vers les valeurs propres de plus fort module.

Le filtrage par la transformation de Karhunen-Loeve (Al Yahia, KM., 1991) est obtenu par une simple projection des données sismiques sur les différents vecteurs propres. En d'autres termes, on effectue une décomposition des signaux initiaux en composantes principales. Le nombre des composantes principales utilisées est généralement déterminé par des essais. Ainsi, partant de la courbe d'évolution des valeurs propres rangées par ordre décroissant, une décroissance régulière des valeurs propres montre que les données sont désorganisées d'une voie à l'autre et ne représentent que des bruits. Par contre, lorsqu'il y a discontinuité dans la courbe d'évolution décroissante des valeurs propres (forme irrégulière), les données sont composées d'un espace (signaux organisés et cohérents d'une voie à l'autre) et d'un espace bruit caractérisé par des événements incohérents.

Algorithme de calcul de la transformation de Karhunen - Loeve (Haddadi, R.A., 1991)

Algorithm for computing Karhunen - Loeve Transform (Haddadi, R.A., 1991)

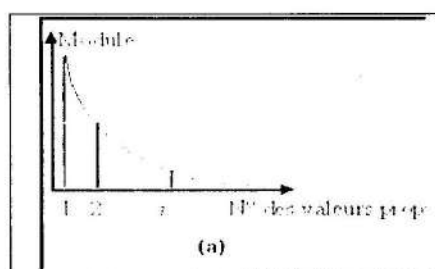
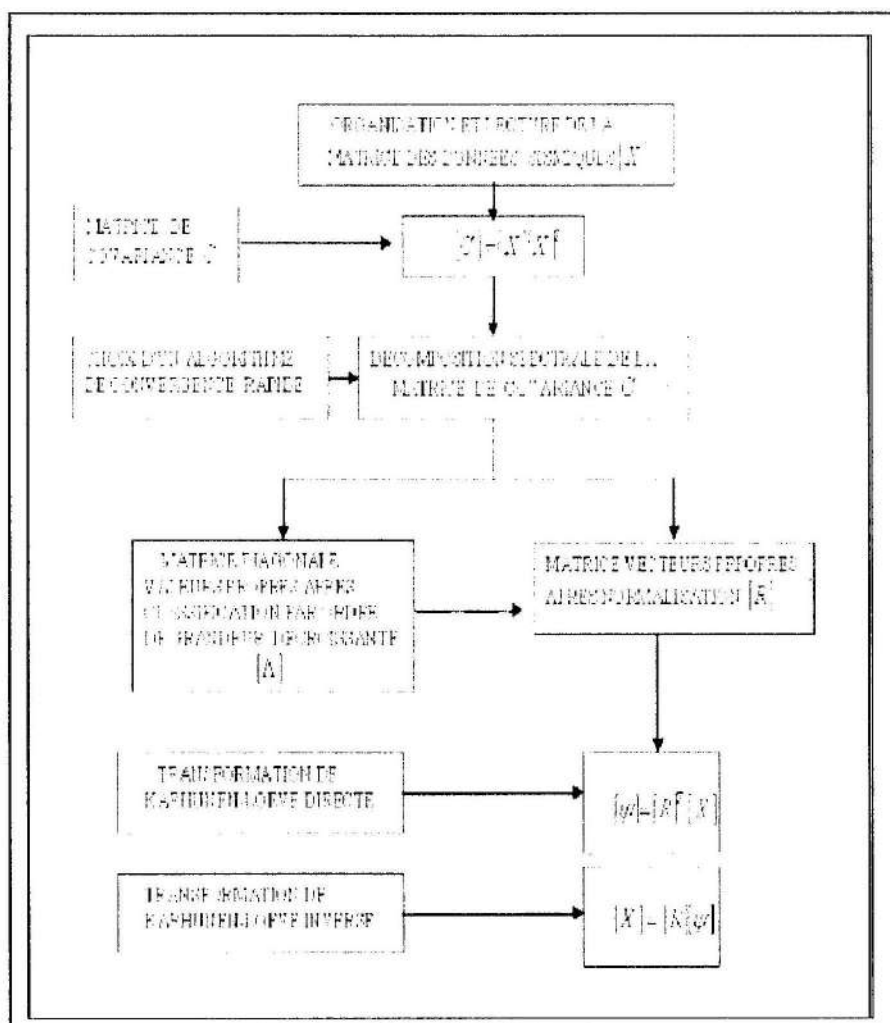


Fig.3 a -Distribution régulière des valeurs propres: information sismique cohérente

Regular distribution of eigen values : coherent seismic information

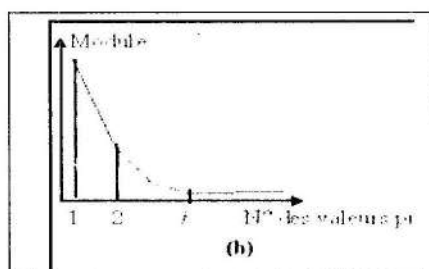


Fig.3b - Distribution irrégulière des valeurs propres: données inorganisées

Irregular distribution of eigen values : unorganized data

LA TRANSFORMATION DE KARHUNEN-LOEVE COMME OPÉRATEUR DE FILTRAGE DE BRUIT

Le filtrage par la TKL est réalisé par le biais d'une troncature de la distribution des modules des valeurs propres (fig. 3), sachant que le critère d'information non utile (bruits, ondes multiples...) est relégué aux valeurs propres de moindre module. Concrètement, l'opération de filtrage découle d'une mise à zéro et à partir d'un certain rang, de valeurs propres et par conséquent, des vecteurs propres correspondants. Les vecteurs propres retenus constitueront la base des composantes principales de reconstitution de l'information filtrée. Cette procédure aboutit d'une part, à une réduction de la dimension de l'espace de projection telle que souhaitée et d'autre part, à l'obtention par la TKL inverse des données originelles filtrées. En effet, partant de la relation

si $[\hat{R}]$ désigne la matrice $[R]$ modifiée, la matrice $[\hat{X}]$ des données filtrées est obtenue par la TKL inverse :

$$[\hat{X}] = [\hat{R}] [\psi] \quad (15)$$

$[\psi]$: étant la matrice de la transformation de Karhunen-Loeve telle que indiquée dans l'algorithme.

Critère de troncature

Il n'existe pas à proprement parler, de critère universel de coupure de la distribution des modules des valeurs propres. La troncature présente une étape décisive car elle concerne à la fois une décision de conservation de l'information jugée utile et un rejet d'une information superflue.

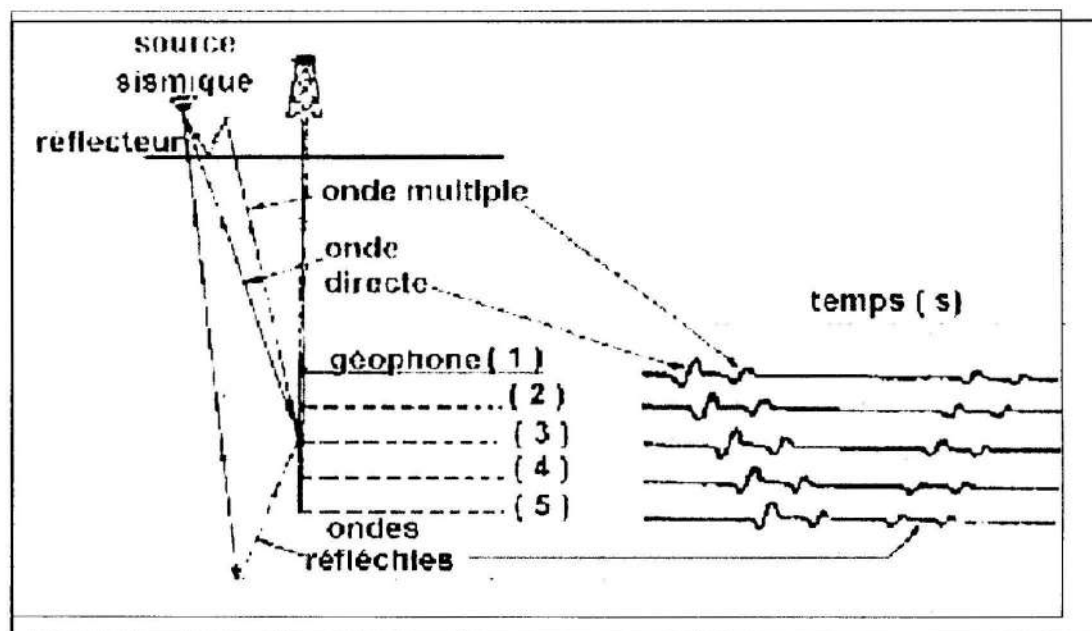


Fig. 4 - Principe du Profil Sismique Vertical

Vertical Seismic Profile principle

ATTÉNUATION DES BRUITS PAR LA TKL DANS UN MODÈLE SISMIQUE SYNTHÉTIQUE

Dans le but de montrer l'apport et juger de l'efficacité de la TKL dans l'amélioration du rapport signal sur bruit, nous avons élaboré un modèle sismique synthétique (fig. 5) décrit comme suit :

- Figure 5.a: Une section sismique synthétique constituée de 48 traces est obtenue à partir d'un modèle géologique formé de trois couches horizontales de vitesses différentes respectivement de 2000, 3000 et 4000 m/s. Dans cette section nous avons aussi introduit un bruit organisé d'une vitesse de 900 m/s.

- Figure 5.b : même section sismique contaminée par un ajout de taux de bruit aléatoire de 10% et ce pour les 45 traces sismiques.

En absence de bruit, le champ d'ondes est bien clair et les deux horizons sont bien cohérents.

En présence de bruit, les événements horizontaux sont plus ou moins masqués et l'événement penté est partiellement noyé dans le bruit.

- Figure 5c : représentant le résultat de l'application de la transformation de Karhunen-Loeve dans l'atténuation des bruits et l'amélioration de la cohérence des événements utiles. L'utilisation de la première composante principale dans la reconstruction du signal a donné un résultat appréciable. Nous remarquons aussi la bonne cohérence des événements horizontaux et une meilleure atténuation des bruits.

La Transformation de Karhunen-Loeve donne des résultats appréciables dans l'amélioration du rapport signal sur bruit. Cependant, une bonne application des corrections statiques et corrections dynamiques est nécessaire pour l'efficacité de cette technique.

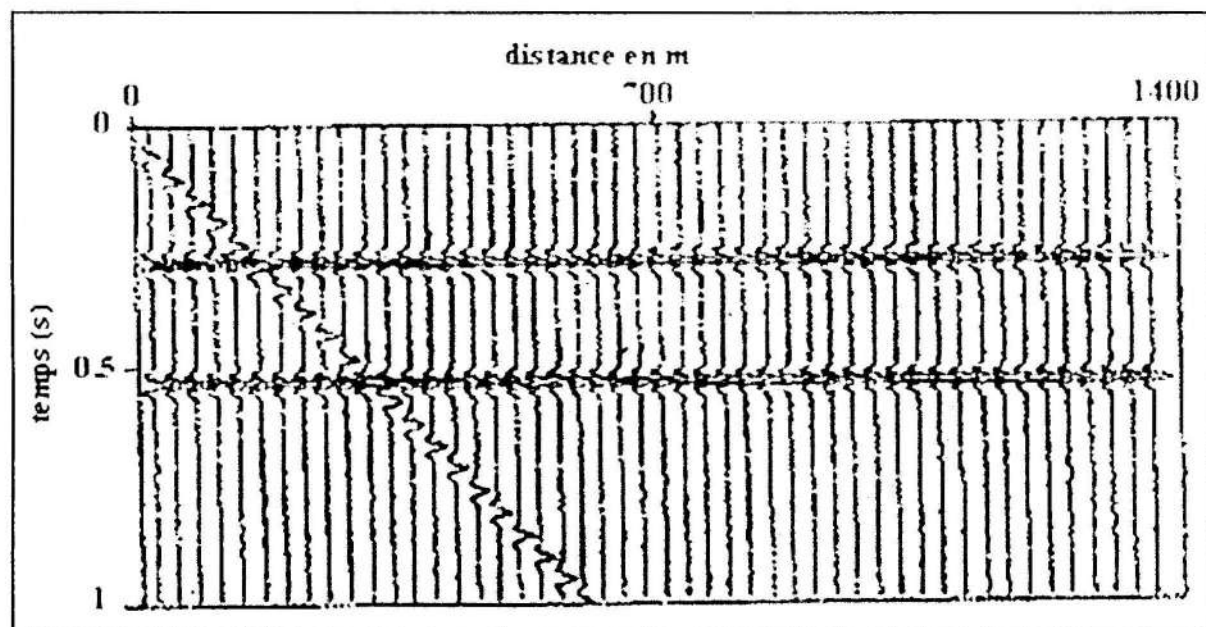


Fig. 5 a - Section sismique synthétique sans ajout de bruit aléatoire
Synthetic seismic section without adding noise

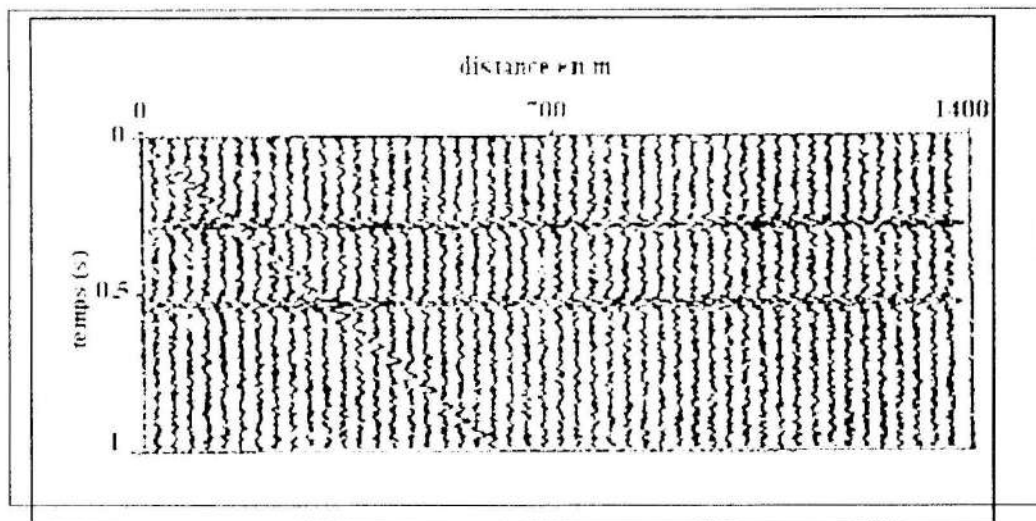


Fig. 5 b - Section sismique synthétique bruitée (ajout de 10% de bruit aléatoire)
noised synthetic seismic section (10% of random noise)

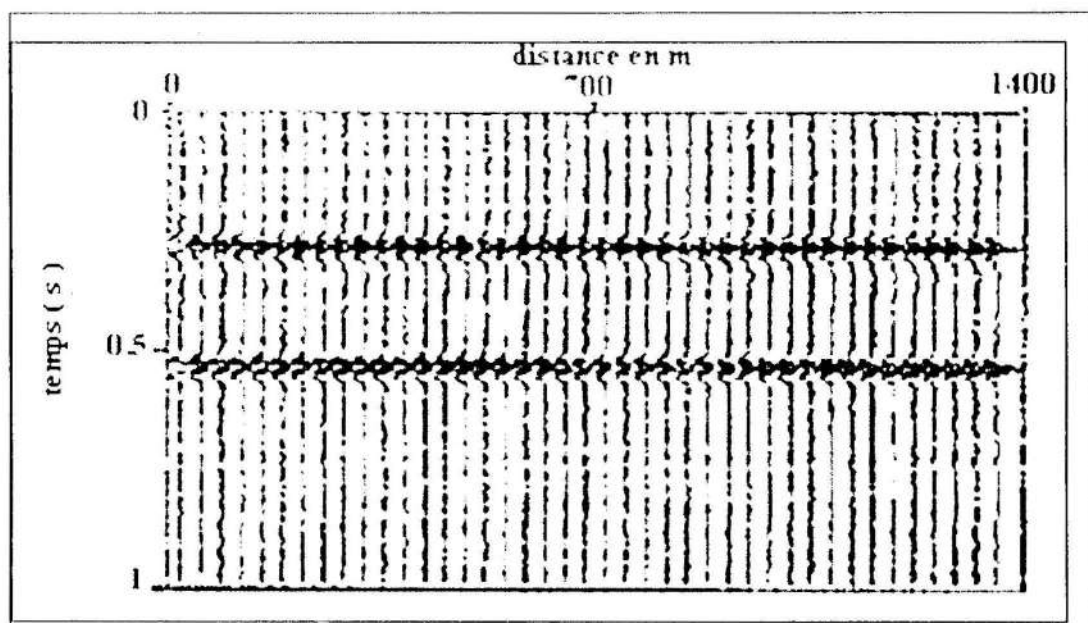


Fig. 5 c - Filtrage par la TKL en utilisant la première composante principale
filtering by the KLT using the first principal component

SÉPARATION DES ONDES DANS UN PROFIL SISMIQUE VERTICAL (P.S.V)

Principe du PSV

Répertorié parmi les techniques dites «sismique de puits», le Profil Sismique Vertical consiste en l'émission d'un signal à la surface du sol, et en la détection des arrivées par des géophones ancrés à différentes profondeurs d'un puits préalablement foré (fig. 4).

Pour que «le point» source sismique soit sensiblement sur la même verticale que la grappe de capteurs, on se place dans les conditions d'un déport modéré par rapport à l'axe vertical du puits. Le Profil Sismique Vertical est apparenté aux diagraphies acoustiques pour les fréquences sismiques. L'un des avantages que procure cette technique d'exploration géophysique, est qu'elle permet l'obtention d'images théoriquement meilleures que celles de la sismique de surface, du fait que la détection a lieu à proximité des réflecteurs.

Principaux événements enregistrés dans un PSV

Deux classes principales de signaux répartis en champs d'ondes sont enregistrées lors de l'acquisition des données dans un PSV: un champ d'ondes descendantes et un champ d'ondes descendantes-ascendantes.

Le champ d'ondes descendantes

Il comprend l'ensemble des ondes de trajet surface-capteurs. Caractérisé par une vitesse apparente de pente positive, le champ d'ondes descendantes correspond aux arrivées directes et aux signaux multiples ayant subi plus d'une réflexion au court de leur trajet.

Le champ d'ondes ascendantes

Provenant de la profondeur du puits et caractérisé par une vitesse apparente de pente négative, le champ d'ondes ascendantes regroupe l'ensemble des ondes primaires montantes, et les signaux multi-

ples provenant des réflexions qui donneront naissance à la suite des réflexions des ondes descendantes.

APPLICATION DE LA TKL SUR UN P.S.V SYNTHÉTIQUE

L'extraction d'un champ d'ondes exige d'abord une horizontalisation de l'événement désiré. Cette horizontalisation est effectuée par un simple décalage temporel de la première arrivée (onde directe). Afin d'horizontaliser l'onde montante, on ajoute le temps de décalage. A l'inverse de l'onde descendante où ce temps est retranché. Notons que dans les deux cas, on peut aussi utiliser un programme de corrections statiques.

Pour réaliser cette application de la TKL (Mihoubi, A., 1999), une section PSV synthétique a été générée à partir du modèle géologique suivant.

Modèle Géologique

Couche N°	Vitesse m/s	Epaisseur m
1	2000	200
2	2500	200
3	3000	300
4	3500	300
5	4000	semi-fini

Procédure d'application de la TKL

Extraction du champ montant

La figure 6a donne l'image d'une section PSV dénuée de bruits. Deux types d'ondes sont observés: le champ d'ondes descendant avec l'onde directe et le champ d'ondes montant.

La figure 6b illustre la section PSV synthétique après horizontalisation du champ descendant.

La figure 6c montre l'extraction du champ d'ondes montant. Les événements résiduels sur la partie droite de la section sont dus essentiellement au contraste d'amplitudes entre l'onde directe (forte énergie) et l'onde montante.

SÉPARATION DES CHAMPS D'ONDES DANS UN PROFIL SISMIQUE VERTICAL ET ATTÉNUATION DES MULTIPLES PAR LA TRANSFORMATION DE KARIHUNEN-LOEVE

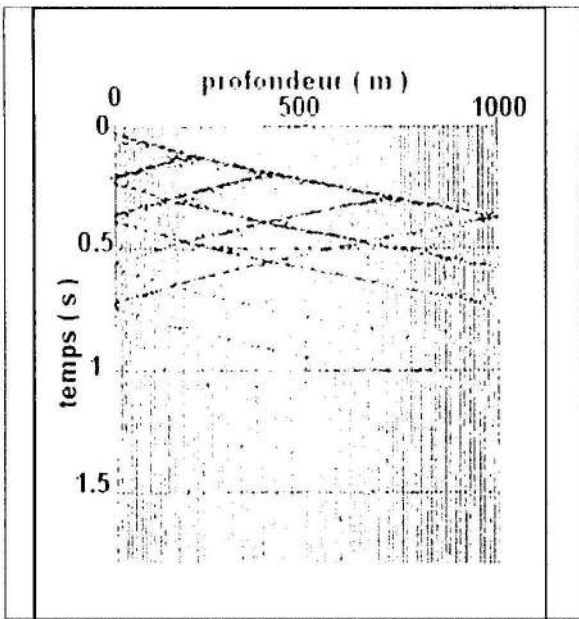


Fig. 6 a - PSV brut
Raw Vertical Seismic Profile

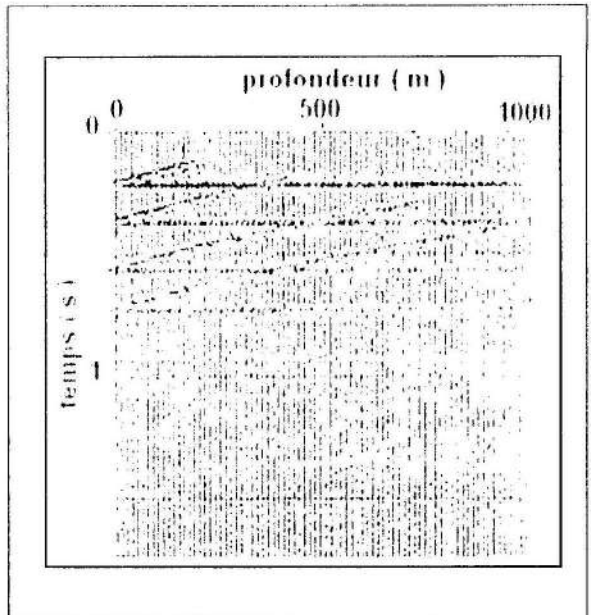


Fig. 6 b - Champ descendant horizontalisé
Horizontalisation of the downgoing wave field

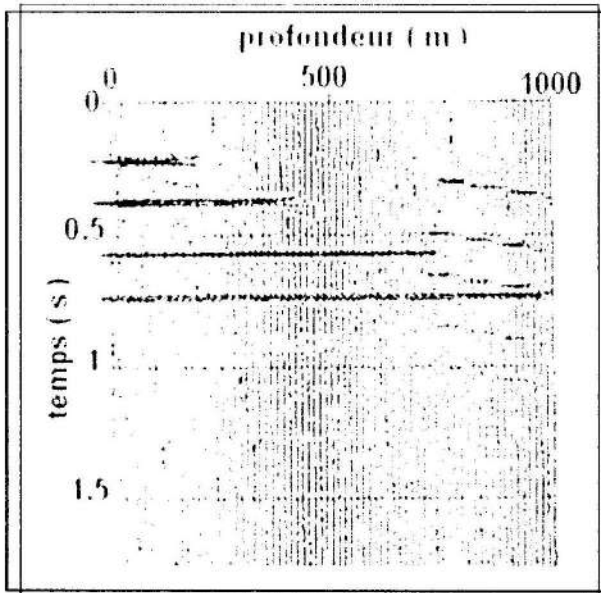


Fig. 6 c - Extraction du champ d'ondes montant
Extraction of the upgoing wave field

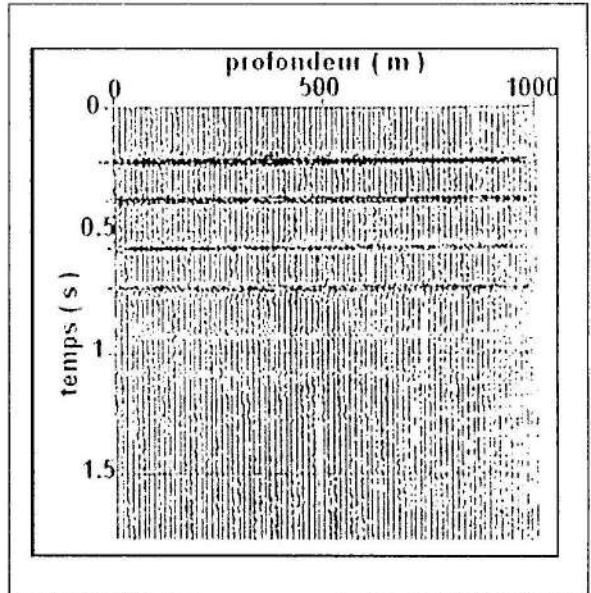


Fig. 6 d - Extraction du champ d'ondes descendant
Extraction of the downgoing wave field

Extraction du champ descendant

Le même travail est réalisé pour l'extraction du champ d'ondes descendant à la seule différence que l'horizontalisation à effectuer est celle des ondes descendantes. La figure 6d représente le film sismique PSV synthétique après extraction de l'onde descendante. Nous remarquons l'absence de l'onde directe, ce qui est l'indice d'une extraction acceptable. Notons que l'extraction du champ descendant a été réalisée par application de la seule première composante principale (Glangeaud, F. et *al.*, 1993, 1994).

APPLICATION DE LA TKL SUR DES DONNÉES RÉELLES (P.S.V RÉEL)

Analyse des données

Pour montrer l'apport de la TKL dans la séparation des champs d'ondes issus de données réelles, un enregistrement PSV de 128 traces a été considéré. Une longueur de trace de 2s a été sélectionnée afin de minimiser le temps de calcul (fig. 7a). Après un filtrage fréquentiel, l'horizontalisation des ondes descendantes est effectuée (fig. 7b) (Bencheikh, M. et *al.*, 2002).

L'extraction du champ descendant par la transformation de Karhunen-Loeve est faite par application de la première composante principale. Nous remarquons (fig. 7c) la préservation du champ descendant, alors que le champ montant est complètement atténué.

La soustraction du champ descendant du champ brut est ensuite entreprise (fig. 7d).

Notons que dans le présent travail, seul l'objectif de la séparation des champs d'ondes montant et descendant a été retenu, sans un approfondissement des opérations de traitement ou de filtrage (Oppenheim, A.V., 1978).

La figure 8 représente la courbe d'évolution des valeurs propres classées dans un ordre décroissant par rapport à leur module. Nous remarquons le caractère discontinu de cette courbe, ce qui donne une séparation efficace des champs d'ondes. Les valeurs caractérisées par de grandes amplitudes représentent l'espace des événements cohérents donc à préserver.

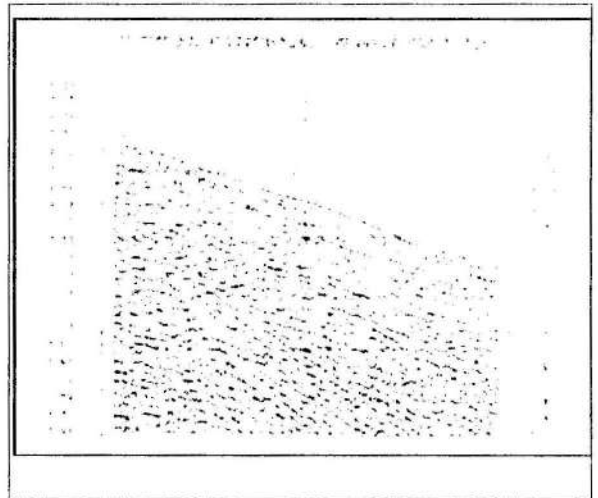


**fig. 7 a - Champ d'ondes brut
raw waves field**

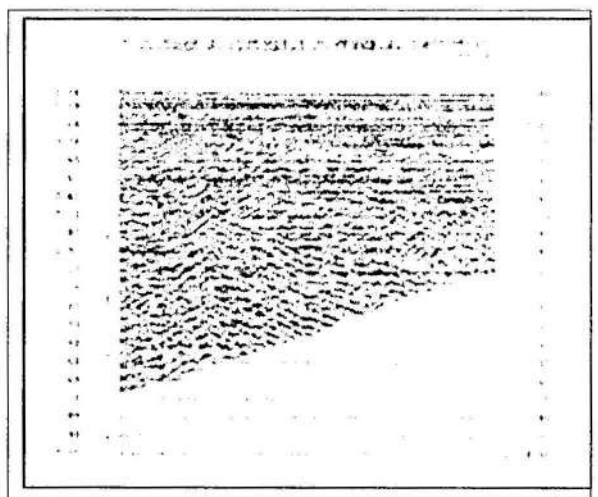


**Fig. 7 b - Champ d'ondes descendant horizontalisé
downgoing waves field after horizontalization**

SÉPARATION DES CHAMPS D'ONDES DANS UN PROFIL SISMIQUE VERTICAL ET ATTÉNUATION DES MULTIPLES PAR LA TRANSFORMATION DE KARIHUNEN-LOEVE

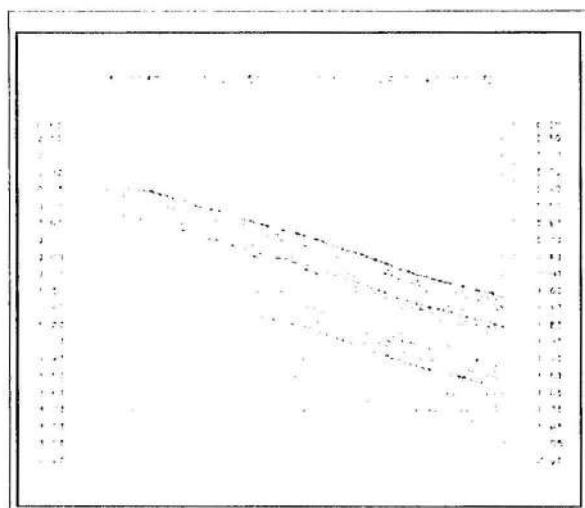


Fig. 7 c - Extraction du champ d'ondes descendant
Extraction of the downgoing waves field

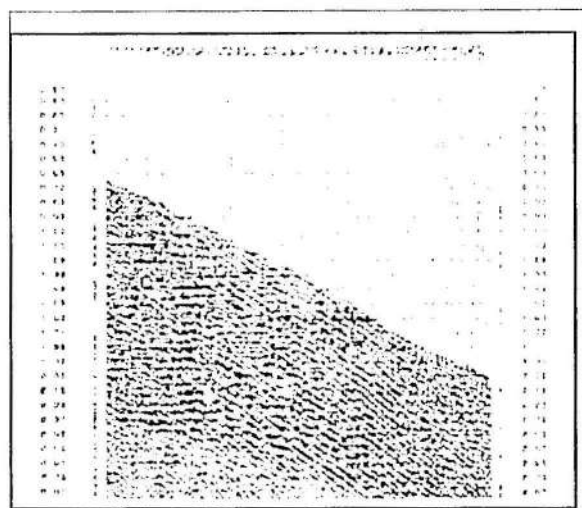


Fig. 7 d - Extraction du champ d'ondes montant
Extraction of the upgoing waves field

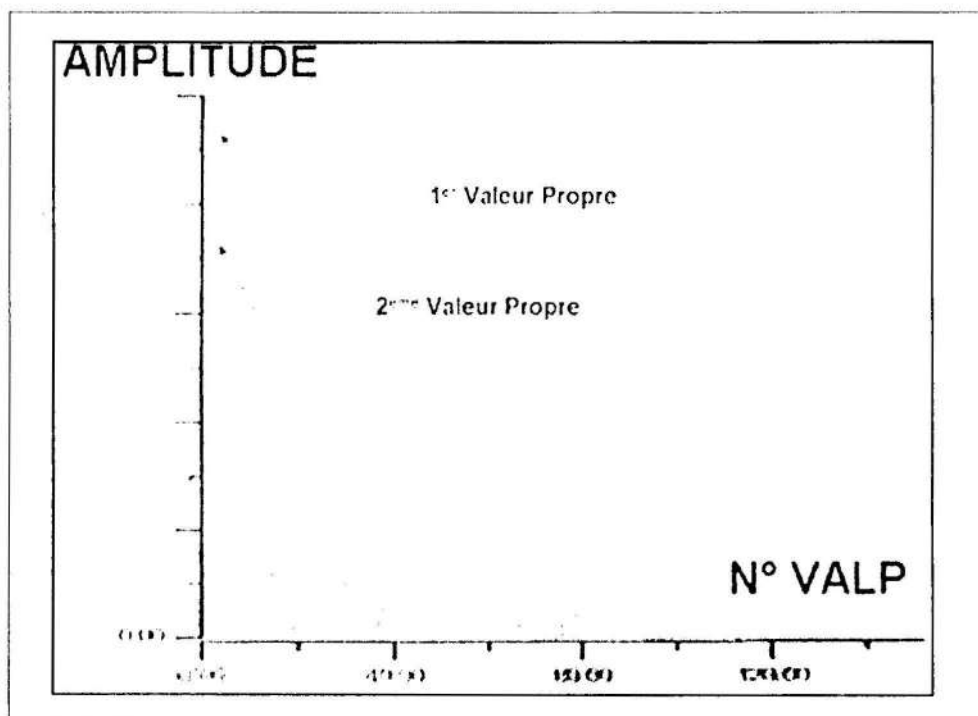


fig. 8 - Courbe d'évolution des valeurs propres
Evolution curve of the eigen values

APPLICATION DE LA TKL POUR L'ATTÉNUATION DES ONDES MULTIPLES

Description de l'organigramme de l'atténuation des multiples par la TKL

Le critère de discrimination entre les ondes sismiques multiples et l'information dite utile par la Transformation de Karhunen-Loeve, repose sur le principe de séparation entre l'énergie associée à ces ondes multiples et celle correspondante aux réflexions primaires. L'opération de filtrage dans ce cas consiste en l'élimination des composantes principales correspondant aux multiples dans la reconstruction des données initiales (Transformation de Karhunen-Loeve Inverse (TKLI)).

L'opération de filtrage est décrite par les opérations suivantes:

- A partir des analyses de vitesses, on identifie la vitesse qui donne une meilleure correction dynamique des ondes sismiques multiples.
- Utilisant la vitesse définie dans l'étape (1), on applique une correction dynamique (NMO) sur les données à traiter. Dans ce cas les arrivées multiples seront plus ou moins horizontalisées, par contre celles qui représentent les arrivées primaires seront sur-corrigées ou au contraire sous-corrigées.
- Calcul de la TKL des données après application d'une correction dynamique : l'énergie cohérente associée aux multiples est concentrée sur les premières composantes principales.
- Reconstitution des données initiales (TKL Inverse) avec l'élimination des composantes principales représentant le domaine des multiples.
- Application d'une correction dynamique inverse avec la même loi de vitesses utilisée dans l'étape décrite en (2).

ANALYSE DES RÉSULTATS

La figure 9 représente une section sismique marine composée de 20 CDP de 24 traces chacun. Pour bien présenter l'opération de l'atténuation des multiples par la transformation de Karhunen-Loeve Inverse, le CDP central a été choisi.

On observe sur la figure 9 un événement à forte énergie observé au temps $t=2.5s$ et causé par un important contraste d'impédance acoustique entre la couche d'eau et la première couche géologique sous-jacente.

Les analyses de vitesses nous ont permis de détecter et de localiser les multiples (fig. 10).

Pour différencier le multiple des réflexions primaires deux lois de vitesses ont été prises:

- La première loi a donné une bonne correction dynamique pour le multiple et une sous correction des réflexions primaires (fig. 11a). Le multiple est représenté en temps à 4.8sec (fig. 9). L'événement situé à 2.4sec correspond au fond marin.

- La seconde loi de vitesses donne une bonne correction des réflexions primaires alors que les multiples sont sur-corrigés (fig. 11b).

L'évènement situé à 4,8s est corrigé avec une vitesse de 1500m/s; un autre évènement situé à 2,5sec a été corrigé avec la même vitesse. Sachant que la vitesse augmente avec la profondeur, on en déduit que l'évènement le plus profond (à 4,8sec) ne peut être qu'un multiple.

La courbe d'évolution des valeurs propres (fig. 12) donne un aperçu sur la distribution de l'énergie. Les deux premières valeurs propres représentent un domaine d'énergie (multiple) et le reste des valeurs propres (au-delà de la troisième valeur) représentent un deuxième domaine (Réflexion primaire).

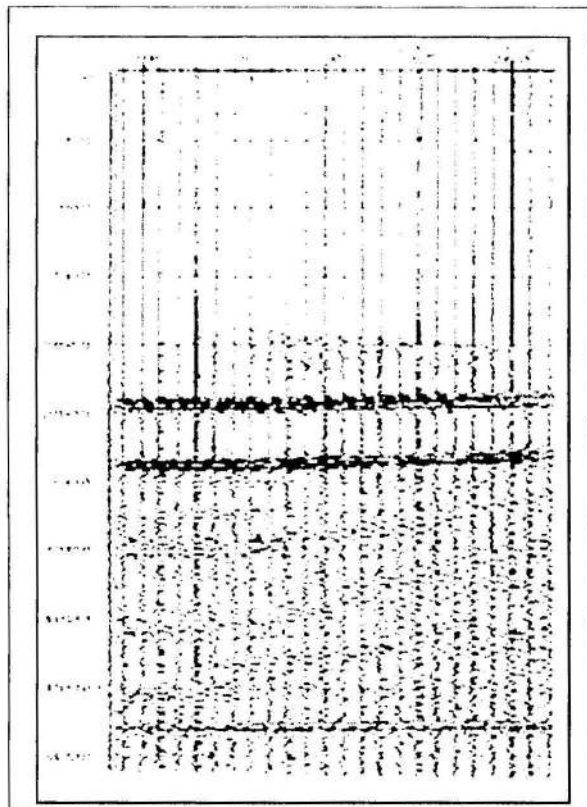


Fig. 11 a - CDP 514 - NMO (V-mult)

CDP - 514 - NMO (V-mult)

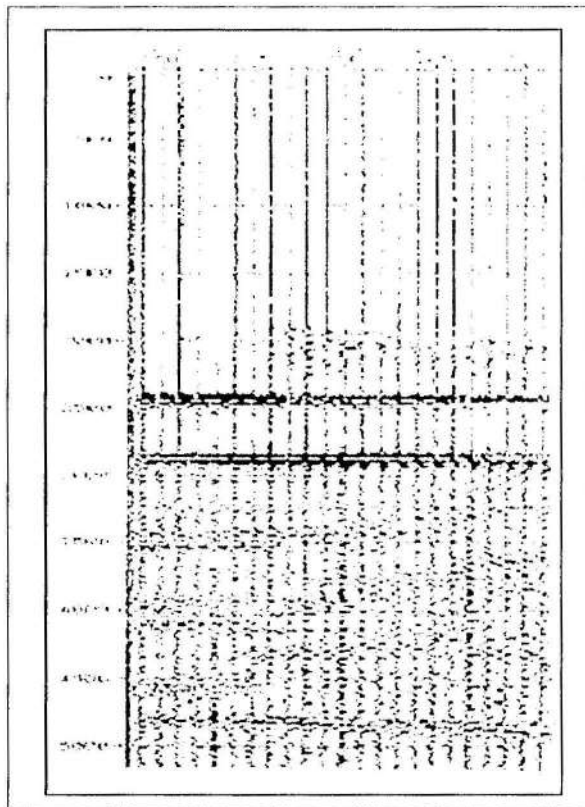


Fig. 11 b - CDP 514 - NMO (V-prim)

CDP 514 - NMO 5 (V-prim)

RECONSTITUTION DES DONNÉES SISMIQUES

La reconstruction des données, après application de la transformation K-L directe, a été faite par toutes les composantes principales sauf les deux premières.

La figure 13a montre le multiple sur la section stack à 4.8s. Les données reconstituées par la T K-L sont représentées sur la figure 13b, laquelle montre à l'évidence une atténuation totale du multiple, situé à 4.8s comparaison faite avec la figure 13a.

CONCLUSION

Les arrivées multiples posent un problème complexe dans le traitement des données sismiques. La Transformation de Karhunen-Loeve de part les avantages qu'elle présente, est l'une des méthodes préconisée pour atteindre cet objectif

Cette technique offre une possibilité d'atténuation de ce type de bruit après confirmation de son existence. La projection de ce type de bruit organisé (le multiple) sur un espace généré dans notre cas pratique par les deux premières

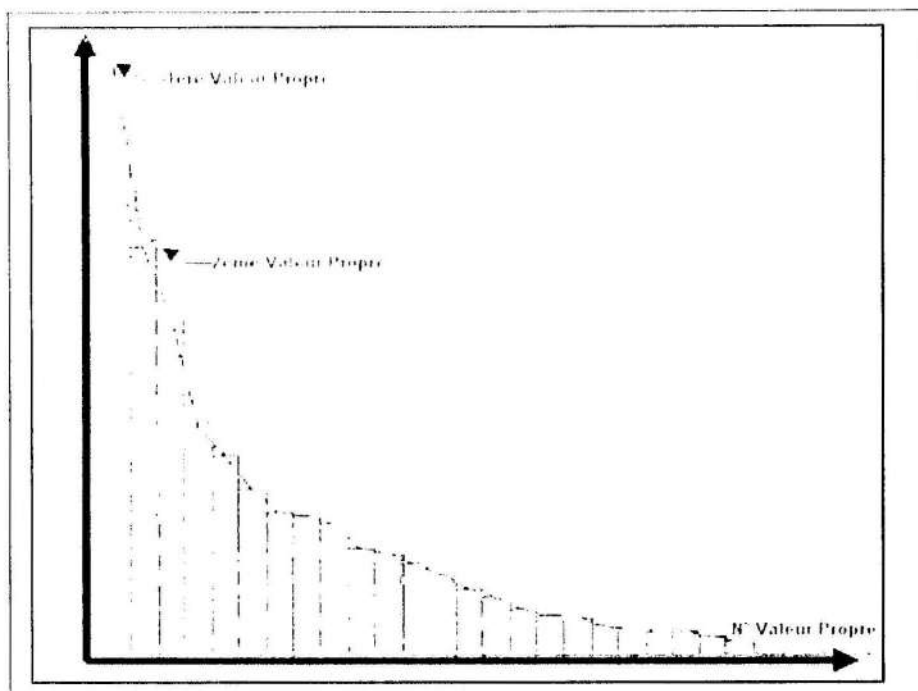


Fig. 12 - Courbe de Distribution des Valeurs Propres
Eigen Values Distribution Curve

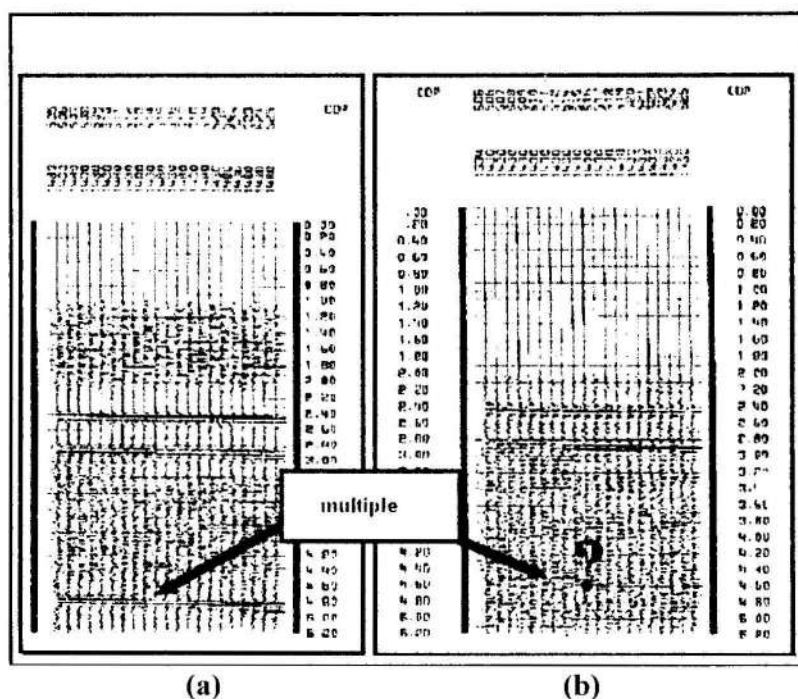


Fig. 13 a - CDP 505 - 525 avant application de la TKL
CDP 505 - 525 before the KLT application

Fig. 13 b - CDP 505 - 525 après application de la TKL
CDP 505 - 525 after the KLT application

composantes principales, permet de scinder l'information sismique en deux sous-espaces en fonction du choix du nombre de composantes principales: un sous-espace signal utile (arrivées primaires) et un sous-espace relié au bruit. Cette opération de filtrage repose donc sur des critères de discrimination fiables et convaincant quant à la séparation de l'information utile de celle à éliminer.

La Transformation de Karhunen-Loeve présente l'avantage d'opérer directement sur les données sismiques brutes, et elle n'exige pas d'opération-échantillonnage car elle ne change pas de domaine. Précisons que cette dernière condition est indispensable pour d'autres méthodes comme le filtrage fréquence-nombre d'onde via la Transformation de Fourier bidimensionnelle, pour laquelle l'apparition du phénomène de repliement de spectre est un inconvénient majeur.

Il ressort, à l'issue du présent travail, que la Transformation de Karhunen-Loeve est à insérer dans la panoplie des méthodes de séparation des champs d'ondes à l'instar de la décomposition spectrale, de la décomposition en valeurs singulières (DVS), de la Transformation de Radon (filtre τ, p) ou encore de la Transformation de Fourier (filtre f, k).

A la différence des autres transformations, la Transformation de Karhunen-Loeve n'opère que sur la matrice des données à filtrer et non sur la matrice associée à une transformation linéaire préalablement construite.

BIBLIOGRAPHIE

- AL-YAHIA, K.M., 1991.** Application of the partial Karhunen-Loeve Transform to suppress Random noise in seismic section. *Geophysical Prospecting*, N°39
- BENCHIKH, M.T. ET DJEDDI, MBRK., 2002.** Utilisation de la K-L combinée avec un filtre de polarisation : application en sismique de surface et en sismique de puits- *Bull. Serv. Geol. de l'Alg.* vol. 13 n°1, pp. 81-92.
- GLANGEAUD, F. ET MARI, J.L., 1993.** Wave séparation, Principe and méthodes. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, Vol.48,N-5.
- GLANGEAUD, F. ET MARI, J.L., 1994.** Wave séparation, Application. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, Vol.49, N-1.
- HADDADI, R.A. AND PARSON, T.W., 1991.** Digital signal Processing theory , application and Hardware. *Computer Science Press New-York*.
- HEMON, T.C. AND MACEL, D., 1978.** Use of the Karhunen-Loeve transform in seismic data processing *Geophysical Prospecting* 260 T-600-626.
- HEMON, CH. ET MACE, D., 1978.** Essai d'application de la transformation de Karhunen-Loeve au traitement sismique. *Geophysical Prospecting*, N° 26.
- MIHOUBI, A., 1999.** Application de la transformation de Karhunen-Loeve dans le traitement sismique Nouvelle technique pour l'atténuation des multiples *Rapport interne Sonatrach- Division Data Control-Boumerdes*.
- OPPENHEIM, A.V., 1978.** Application of Digital Signal Processing-Printice Hall Inc.
- WATANAB, S., 1965.** Karhunen -Loeve expansion and factor analysis theoretical remarks and applications- in proc. 4th Prague Conference inform. theory.