



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Chabab Abdenour

Ouarnoughi Abdelkader

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Hydrocarbure

OPTION : Génie gazier

Thème

Traitement des données sismiques

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
YOUCEFI Mohammed Riad	MCB	Président
MERIGUI Khaled	MAA	Examinateur
ABED MOEZ Ahmed	MCB	Examinateur
HADJADJ Asma	MCB	Rapporteur

Année Universitaire : 2022-2023

Remerciement

Toute notre gratitude et remerciements vont à ALLAH le tout puissant pour nous avoir gardés en bonne santé et nous avoir donné force, patience, courage et volonté pour bien mener et achever ce modeste travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à nos chers parents et familles pour leurs prières, leur encouragement et leur patience tout au long de notre parcours. Toute notre profonde reconnaissance et nos vifs remerciements à notre promoteur Pr.HADJAJ Asma Pour les précieux moments de discussion; il nous gardait, pour sa confiance, sa disponibilité, Sa confiance, sa disponibilité, son soutien et son aide illimités nous ont permis de tenir jusqu'à la toute dernière minute au fur et à mesure que cette entreprise évoluait, et ses précieux conseils et ses commentaires pertinents nous ont maintenus sur la bonne voie réalisation de ce projet.

Nous remercions vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre Modeste travail.

Nous tenons à remercier; ensemble des enseignants de; université Amar Teliidji - Laghouat.

Enfin, nos sincères reconnaissances et gratitudes à toute personne qui a contribué de près

Ou de loin au bon déroulement de ce travail, sans oublier nos camarades de génie des procédés

Dédicace

Je dédie ces modes de travail à La prunelle de mes yeux "ma mère"

Affable, honorable, aimable

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessés de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte, Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A mon Père, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon

éducation et ma formation. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé et longue vie

Ainsi toute personne qui porte le nom CHABAB

A mon binôme et ami OUARNOUGHI et à toute sa famille, pour leurs soutiens, accueil et tendresses.

Dédicace

Je dédie ces modes de travail à La prunelle de mes yeux "ma mère"

Affable, honorable, aimable

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessés de me Donner de puis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte, Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants Suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Amon Père, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit Pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon

Éducation et ma formation. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé et longue vie

Ainsi toute personne qui porte le nom OUARNOUGHI

Amon binôme et ami CHABAB et à toute sa famille, pour leurs soutiens, accueil set tendresse

Résumé

L'objectif principal du traitement de l'image sismique verticale est de séparer les champs d'ondes ascendantes et descendantes. Il existe plusieurs façons. Cette étude présente deux techniques de filtrage : le filtre médian et le filtre (f-k). Le filtre médian a donné de bons résultats par rapport au filtre (f-k). Il permet une excellente séparation des ondes montantes et descendantes d'un profil sismique vertical et offre plusieurs avantages : il ne nécessite pas un pas d'échantillonnage régulier, il atténue automatiquement les bruits et il offre une bonne séparation des ondes en fonction de la longueur de la fenêtre choisie. Cependant, il ne conserve pas exactement les amplitudes.

En ce qui concerne le filtrage par l'algorithme (f-k), il permet également une bonne séparation des ondes montantes et descendantes d'un profil sismique vertical. Il présente les avantages suivants : il ne nécessite pas l'horizontalisation préalable des ondes, il atténue automatiquement les bruits et donne de bons résultats en termes de séparation des ondes. Cependant, il a les inconvénients suivants : il nécessite un pas d'échantillonnage constant et ne conserve pas exactement les amplitudes.

La trace somme obtenue avec le filtre médian présente une forte corrélation avec la sismique de surface par rapport à celle obtenue avec le filtre (f-k). On peut y identifier la majorité des horizons sismiques, ce qui facilite l'interprétation des données sismiques.

Ce travail a permis d'approfondir les connaissances en traitement des données sismiques et en informatique, et conduit à quelques recommandations intéressantes, notamment l'application de ces filtres sur des sections PSVO.

Abstract

The main purpose of vertical seismic image processing is to separate up- and down-wave fields. There are several ways. This study presents two filtering techniques: the median filter and the (f-k) filter. The median filter performed well compared to the (f-k) filter. It provides excellent separation of up and down waves from a vertical seismic profile and offers several advantages: it does not require a regular sampling pitch, it automatically attenuates noise and it offers good wave separation as a function of length. of the selected window. However, it does not exactly preserve the amplitudes.

With regard to the filtering by the (f-k) algorithm, it also allows a good separation of the upgoing and downgoing waves of a vertical seismic profile. It has the following advantages: it does not require prior horizontalization of the waves, it automatically attenuates noise and gives good results in terms of wave separation. However, it has the following disadvantages: it requires a constant sampling step and does not preserve the amplitudes exactly.

The sum trace obtained with the median filter shows a strong correlation with the surface seismic compared to that obtained with the (f-k) filter. The majority of seismic horizons can be identified there, which facilitates the interpretation of seismic data.

This work has made it possible to deepen knowledge in seismic data processing and computer science, and led to some interesting recommendations, in particular the application of these filters on PSVO sections.

ملخص

تقدم هذه الدراسة طريقتين للتصفية: المرشح المتوسط والمرشح (f-k). كان أداء المرشح المتوسط جيداً مقارنةً بالفلتر (f-k). إنه يوفر فصلاً ممتازاً للموجات الصاعدة والسفلية عن المظهر الجانبي الزلزالي العمودي ويوفر العديد من المزايا: فهو لا يتطلب درجة أخذ عينات منتظمة، فهو يخفف تلقائياً من الضوضاء ويوفر فصلاً جيداً للموجة كدالة لطول النافذة المحددة. ومع ذلك، فإنه لا يحافظ بالضبط على السعات.

فيما يتعلق بالترشيح بواسطة خوارزمية (f-k)، فإنه يسمح أيضاً بفصل جيد للموجات الصاعدة والهابطة للملف الجانبي الزلزالي العمودي. لها المزايا التالية: لا تتطلب أفقياً مسبقاً للموجات، فهي تخفف تلقائياً من الضوضاء وتعطي نتائج جيدة من حيث فصل الموجة. ومع ذلك، فإن لها العيوب التالية: تتطلب خطوة أخذ عينات ثابتة ولا تحافظ على السعات بالضبط.

يظهر تتبع المجموع الذي تم الحصول عليه باستخدام المرشح المتوسط ارتباطاً قوياً بالزلازل السطحي مقارنةً بتلك التي تم الحصول عليها باستخدام مرشح (f-k). يمكن تحديد غالبية الأفاق الزلزالية هناك، مما يسهل تفسير البيانات الزلزالية.

أدى هذا العمل إلى تعميق المعرفة في معالجة البيانات الزلزالية وعلوم الكمبيوتر، وأدى إلى بعض التوصيات المثيرة للاهتمام، بما في ذلك تطبيق هذه المرشحات على أقسام PSVO.

Sommaire

Introduction générale	1
 I. CHAPITRE I : Méthodes de séparation d'ondes en sismique	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les profils sismiques verticaux.....	4
I.2.1. Le profil sismique vertical standard	4
I.2.2. Le profil sismique déporté ou à offset.....	5
I.2.3. Le profil sismique à offset variable.....	5
I.3. Le profil sismique vertical à déport nul ou standard (PSV).....	6
I.3.2..Les différents types d'ondes enregistrées	7
I.3.2.1. Ondes de volume	7
I.3.2.2.Ondes de câble et ondes de tube	10
I.3.3. Traitement des données.....	11
I.3.3.1 Prétraitement	11
I.3.3.2.Séparation des ondes	12
I.3.3.3.Traitement de l'imagerie sismique	13
I.3.4. Principales applications.....	15
I.4. Conclusion.....	15
 II. CHAPITRE II : Filtre médian	
Introduction.....	16
II.1. Filtre médian.....	16
II.1.2. Application à la séparation des champs d'ondes en sismique de puits.....	17
II .2. Algorithme et programmation	19
Organigramme du filtre médian.....	20
II.3.1. Séparation sur des données PSV synthétiques	21
II.3.1. 2. Séparation des champs d'ondes montant et descendant par filtre médian.....	23
Conclusion	26
 CHAPITRE III : Filtre (f,k)	
Introduction.....	27
III.1. Filtre (f-k)	27
III.1.1.Rappels théoriques sur la transformation de Fourier à deux dimensions (f, k).....	27
III.1.2. Filtrage dans le domaine (f, k)	28
Organigramme du filtre (f-k)	31
III.2. Séparation des champs d'ondes montant et descendant par filtre (f-K).....	32
III.3.Comparaison des résultats obtenus	35

CHAPITRE VI : Séparation d'ondes par les filtres médian et (f-k)

IV.1 Présentation des données PSV réelles utilisées	37
IV.2.Séparation des champs d'ondes montant et descendant par le filtre médian	40
IV.3. Séparation des champs d'ondes montant et descendant par le filtre (f-k).....	43
IV.4. Comparaison des résultats obtenus.....	45
IV.5. Calage avec la section sismique de surface.....	48
Conclusion Generale	50

LISTE DE FIGURE

- Figure I.1 :** Différentes mises en oeuvre possibles de la sismique sur un gisement [1]
- Figure I.2 :** Profil sismique à offset nul – PSV [1]
- Figure I.3 :** Profil sismique à offset [1]
- Figure I.4 :** Profil sismique walkaway [1]
- Figure I.5 :** Phénomène de conversion des ondes [17]
- Figure I.6 :** Evénements descendants [28]
- Figure I.7 :** Evénements montants [28]
- Figure I.8 :** Les différents évènements observés dans un PSV [8]
- Figure I.9 :** Enregistrement PSV avec présence d'ondes de tube[8]
- Figure I.10 :** Exemple d'enregistrement PSV ; données brutes après prétraitement [14]
- Figure I.11 :** Séparation d'ondes. (a) Champ d'ondes montant horizontalisé et (b) Champ d'ondes descendant horizontalisé, extraits de l'enregistrement PSV de la figure I.10 [14]
- Figure I.12 :** Ondes montantes (Fig.I.11a) déconvoluées et horizontalisées [14]
- Figure I.13 :** Corridor stack. (a) Choix du couloir ; (b) Film PSV [14]
- Figure II.1 :** Exemple de filtrage (lissage) d'une fonction par le filtre médian (L=5) [17]
- Figure II.2 :** Extraction des ondes montantes par filtre médian : (a) PSV original ;(b) Horizontalisation des ondes M ;(c) Ondes M alignées extraites par filtrage médian ; (d) OndesM désalignées. [17]
- Figure II.3 :** Filtre médian opérant le long de lignes de temps fixes. [17]
- Figure II.4 :** Modèle géologique considéré pour la génération des données sismiques synthétiques de type PSV.
- Figure II.5 :** Ondelette de Ricker avec une fréquence centrale $\sigma = 25$ Hz.
- Figure II.6 :** Données synthétiques PSVS : (a) Enregistrement PSVS correspondant à la réponse du modèle géologique à trois couches de la figure II.4 ; (b) Image en niveau de gris correspondante
- Figure II.7 :** Extraction des ondes montantes du PSVS par filtrage médian (L=7) : (a) Enregistrement PSVS ; (b) Enregistrement PSVS avec horizontalisation des ondes montantes ; (c) Ondes montantes horizontalisées extraites avec un filtre médian de longueur L=7 ; (d) Ondes montantes extraites

Figure II.8 : Extraction des ondes descendantes du PSVS par filtrage médian ($L=7$) : **(a)** Enregistrement PSVS ; **(b)** Enregistrement PSVS avec horizontalisation des ondes descendantes ; **(c)** Ondes descendantes horizontalisées extraites avec un filtre médian de longueur $L=7$; **(d)** Ondes descendantes extraites.

Figure III.1 : Filtres Fréquence-Nombre d'onde ($f-k$) [9]

Figure III.2 : Procédure d'extraction des ondes montantes par filtrage ($f-k$) : **(a)** PSV original avec les ondes montantes (M) et descendantes (D) ; **(b)** PSV dans le domaine (f, k) ; **(c)** PSV dans le domaine (f, k) après application du gabarit ; **(d)** Champ d'ondes M extrait. [9]

Figure III. 3 : Extraction des ondes montantes du PSVS par filtrage ($f-k$) : **(a)** Enregistrement PSVS ; **(b)** Domaine (f, k) associé ; **(c)** Mise à zéro des coefficients correspondant aux ondes descendantes ($0 \leq k \leq 0.05$) ; **(d)** Ondes montantes extraites.

Figure III. 4 : Extraction des ondes descendantes du PSVS par filtrage ($f-k$) : **(a)** Enregistrement PSVS ; **(b)** Domaine (f, k) associé ; **(c)** Mise à zéro des coefficients correspondant aux ondes montantes ($-0.05 \leq k \leq 0$) ; **(d)** Ondes descendantes extraites.

Figure III.5 : Comparaison des résultats obtenus sur le PSVS – Ondes montantes : **(a)** Enregistrement PSVS initial ; **(c)** Ondes montantes extraites par filtre médian ($L=7$) ; **(d)** Ondes montantes extraites par filtrage ($f-k$) ($0 \leq k \leq -0.005$).

Figure VI.1 : Schéma synoptique de la sonde et dispositif d'acquisition du PSV.

Figure VI.2 : Enregistrement PSV réel : **(a)** Composante verticale V_z en fonction de la profondeur ; **(b)** Composante verticale V_z après prétraitement ; **(c)** Composante horizontale H_x ; **(d)** Composante horizontale H_y .

Figure VI. 3 : Extraction des champs d'ondes montant et descendant de la composante V_z du PSV réel par filtre médian : **(a)** Enregistrement de la composante V_z avec alignement des ondes montantes ; **(b)** Ondes montante extraites par filtre médian ($L=7$) ; **(c)** Ondes montantes extraites désalignées ; **(d)** Ondes descendantes extraites par soustraction des ondes montantes désalignées de l'enregistrement de la composante V_z initiale.

Figure VI. 4 : Enregistrement en ondes montants extraites de la composante V_z du PSV réel par filtre médian (à gauche) et le corridor stack correspondant (à droite). La ligne blanche sur l'enregistrement délimite le couloir de sommation.

Figure VI.5 : Extraction des champs d'ondes montant et descendant de la composante V_z du PSV réel par filtre ($f-k$) : **(a)** Enregistrement V_z initial ; **(b)** Représentation correspondante dans le plan (f, k) ; **(c)** Ondes montantes extraites après filtrage avec ($-0.025 \leq k \leq 0$); **(d)** Ondes descendant extraites après filtrage avec ($0 \leq k \leq 0.025$).

Figures VI. 6 : Enregistrement en ondes montants extraites de la composante V_z du PSV réel par filtre ($f-k$) (à gauche) et le corridor stack correspondant (à droite). La ligne blanche sur l'enregistrement délimite le couloir de sommation.

Figure VI.7 : Comparaison des résultats obtenus sur l'enregistrement PSV réel : **(a)** Ondes

montantes alignées extraites du PSV réel par filtre médian ($L=7$) ; (c) Ondes montantes alignées extraites du PSV réel par filtrage (f-k) ($0 \leq k \leq 0.025$).

Figure VI.8 : Effets des filtrages médian et (f-k) sur les spectres de fréquences. Exemple de la trace 50 - Enregistrement et spectre correspondant de : **(a)** Trace 50 du PSVS Fig.II.6a ; **(b)** Trace 50 du champ d'ondes montant Fig.II.8d extrait par filtrage médian ($L=7$) ; **(c)** Trace 50 du champ d'ondes montant Fig.III.3d extrait par filtrage (f-k).

Figure VI. 9 : Section sismique de surface passant par le puits où est réalisé le PSV réel considéré dans cette étude.

Figure VI. 10 : Calage des corridors stacks obtenus par les deux méthodes de séparation d'ondes sur la composante Vz du PSV réel et identification des horizons sur la section sismique passant par le puits d'acquisition du PSV au CDP 273

Liste des symboles

PSV: profile sismique vertical

PSVs : profile sismique vertical synthétiques

PSO : profile sismique oblique

INTRODUCTION GENERAL

Une section sismique comporte un certain nombre d'information véhiculées par les signaux émis dans le sous-sol et reçus sur diverses traces. A chaque trajet, peut être associé une onde ayant des caractéristiques spécifiques, évaluées par des paramètres, comme par exemple le temps d'arrivée et l'amplitude.

Quand plusieurs ondes interfèrent ou quand le rapport signal sur bruit (S/B) des données est faible, l'interprétation et le suivi d'une arrivée sismique sont difficiles. Ils convient donc d'améliorer le rapport S/B ou séparer les diverses ondes. Le but de traitement sismique consiste à identifier et à séparer ces différentes ondes, et réduire au strict minimum les différents bruits enregistrés afin d'aboutir à une meilleure image de sous-sol.

Pour cela, il existe plusieurs techniques dont les concepts différents. C'est dans cette optique que s'inscrit notre étude qui a pour objectif de détailler le principe de fonctionnement des algorithmes médian et (f-k) dans la séparation d'un enregistrement sismique.

Pour examiner la performance de ces algorithmes, nous avons réalisé une étude sur des données synthétiques bruitées. Notre mémoire s'articule, par conséquent, autour de quatre chapitres ; le premier consiste en une des généralités sur le profil sismique vertical. Le second et le troisième sont consacrés au développement des techniques de séparation d'onde en sismique par les filtres médian et (f-k)), test de ces algorithmes sur des données synthétiques. Le chapitre porte sur l'application du filtre. Le quatrième chapitre porte sur l'application de ces algorithmes que nous avons élaborés sur des données réelles et nous allons comparées les résultats obtenus. Une dernière partie permet de calculer le corridor stack obtenus par les deux filtres dans le bus de caler avec la sismique de surface.

Nous finirons cette étude par une conclusion.

Ce chapitre présente de manière succincte les procédures utilisées en sismique de puits et les différentes façons de les mettre en œuvre. La sismique de puits est la méthode géophysique prédominante pour différencier les structures situées sous la surface. La première partie de ce chapitre explique le principe de base ainsi que les différentes approches possibles. La deuxième partie se concentre sur le profil sismique vertical ;(PSV) standard. Elle décrit sa mise en œuvre ainsi que les différentes ondes enregistrées lors de sa collecte, les traitements associés et ses multiples applications. Ce type de profil offre une résolution élevée qui améliore l'interprétation structurelle et stratigraphique de la sismique de surface, ainsi que la caractérisation des réservoirs.

I.1. Introduction

La sismique repose sur le principe fondamental de générer des vibrations dans le sous-sol afin de produire des ondes. L'enregistrement sismique consiste à enregistrer la réponse temporelle du sous-sol à ces vibrations. Cela est réalisé à l'aide d'un capteur, tel qu'un géophone sismique terrestre ou un hydrophone sismique marin, qui mesure le signal sismique qui traverse le sous-sol dans une direction prédéfinie.[1]

Les différentes façons de mettre en œuvre la méthode sismique, à l'exception de la sismique réfraction, sont illustrées dans la figure. I.1

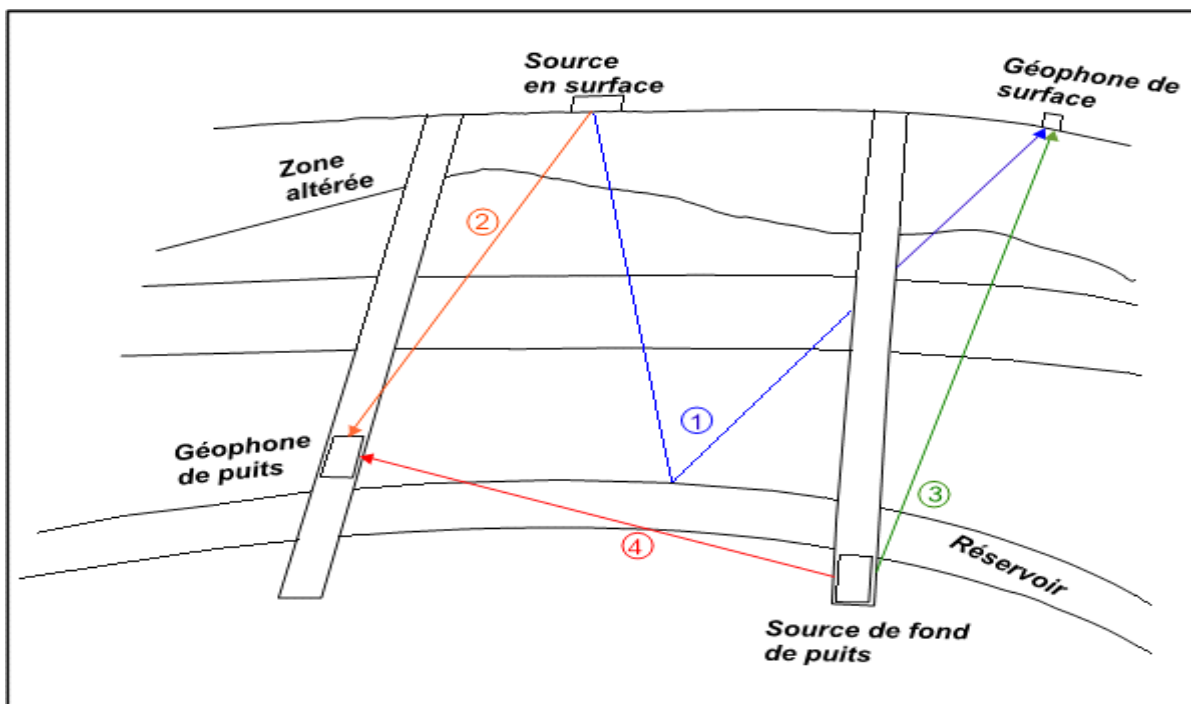


Figure I.1 : Différentes mises en oeuvre possibles de la sismique sur un gisement [1]

Ainsi, on distingue :

1) la sismique de surface : La méthode sismique est largement préférée pour analyser les structures géologiques situées en sous-sol. Elle permet d'obtenir une représentation en deux ou trois dimensions, semblable à une échographie. (Trajet 1 sur la figure I.1),

2) **la sismique de puits** : La méthode est employée pour améliorer la compréhension du gisement lors de la phase d'exploration, mais elle peut également être utilisée pendant la phase d'exploitation grâce à la sismique répétitive, permettant ainsi de suivre l'évolution du gisement au fil du temps..

Trois types de sismique de puits sont distingués :

- tir en surface avec récepteur dans le puits (PSV) (trajet 2 sur la figure I.1),
- tir en puits avec récepteur en surface (PSV inverse) (trajet 3 sur la figure I.1),
- tir en puits avec récepteur dans un autre puits (trajet 4 sur la figure I.1).

I.2. Les profils sismiques verticaux

Le PSV est une opération de la sismique de puits pour laquelle un signal est émis à la surface du sol et est enregistré par un géophone situé successivement à différentes profondeurs dans le puits. L'ensemble des champs d'ondes sismiques acquis, enregistré en fonction de la profondeur, est de haute résolution verticale, la zone altérée étant traversée une seule fois.

On distingue principalement les PSVs à offset nul ou PSV standard, les PSVs avec offset ou profils sismiques obliques (PSOs) et enfin les PSVs walkaway (ensemble de PSO). [1]

I.2.1. Le profil sismique vertical standard

Dans le cas du PSV standard, appelé communément PSV tout court, l'offset est négligeable par rapport à la profondeur de l'objectif. La source est très faiblement déportée par rapport à la tête de puits, et le trajet de l'onde est presque vertical (faible angle d'incidence). Dans le cas d'un puits dévié, la source prend des positions variables de telle sorte à préserver le couple

émetteur-récepteur sur la même verticale (Fig. I.2). Le PSV doit être considéré comme une diagraphie acoustique aux fréquences sismiques, dont la résolution latérale est limitée au diamètre de la première zone de Fresnel. L'investigation latérale est égale à la résolution latérale, dans la mesure où les pendages sont faibles ou lorsque le puits est foré perpendiculairement aux couches.

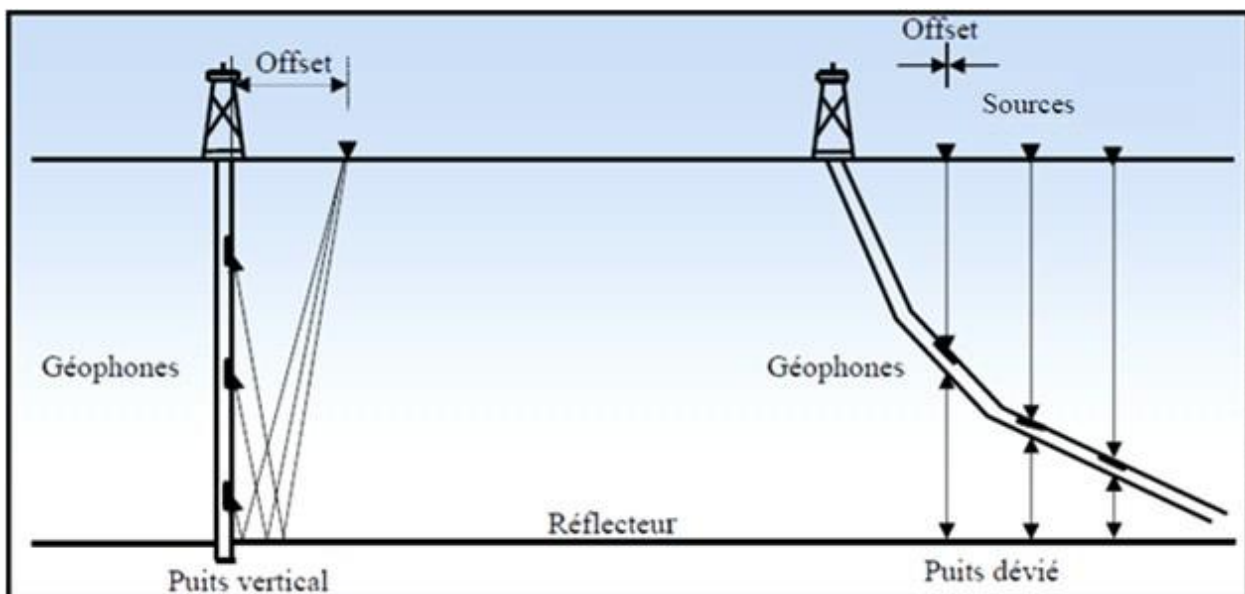


Figure I.2 : Profil sismique à offset nul - PSV [1]

Le PSV à déport nul permet d'obtenir une trace sismique réelle, de très haute résolution, directement comparable à la section sismique de surface passant par le puits.

I.2.2. Le profil sismique déporté ou à offset

Une façon d'augmenter l'investigation latérale du PSV consiste à déporter la source par rapport au puits, on parle alors d'un PSO. Le PSO est donc un PSV avec un offset important

(Fig.I.3). Le choix de l'offset dépend de l'objectif géologique des structures situées au voisinage du puits. Cependant, il est important de rester dans l'hypothèse des angles d'incidence inférieurs à 30° afin d'être dans l'hypothèse des angles d'incidence normale (quasi verticale) sur les réflecteurs. Cet offset est pris inférieur ou égal au $\frac{3}{4}$ de la profondeur de l'objectif à atteindre. De plus, les enregistrements PSO prennent en considération les trois composantes de l'espace (Hx, Hy, Z) contrairement au PSV standard qui ne s'intéresse qu'à la composante verticale (Z).

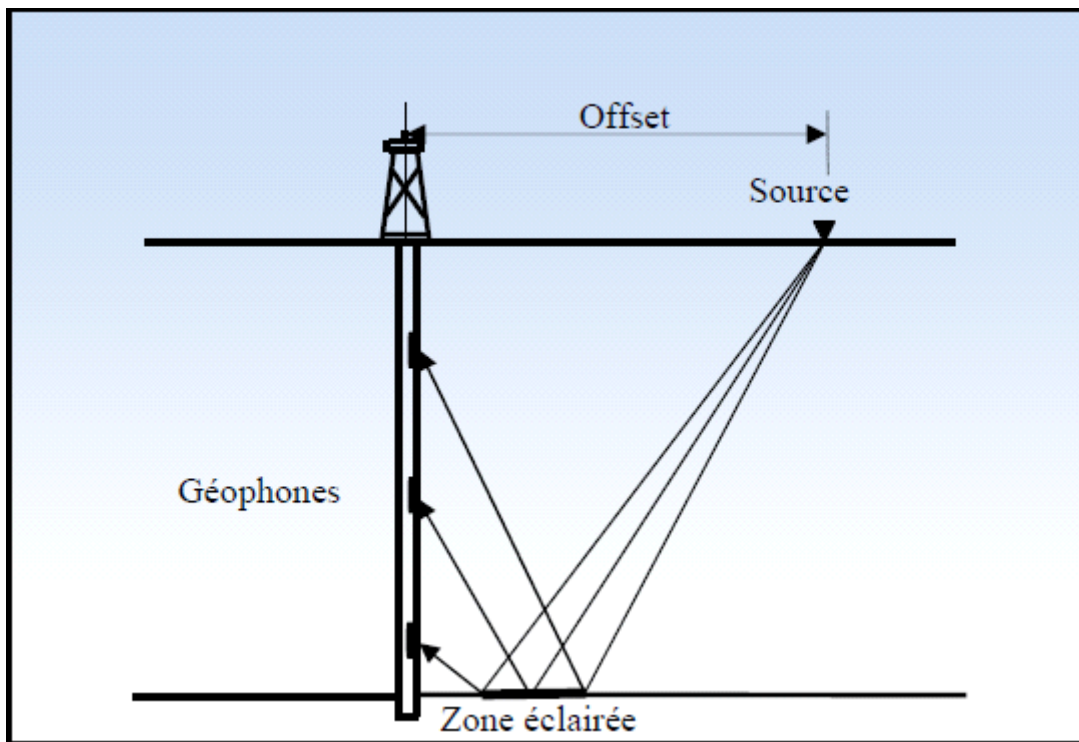


Figure I.3 : Profil sismique à offset [1]

L'image obtenue après traitement est une section sismique en couverture simple, de haute résolution. Le PSO fournit des informations importantes pour une meilleure compréhension de la géométrie des horizons géologiques et des failles et donne des détails sur le plan de fluctuation et l'estimation ou caractérisation du réservoir. Ces informations peuvent ensuite aider les explorateurs pour la suite du développement des champs pétroliers.

I.2.3. Le profil sismique à offset variable

Une ballade sismique, ou PSV walkaway, est un ensemble de PSV à offset dont la source occupe successivement plusieurs positions correspondant à des déports croissants par rapport à la gueule du trou (Fig. I.4), et donc une investigation latérale importante. Dans cette mise en oeuvre, le nombre de positions du géophone de puits est généralement réduit par rapport à celui utilisé en PSV classique.

L'image obtenue après traitement est une section en couverture multiple.

Il existe d'autres versions de ce type de profil, comme le walkaround pour lequel la source est placée à différents azimuts. Il est utilisé tout particulièrement dans la mise en évidence de la fracturation naturelle tout autour du puits.

Le Walkaway est un outil performant qui, en plus des applications que peut fournir un PSO, fournit des informations stratigraphiques sur les réservoirs, détermine les pendages, localise les failles, permet d'améliorer l'analyse de vitesse pour le traitement sismique de surface et donne des informations sur les réflecteurs situés en dessous du puits. Il aide ainsi les opérateurs à affiner leur plan de forage et à maximiser les possibilités de récupération des hydrocarbures.

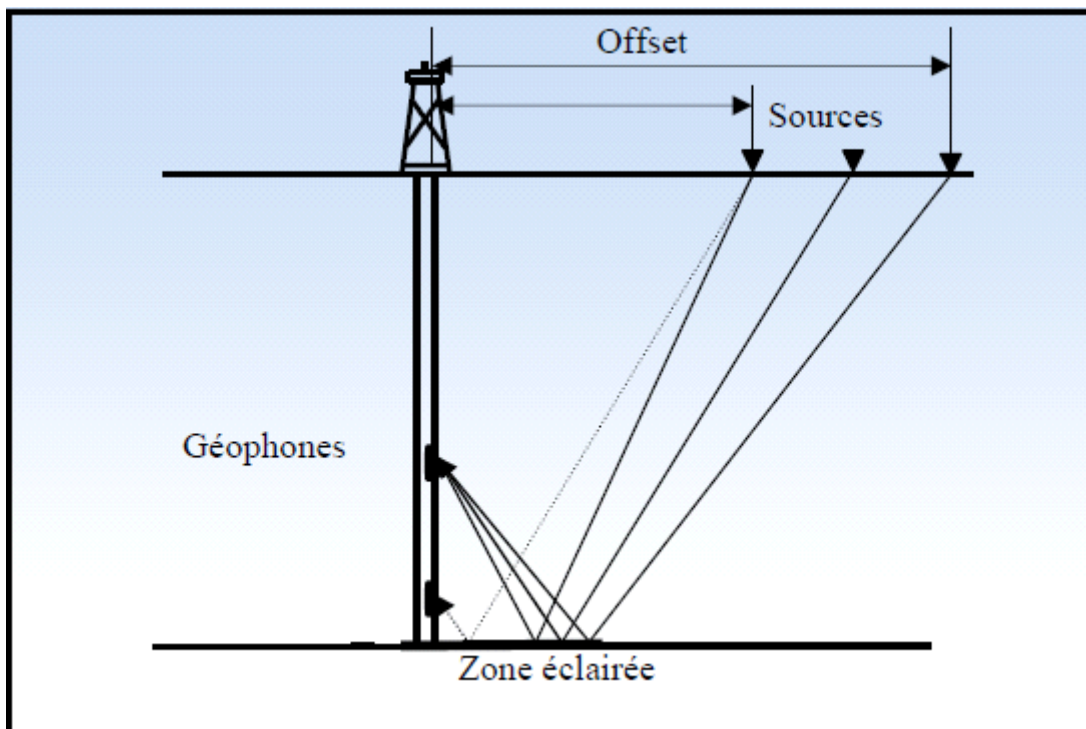


Figure I.4 : Profil sismique walkaway [1]

I.3. Le profil sismique vertical à déport nul ou standard (PSV)

I.3.1. Principe et mise en oeuvre

Le PSV standard consiste en la descente d'un capteur acoustique, régulièrement positionné dans le puits, afin d'enregistrer le train d'ondes provenant d'une série de tirs activés en surface [2]

La mise en oeuvre d'un PSV nécessite un puits, un câble avec un treuil, une source sismique, un système de réception et un laboratoire d'enregistrement sismique.

Le puits peut avoir plusieurs milliers de mètres de profondeur. Il peut être parfaitement cimenté et tubé, avec un tubage unique sur toute la hauteur du puits, ou non tubé. Un puits parfaitement cimenté et tubé doit en principe rendre constant le couplage du géophone de puits avec la formation.

Le câble utilisé généralement est le câble classique à sept conducteurs, aussi utilisé par les diagraphistes. Son rôle consiste à assurer la descente et la remontée de la sonde dans le puits. Il assure aussi la liaison électrique entre le système de réception et le laboratoire d'enregistrement et permet également de mesurer la profondeur de la sonde dans le puits.

La source sismique doit avoir la même signature et doit être de faible énergie. Différentes sources existent dont les plus usuelles sont la dynamite, le canon à air et le vibreur.[3]

Le système de réception peut être un géophone, de préférence à 3 composantes. Il doit être conçu pour minimiser les effets des ondes de tube et assurer le meilleur couplage avec la paroi du puits.

Le laboratoire sismique doit avoir des performances comparables à celles du laboratoire utilisé en sismique de surface.

I.3.2. Les différents types d'ondes enregistrées

Un enregistrement PSV est composé de deux types d'ondes, les ondes de volume et les ondes liées au fait que l'acquisition se fait dans un puits (ondes de câble et ondes de tube).

I.3.2.1. Ondes de volume

a) Rappels :

Dans un milieu infini, homogène et isotrope, deux ondes se propagent; la plus rapide est appelée onde P, ou onde primaire ou de compression. [4]

Le sens de vibration des particules est parallèle à l'axe de propagation.

La seconde onde est appelée onde S ou onde secondaire ou de cisaillement ; le déplacement des particules est perpendiculaire à l'axe de propagation, d'où le terme d'onde de cisaillement. L'onde de cisaillement se décompose en deux types :

- **les ondes S verticales (SV)** : le mouvement des particules se fait dans le plan vertical perpendiculaire au sens de propagation,

- **les ondes S horizontales (SH)** : le mouvement des particules se fait dans le plan horizontal perpendiculaire au sens de propagation.

Dans le cas d'un angle d'incidence important (supérieur à 30°), en plus des réflexions et des transmissions du signal sismique, s'ajoutent d'autres événements réfléchis et transmis. Ce phénomène est appelé conversion des ondes sismiques. La figure I.5 nous montre la conversion des ondes P et Sv :

- une onde P donne naissance à deux ondes réfléchies P et SV et deux ondes transmises P et SV,

- une onde SV donne naissance à deux ondes réfléchies P et SV et deux ondes transmises P et

SV, L'onde SH est la seule onde qui ne se convertit pas.

Dans notre cas (PSV zéro offset), l'onde émise en surface atteint les réflecteurs sous une incidence normale. On n'observe donc pas de phénomènes de conversion aux réflecteurs.

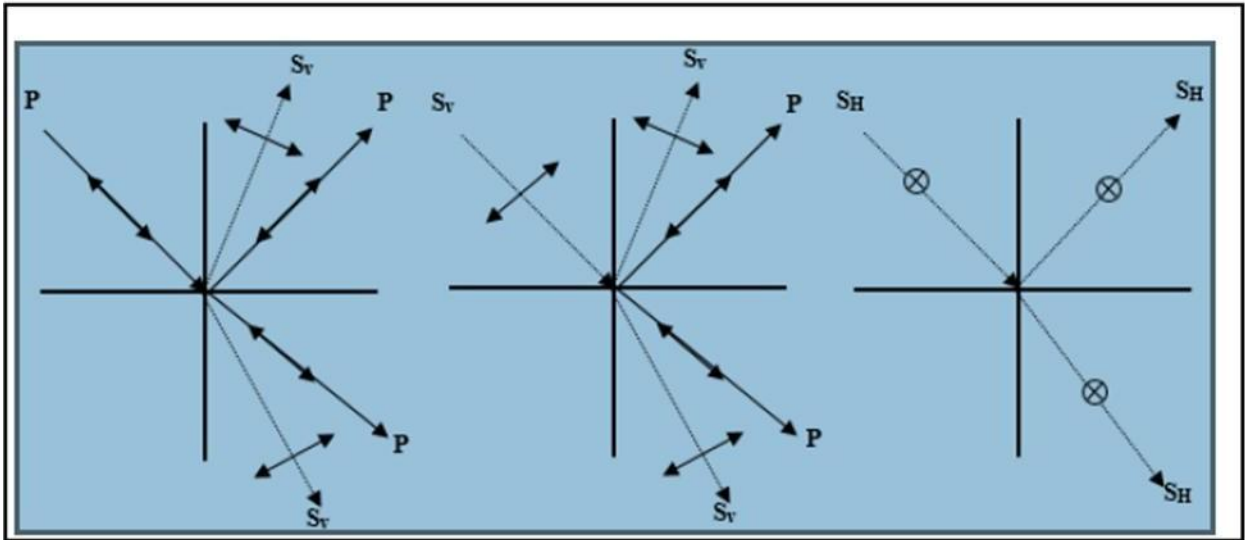


Figure I.5 : Phénomène de conversion des ondes [16]

b) Les événements enregistrés :

En sismique conventionnelle, le champ d'ondes enregistrées est composé des ondes directes et du champ d'ondes montant, tandis que le PSV enregistre en plus le champ d'ondes descendant.

• Champ d'ondes descendant

Il regroupe les arrivées directes et les multiples descendants. Ces ondes sont caractérisées par leurs vitesses apparentes positives (Fig.I.6). [5]

Les ondes directes sont les ondes qui atteignent directement les différentes positions du géophone par le haut sans subir de réflexion et les multiples descendants sont des ondes qui ont subi plus d'une réflexion. Ils atteignent le géophone par le haut (Fig.I.6).

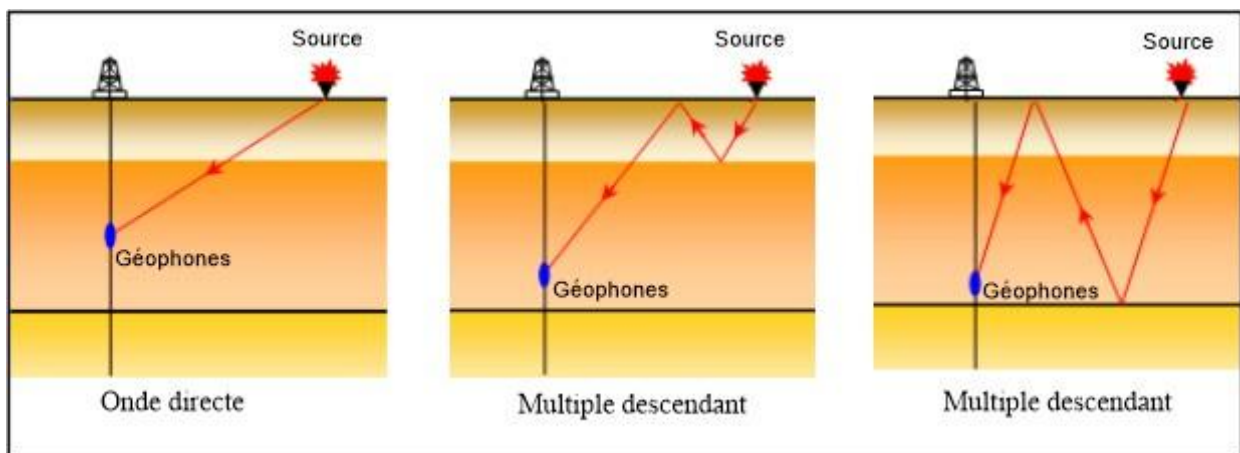


Figure I.6 : Evénements descendants [25]

Pour remonter des temps de transit des ondes descendantes à ceux de la sismique de surface, il suffit de retrancher les temps des arrivées directes, opération qui horizontalise les événements descendants sur l'enregistrement PSV.

• **Champ d'ondes montant**

Il regroupe les réflexions primaires et les multiples montants.

Ces ondes sont caractérisées par leurs vitesses apparentes négatives (Fig. I.7).

Les réflexions primaires atteignent le géophone par le bas après avoir subi une seule réflexion sur les différents horizons du sous-sol et les multiples montants sont des ondes qui ont subi plus d'une réflexion. Ils sont créés par des marqueurs sismiques situés en-dessous du géophone de puits. Ils atteignent la sonde par le bas.

Pour remonter des temps de transit des ondes montantes à ceux de la sismique de surface, il suffit, cette fois d'ajouter les temps des arrivées directes, et cette opération horizontalise les événements montants sur l'enregistrement PSV. [6]

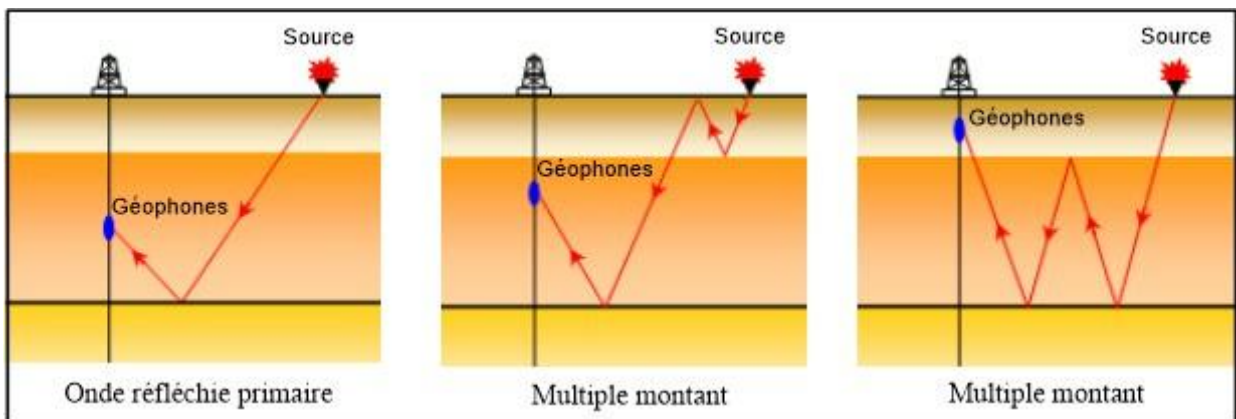


Figure I.7 : Evénements montants [25]

La figure I.8 présente un enregistrement PSV synthétique pour un modèle à deux couches reposant sur un substratum infini. Seules les réflexions montantes primaires intersectent les arrivées directes.

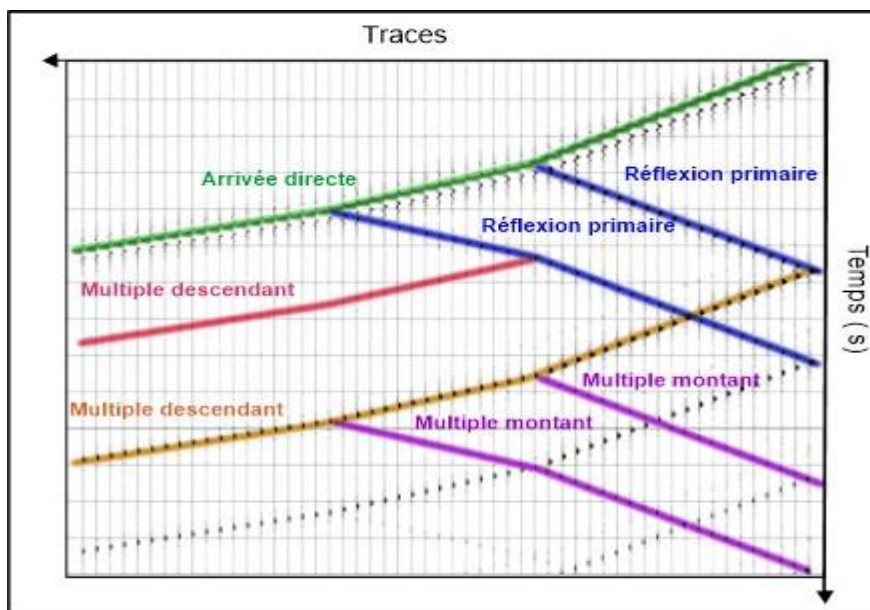


Figure I.8 : Les différents évènements observés dans un PSV [8]

I.3.2.2. Ondes de câble et ondes de tube

- Les ondes de câble

Les vibrations du câble provoquées, par exemple, par le vent donnent naissance à une onde qui excite le géophone de puits et provoque un fort niveau de bruit sur le PSV. Une façon simple de l'atténuer consiste à ancrer le géophone à la paroi et à donner du mou au câble.

- Les ondes de tube

Quand le milieu n'est pas homogène et isotrope, d'autres ondes apparaissent et se propagent le long des surfaces. Ces ondes sont appelées ondes de surfaces ou ondes guidées. Ces ondes se propagent dans les couches superficielles et par conséquent ne contiennent pas d'information sur les structures géologiques profondes que l'on souhaite identifier. Comme ces ondes sont très énergétiques, elles ont tendance à gêner l'interprétation des données sismiques en contexte pétrolier. Ce sont, pour la plupart, des ondes de Rayleigh qui constituent la source principale des ondes de tube. Ces ondes, générées par la source, excitent la colonne de boue lorsqu'elles atteignent le puits et donnent naissance aux ondes de tube qui, une fois créées, se propagent dans le puits vers le haut et vers le bas, perturbant ainsi les enregistrements sismiques (Fig.I.9).[7]

Le PSV de la figure I.9 montre un fort niveau d'ondes de tube notées TW1 à TW6. Les ondes de surface générées par la source créent un champ d'ondes de tube (TW1) qui se réfléchit en fond de puits (TW2), et au toit d'une zone poreuse et perméable située à 440 m de profondeur (TW3). TW3 se réfléchit de nouveau à la surface au contact fluide-air (TW4). L'onde P descendante, pénétrant la zone perméable à 440 m, donne naissance à une onde de tube

(TW5) qui se réfléchit au fond du puits (TW6) [8]

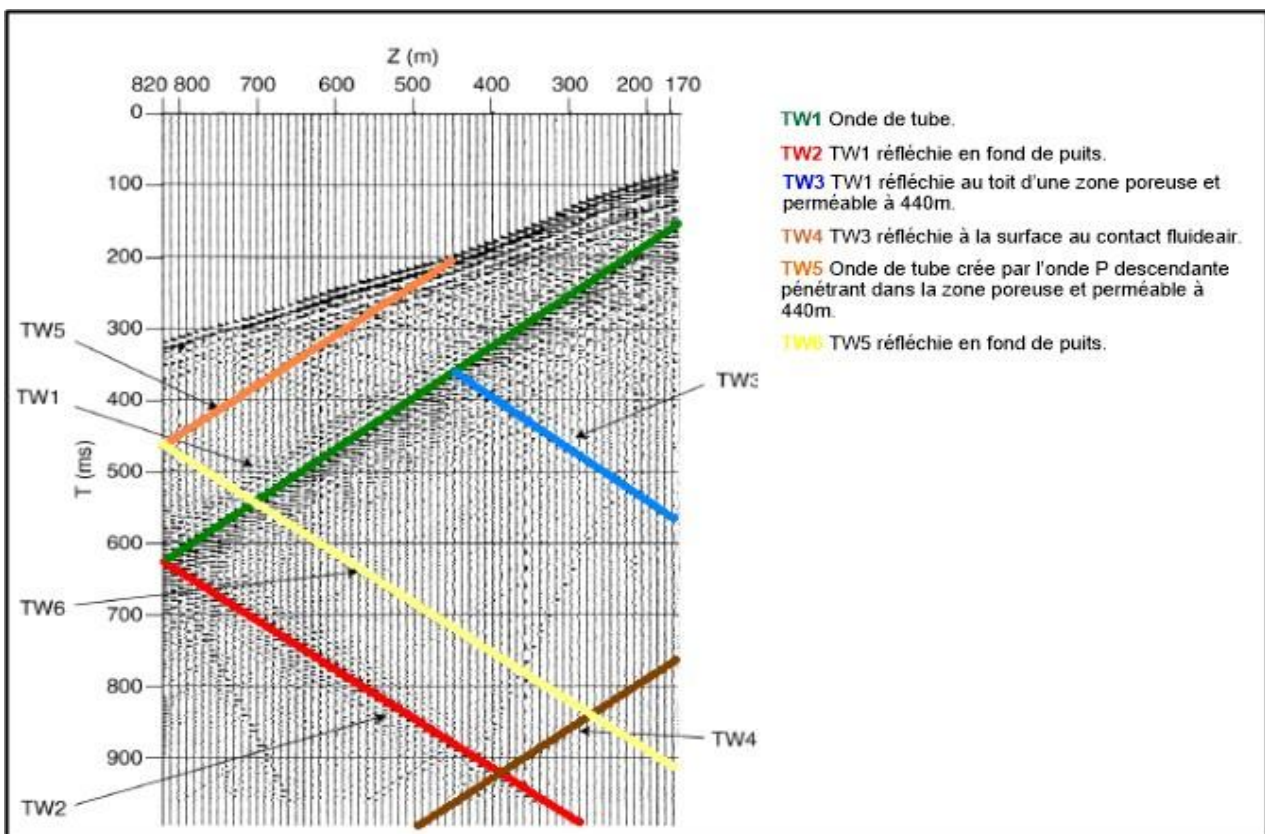


Figure I.9 : Enregistrement PSV avec présence d'ondes de tube [8]

Les procédures généralement utilisées sur le terrain pour l'atténuation des ondes de tube sont :

- L'augmentation de l'offset : quand l'offset est grand, l'amplitude de l'onde de surface à l'arrivée au puits est faible,
- L'atténuation des ondes de surface arrivant à la tête du puits : on abaisse le niveau de la colonne de boue de façon à ce que l'amplitude des ondes de surface soit la plus faible possible,
- L'empêchement du transfert de l'énergie des ondes de surface à la colonne de boue : pour détourner les ondes de surface du puits, on creuse entre la source et le puits une tranchée et on éloigne la source d'une distance égale à la demi-longueur d'onde fondamentale des ondes de surface.

Lors du traitement, ces ondes de tube peuvent être atténuées par le filtrage en fréquence ou le filtrage dans le domaine (f, k). [9]

I.3.3. Traitement des données

La chaîne de traitement du PSV comprend le prétraitement des données, la séparation des champs d'ondes et l'imagerie sismique. [10]

I.3.3.1. Prétraitement

Comme son nom l'indique, cette phase a pour but la préparation des données pour le traitement proprement dit.

1) La préparation des données

Cette première étape comprend le démultiplexage des données, le changement de format si cela est nécessaire et la corrélation si la source sismique est vibratoire.

2) L'édition

Cette opération comprend le calibrage en temps et en amplitude des données, la compensation des retards à l'enregistrement en se servant des enregistrements de signature et la suppression des traces bruitées.

Le calibrage en temps et en amplitude est fait en appliquant aux traces d'un tir une correction statique et un gain fixe calculé à partir de la signature correspondant à ce tir. La correction statique est déterminée par un alignement en temps des signatures sur un autre plan de référence et le gain fixe est calculé de façon à ce que toutes les signatures aient la même énergie.

3) La sommation

Elle est utilisée dans le cas de sources de faible énergie. On procède à plusieurs tirs pour la même position de la sonde dans le puits. La sommation des enregistrements obtenus à la même côte permet d'améliorer le rapport signal sur bruit. [11]

4) Le pointé des temps des premières arrivées

Cette étape consiste à pointer les temps des premières arrivées qui fournissent la loi temps-profondeur ce qui permet le calcul des différentes vitesses au puits (vitesses d'intervalle, moyenne et quadratique moyenne). [12]

Le pointé des temps des premières arrivées est aussi utilisé pour horizontaliser les ondes montantes ou descendantes. Un bon pointage conditionne une bonne interprétation.

5) La récupération des amplitudes réelles

Cette correction est destinée à récupérer les amplitudes réelles du signal, considérablement atténuées lors de sa propagation dans le sous-sol.

Plusieurs facteurs affectent considérablement l'amplitude de l'onde au cours de sa propagation dans le sous-sol, parmi lesquels :

- La divergence sphérique : c'est un phénomène de décroissance de l'intensité d'une onde sismique en fonction de son éloignement de la source. C'est un phénomène qui ne cause aucune perte d'énergie,
- L'absorption : ce phénomène d'absorption de l'énergie sismique se résume dans la perte d'énergie due au mouvement des particules et des fluides remplissant les pores et provoquant ainsi l'atténuation des hautes fréquences,
- La transmission : à chaque transmission, une fraction de l'énergie de l'onde est réfléchi.

Afin d'obtenir des amplitudes qui soient représentatives des coefficients de réflexion, il faudrait appliquer une correction pour compenser les différentes atténuations citées précédemment en appliquant une égalisation dynamique en temps ou une loi empirique de type $a \cdot t^n$ où a est une constante empirique, t le temps de parcours de l'onde et n un nombre réel compris entre 1 et 2.

I.3.3.2. Séparation des ondes

D'une façon générale, le champ d'onde observable sur un enregistrement PSV comprend les :

- Champs des ondes montant et descendant,
- Ondes liées à la présence du puits (ondes de câble et ondes de tube),
- Diffractions liées aux hétérogénéités du sous-sol,
- Bruits d'origines diverses (industrielles par exemple).

Ces divers événements s'interfèrent et font que le suivi et l'interprétation d'une onde sismique bien précise deviennent très difficiles et délicats. La solution est alors soit d'apporter une amélioration au rapport signal sur bruit, soit de séparer les diverses ondes existantes.

Le but de la séparation des ondes est de se servir des paramètres caractérisant les ondes, comme les temps d'arrivée, les amplitudes ou les vitesses apparentes, pour séparer, d'une part, le signal sismique du bruit et, d'autre part, les différentes ondes contenues dans le signal enregistré.

Pour cela, il existe plusieurs techniques avec des concepts différents, classées en trois catégories. Dans le prochain chapitre, nous allons définir ces différentes catégories et donner le principe des méthodes de séparation d'ondes les plus usuelles. [1]

La figure I.10 présente un enregistrement PSV, constituée de 130 traces acquises entre 80 et 1125 m. Sur cet enregistrement, on distingue clairement les deux champs d'ondes descendant et montant ainsi que des ondes de tube.

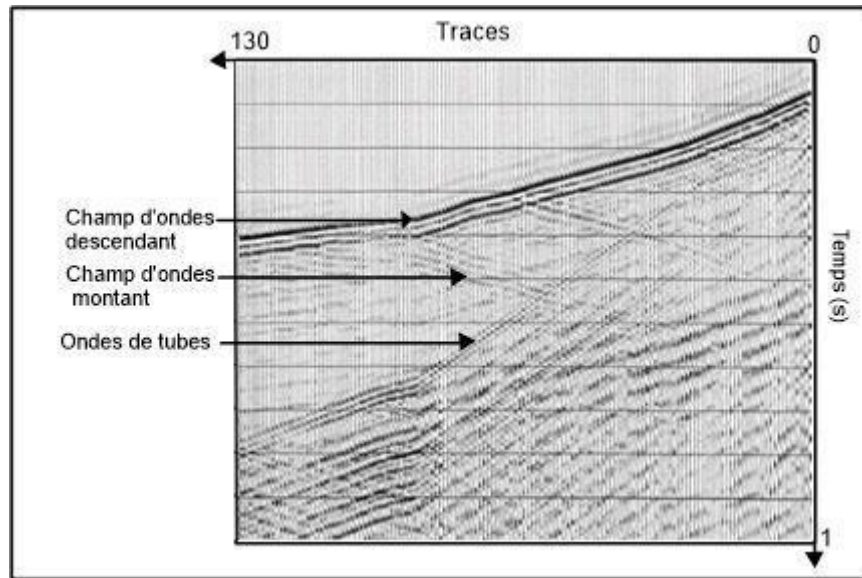


Figure I.10 : Exemple d'enregistrement PSV ; données brutes après prétraitement [13]

La figure I.11 montre les champs d'ondes horizontalisés montant (Fig.I.11a) et descendant(Fig. I.11b) obtenus à partir du PSV de la figure I.10.

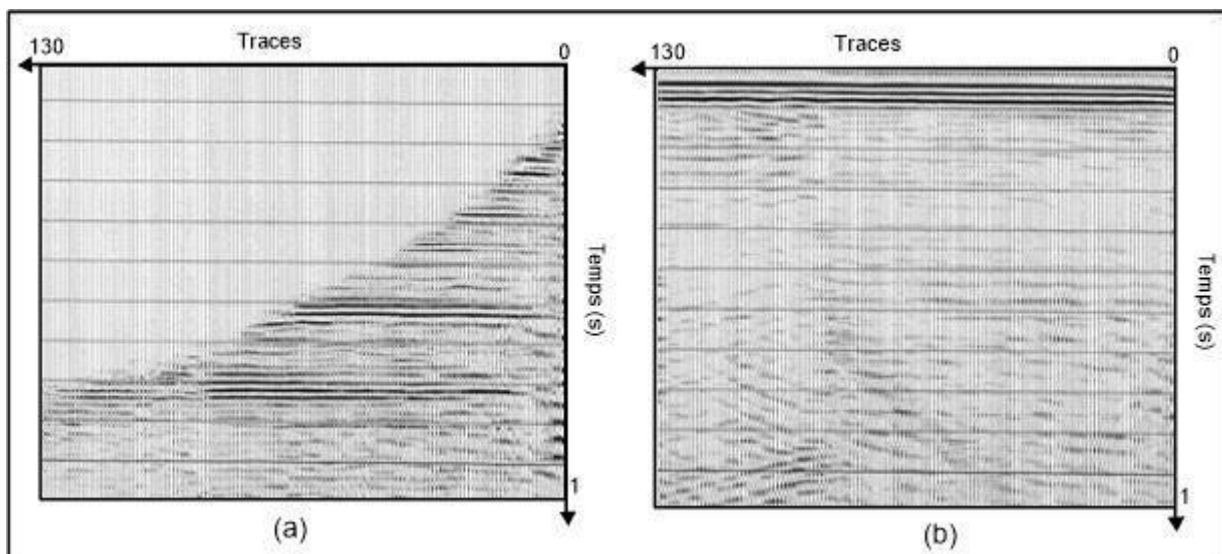


Figure I.11 : Séparation d'ondes. (a) Champ d'ondes montant horizontalisé et (b) Champ d'ondes descendant horizontalisé, extraits de l'enregistrement PSV de la figure I.10 [13]

I.3.3.3. Traitement de l'imagerie sismique

Après séparation des ondes, la séquence de traitement qui aboutit à l'image sismique est composée de ladéconvolution, l'horizontalisation des ondes montantes déconvoluées et le calcul de la trace somme.

[13]

1) La déconvolution

Quelle que soit la position du géophone, le signal descendant est le champ des ondes descendantesincluant les ondes directes ou descendantes primaires en premières arrivées et les

multiples descendants créés par les marqueurs situés au-dessus du géophone. Le signal montant est la convolution du signal descendant par la suite des coefficients de réflexion.

L'étape de déconvolution permet de s'affranchir à la fois du signal de la source et des multiples descendants ; l'opérateur de déconvolution est d'abord calculé sur le champ d'ondes descendant puis appliqué sur le champ d'ondes montant car, mises à part les ondes directes en premières arrivées, tous les autres événements du champ descendant sont des multiples.

2) Horizontalisation des ondes montantes déconvoluées

Les ondes montantes déconvoluées sont obtenues en appliquant à chaque trace PSV une correction statique égale au temps de sa première arrivée. Le résultat (trace PSV en temps double) est comparable à l'enregistrement de la sismique de surface.

Pour horizontaliser l'onde descendante, on retranche le temps de la première arrivée correspondant à chaque trace. La figure I.12 montre les ondes montantes déconvoluées par les ondes descendantes et horizontalisées.

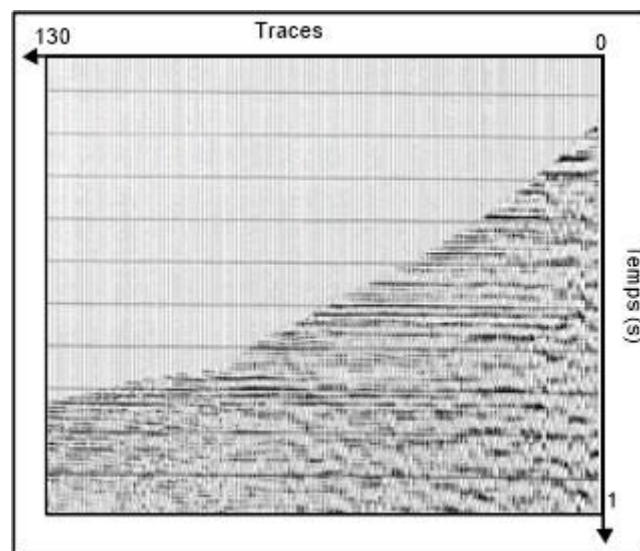


Figure I.12 : Ondes montantes (Fig.I.11a) déconvoluées et horizontalisées [13]

3) La trace somme (corridor stack)

Sur les ondes montantes déconvoluées et alignées en temps double, on sélectionne une fenêtre de sommation étroite (Fig.I.13a) de façon à ne préserver que les événements qui croisent les premières arrivées et, par conséquent, éliminer tous les multiples.

Un mute est ensuite appliqué en dehors de la fenêtre et l'ensemble des traces est sommé. La trace résultante est dupliquée plusieurs fois pour donner le film PSV (Fig.I.13b).

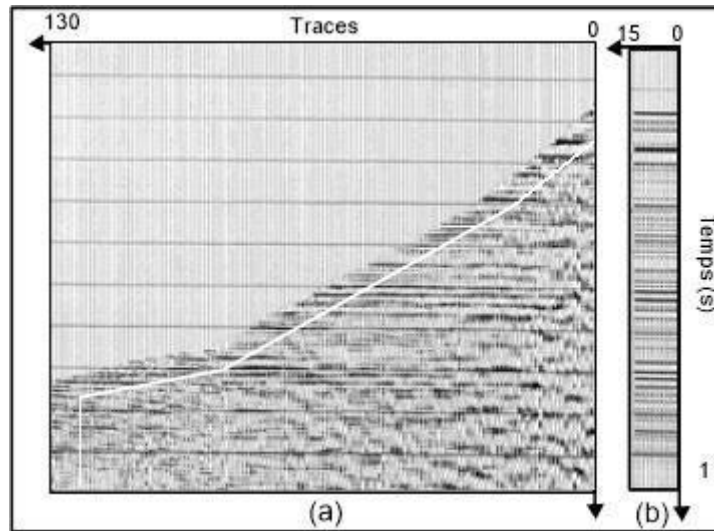


Figure I.13 : Corridor stack. (a) Choix du couloir ; (b) Film PSV [13]

I.3.4. Principales applications

Le PSV permet un enregistrement d'une sismique de détail au voisinage du puits. Il a de nombreuses applications ; il constitue un moyen de calage des enregistrements de la sismique réflexion de surface au niveau du puits, ce qui permet l'identification assez précise en profondeur des horizons sismiques. En effet, la sismique conventionnelle fournit une image du sous-sol en 2D ou en 3D et donne une idée sur les structures de la subsurface mais ces images nécessitent un calage. Celui-ci est réalisé au niveau des puits en utilisant les résultats de la sismique de puits car, celle-ci permet de comparer et de mieux comprendre les événements présents sur les sections (coupes sismiques) de la sismique de surface.

Il offre aussi la possibilité de distinguer les réflexions primaires des réflexions multiples présentes dans l'enregistrement de sismique conventionnelle, de prédire les réflecteurs sismiques situés en-dessous de la profondeur finale atteinte par le forage et d'être utilisé comme un sismo-sondage pour effectuer le calage de la diagraphie sonique. [14]

I.4. Conclusion

La sismique de puits joue un rôle fondamental en fournissant des informations décisives pendant et après le forage. La sismique de puits joue un rôle fondamental en fournissant des informations décisives pendant et après le forage. Son champ d'application est très large.

Son acquisition et son traitement évoluent constamment grâce aux progrès de l'informatique et de l'électronique. L'une des étapes de traitement les plus importantes et en constante amélioration est la séparation des ondes,

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le filtre médian, un outil essentiel dans le traitement des données sismiques. Le filtre médian est largement utilisé dans l'industrie pétrolière pour améliorer les images sismiques, détecter les anomalies géologiques et faciliter la localisation des réservoirs d'hydrocarbures. Le filtre médian

Filtre médian :

II.1.1. Définition et propriétés

Le filtre médian est un filtre non linéaire qui date des années 80. C'est une méthode de filtrage assez largement utilisée. L'algorithme classique du filtre médian repose sur l'utilisation d'un algorithme de tri qui remplace chaque échantillon par la valeur médiane des échantillons situés dans une fenêtre centrée sur l'échantillon à filtrer.

Soit un signal défini par les échantillons $x_1, x_2, x_3, \dots, x_5$. Ces échantillons sont d'abord classés par ordre croissant ; soit, par exemple, x_3, x_5, x_4, x_1 . L'échantillon x_2 du milieu est pris comme sortie du filtre :



La longueur L du filtre est égale au nombre d'échantillons pris en considération par ce filtre.

Si L est pair, la valeur médiane est la moyenne des deux valeurs centrales de la série d'échantillons considérée. [15]

Le filtre médian possède deux propriétés importantes : il rejette les pics indésirables et n'altère pas les discontinuités. Il est appliqué pour le lissage dans le domaine des temps ou des distances ; la fenêtre F de longueur L glisse le long des N échantillons de la fonction. Au cours du glissement, chaque valeur centrale d'une fenêtre du signal d'entrée va être remplacée par sa médiane pour avoir, par la suite, un signal de sortie filtré (Fig.II.1). Le pouvoir d'atténuation des amplitudes augmente avec la longueur du filtre.

Ce filtre est généralement utilisé en traitement d'images pour le débruitage et en sismique de puits pour la séparation des champs d'ondes. [16]

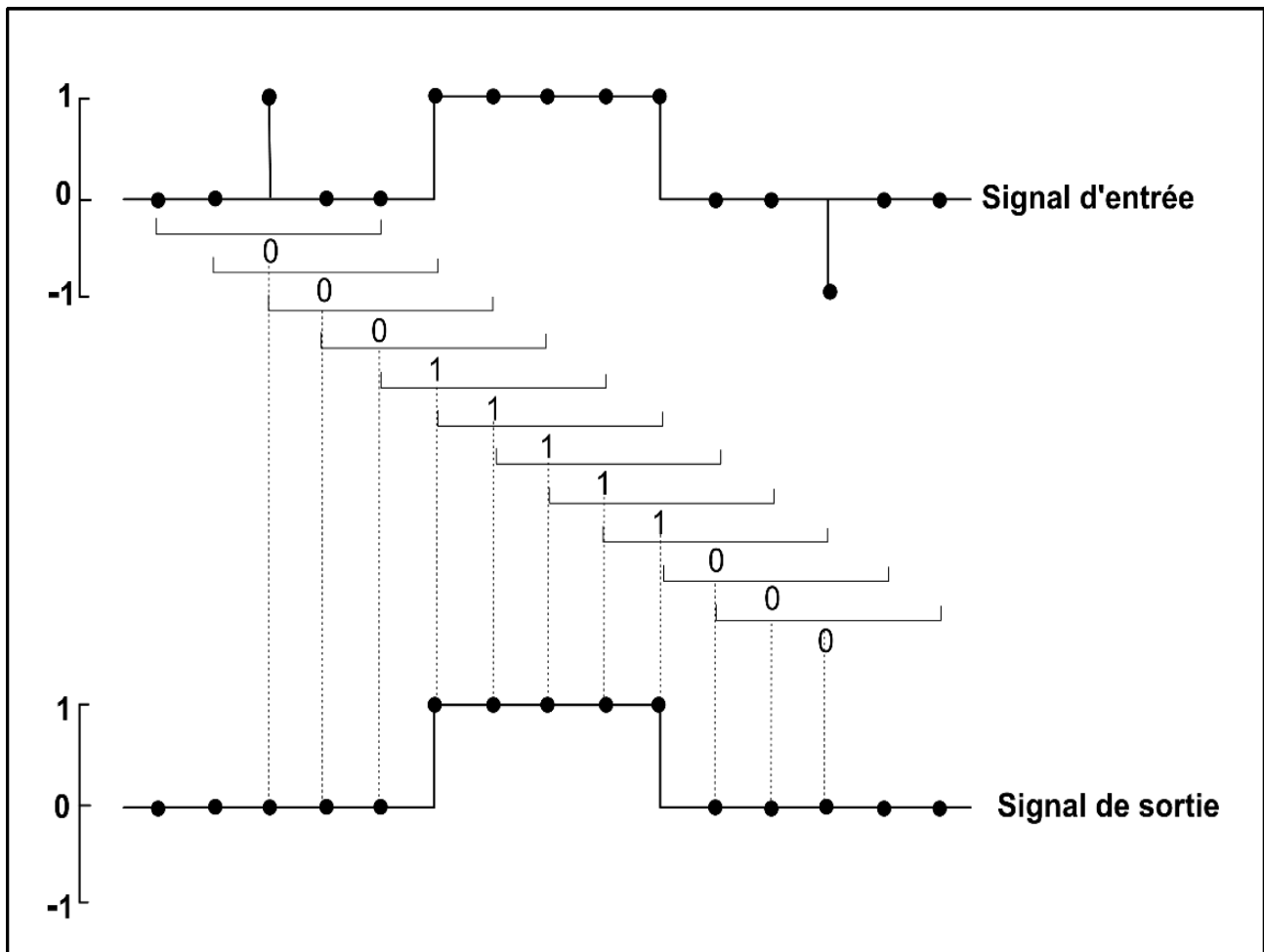


Figure II.1 : Exemple de filtrage (lissage) d'une fonction par le filtre médian ($L=5$) [16].

II.1.2. Application à la séparation des champs d'ondes en sismique de puits

Le filtre médian est utilisé dans le traitement des enregistrements PSV pour l'extraction des ondes montantes (M) ou des ondes descendantes (D). Comme ce filtre favorise les événements cohérents (horizontaux), il est nécessaire d'horizontaliser les ondes à extraire avant son application. Pour cela, si nous souhaitons avoir le champ d'ondes M (Fig.II.2), nous horizontalisons les événements M (Fig.II.2b) en rajoutant à chaque trace le temps de la première arrivée qui lui correspond.

De même, l'extraction du champ d'ondes D nécessite l'horizontalisation des événements D, en retranchant à chaque trace le temps d'arrivée de l'onde directe qui lui correspond.

Ces opérations de filtrage pour la séparation des champs M et D sont réalisées suivant la profondeur comme illustré sur la figure II.3. Les filtres médians peuvent être appliqués en cascade et forment alors des filtres médians composites qui donnent de meilleurs résultats en sismique de puits.

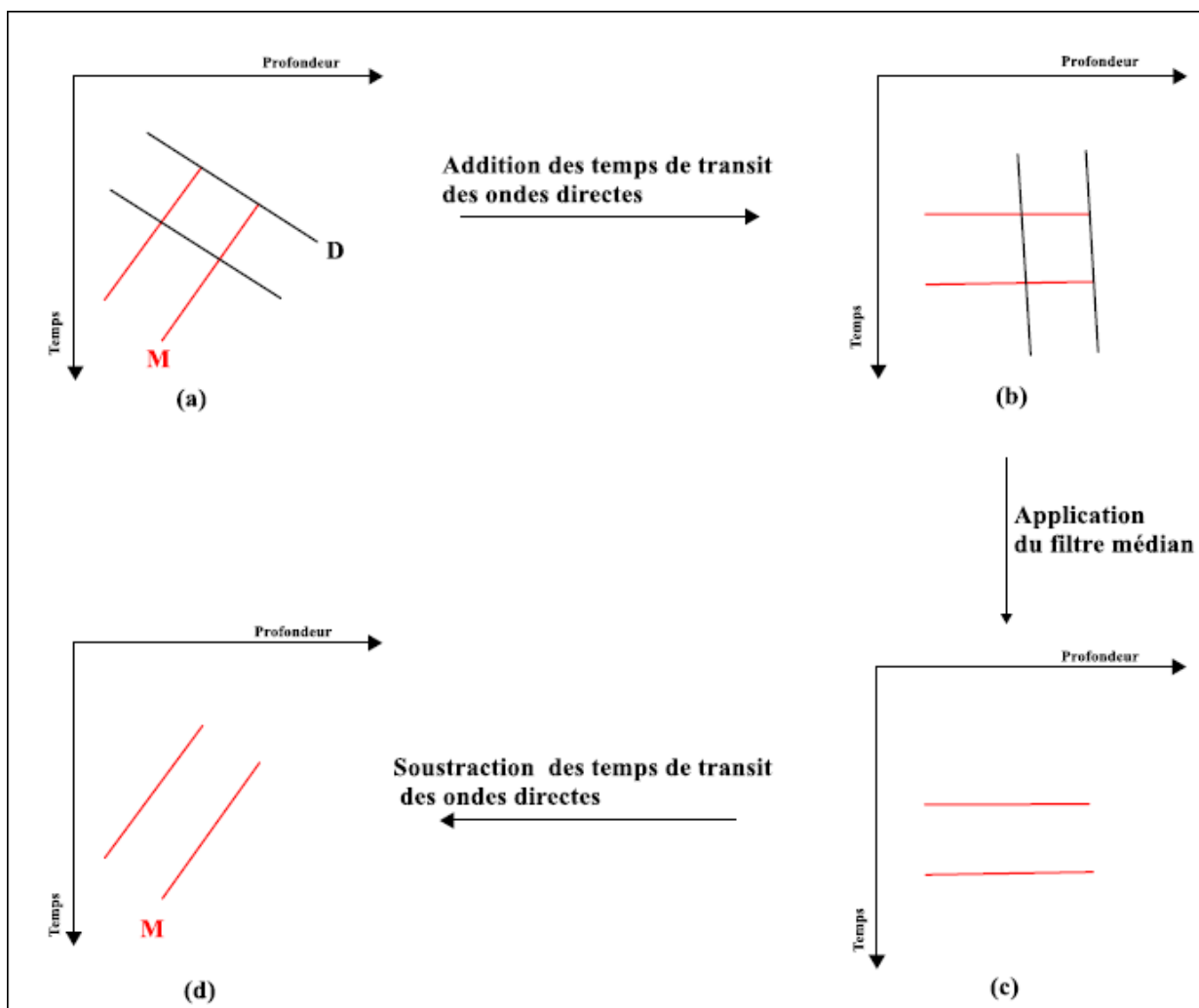


Figure II.2 : Extraction des ondes montantes par filtre médian : (a) PSV original ;(b) Horizontalisation des ondes M ;(c) Ondes M alignées extraites par filtrage médian ; (d) Ondes M désalignées. [16]

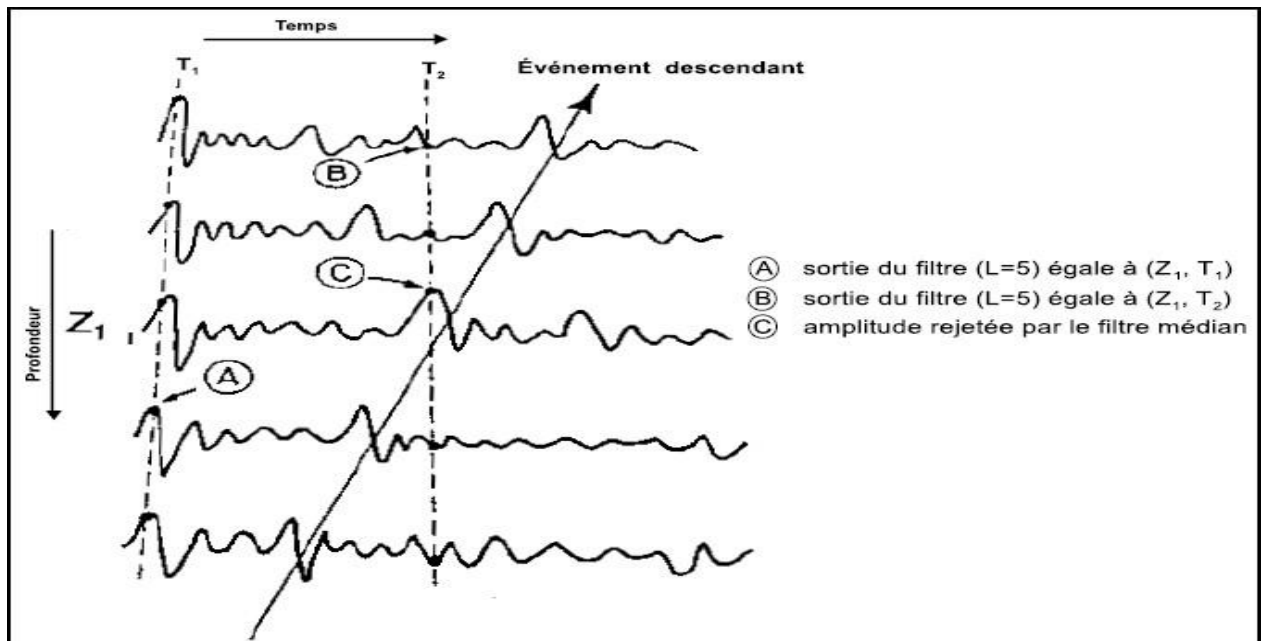


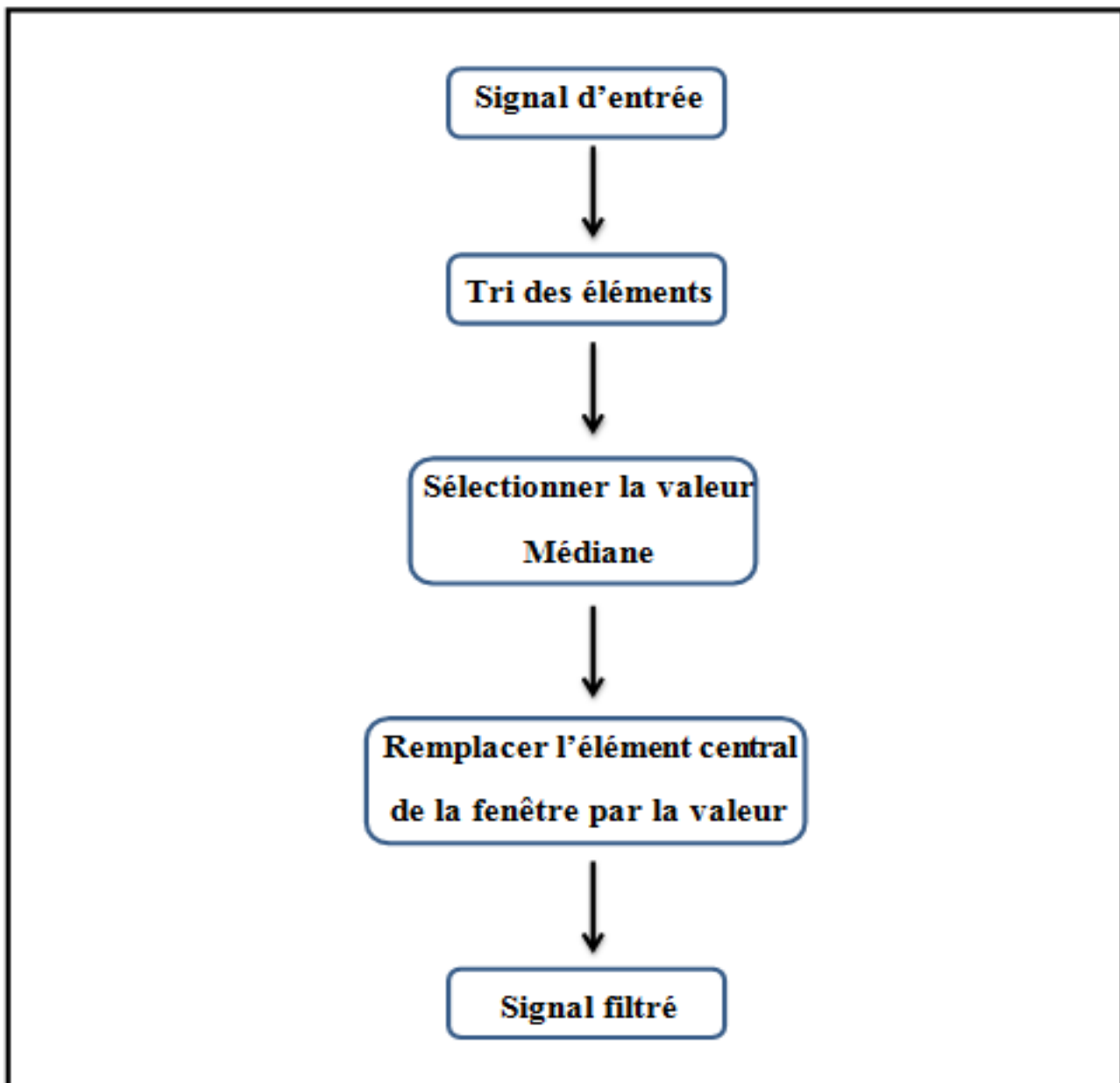
Figure II.3 : Filtre médian opérant le long de lignes de temps fixes [16]

II .2. Algorithme et programmation

Une fois les ondes des cédantes horizontalisées , la section PSV est prête à être traitée par filtre médian afin d'éliminer les ondes non horizontalisées.

Nous avons réalisé le code en programme Matlab selon les étapes suivantes :

1. Horizontalitation des données.
2. L'introduire du signal dans Matlab est par la fonction <<xlsread>> ,Entrer le nombre de lignes et colonnes de la matrice.
3. Application du filtre médian.
4. Exportation des résultats et la visualiser par logiciel Seisee view .



Organigramme du filtre médian

II.3. Séparation des champs d'ondes montant et descendant sur des données sismiques de type PSV

II.3.1. Séparation sur des données PSV synthétiques

II.3.1.1 Présentation des données synthétiques

Les données PSV synthétiques (PSVS), utilisées dans cette application, correspondent à une réponse d'un modèle géologique à trois couches ; les vitesses sont fixées à 3.0 km/s, 4.0 km/s et 3.3 km/s et les épaisseurs à 600m, 1000m et l'infini pour les couches 1, 2 et 3 respectivement (Fig.II.4).

Ces données sont composées de 90 traces s'échelonnant de 100 m à 1880 m de profondeur, avec un pas de 20 m. La longueur de l'enregistrement sismique est restreinte à 1400 ms, avec un pas d'échantillonnage de 2 ms ($N_1=90$ et $N_2=700$).

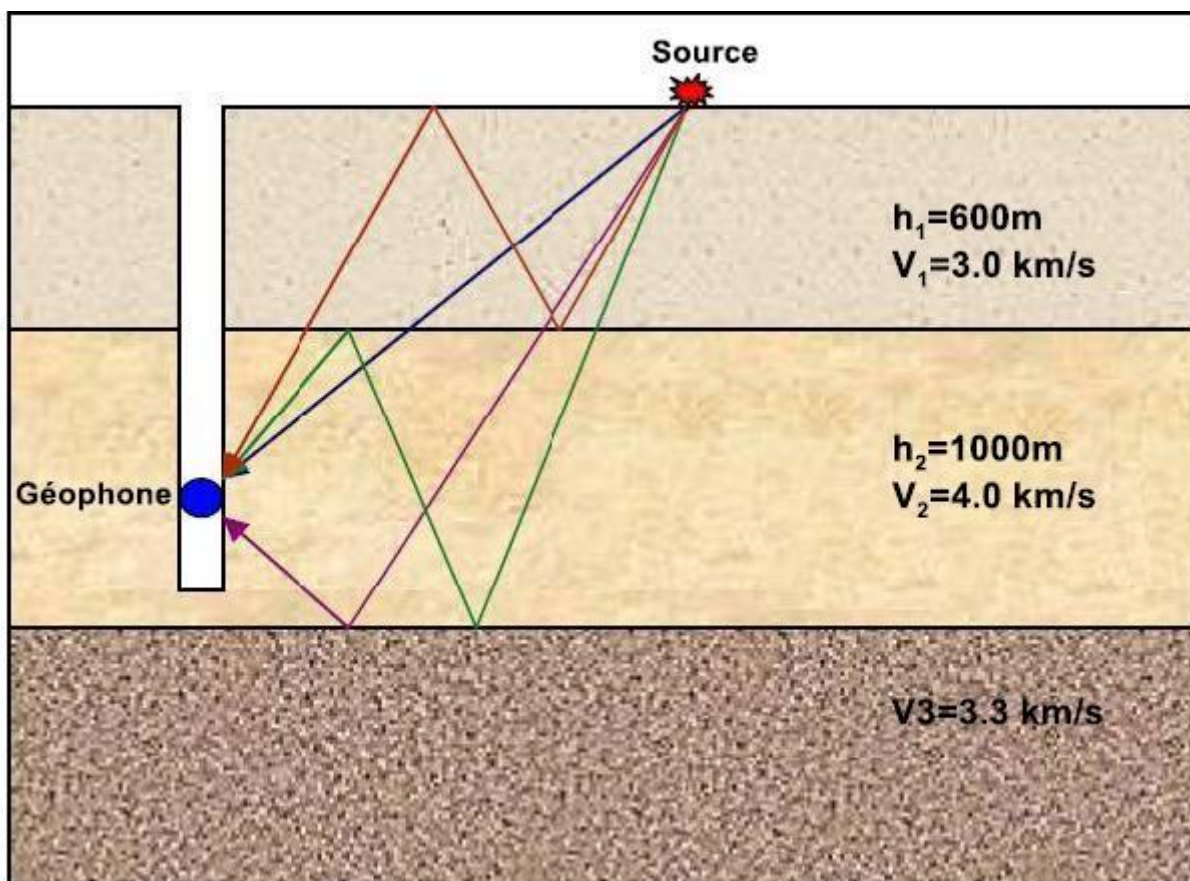


Figure II.4 : Modèle géologique considéré pour la génération des données sismiques synthétiques de type PSV.

Les traces PSVS impulsionnelles sont calculées dans le domaine temporel, puis convoluées à une ondelette de Ricker de fréquence centrale égale à 25 Hz et dont l'expression est donnée par la relation suivante (Fig.II.5) :

$$\Psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3\sigma\pi^4}} \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$$

Où t est la variable temps et σ la fréquence centrale.

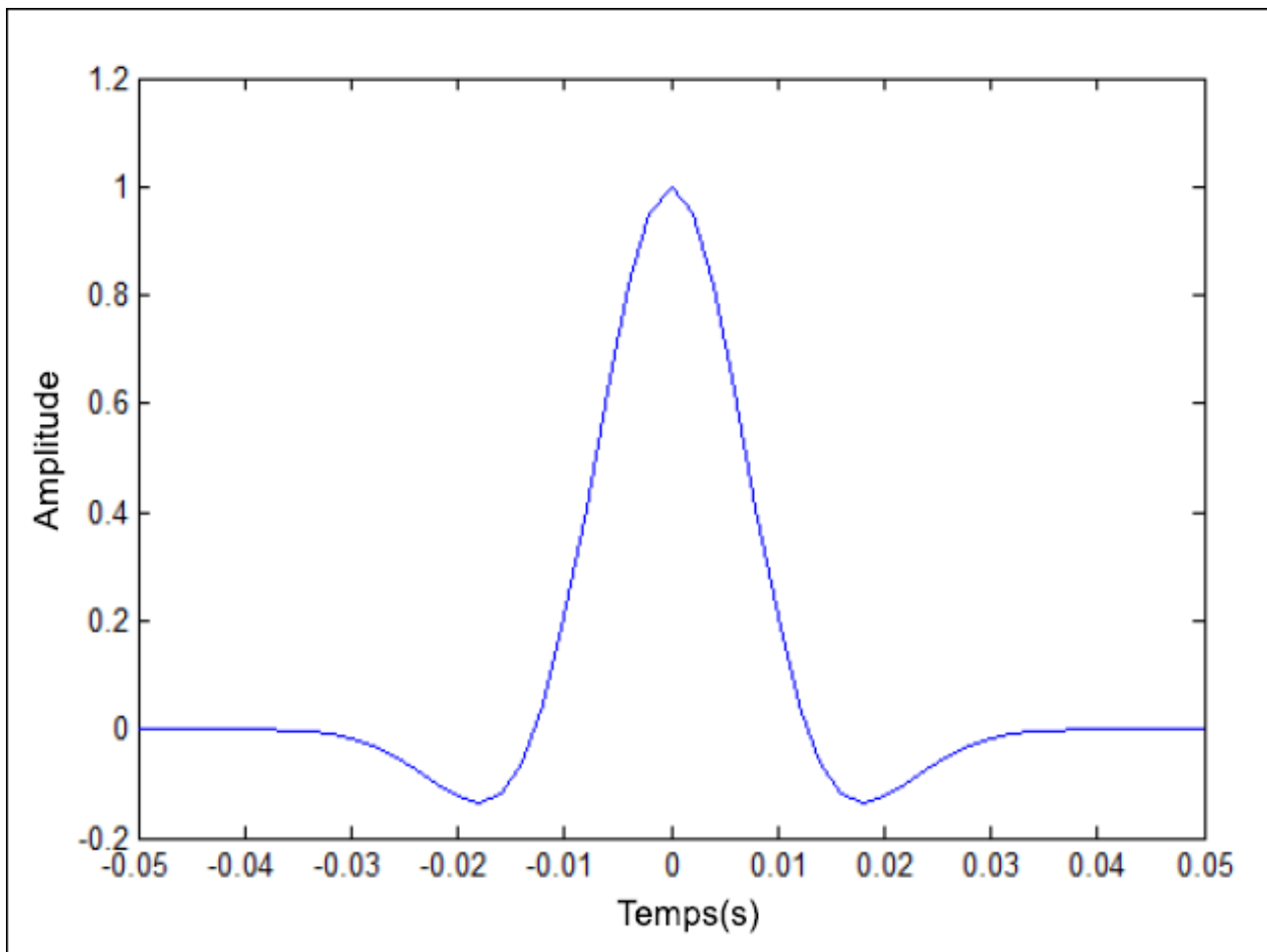


Figure II.5 : Ondelette de Ricker avec une fréquence centrale $\sigma = 25$ Hz.

L'enregistrement obtenu est représenté sur la figure II.6a et son image en niveau de gris sur la figure II.6b.

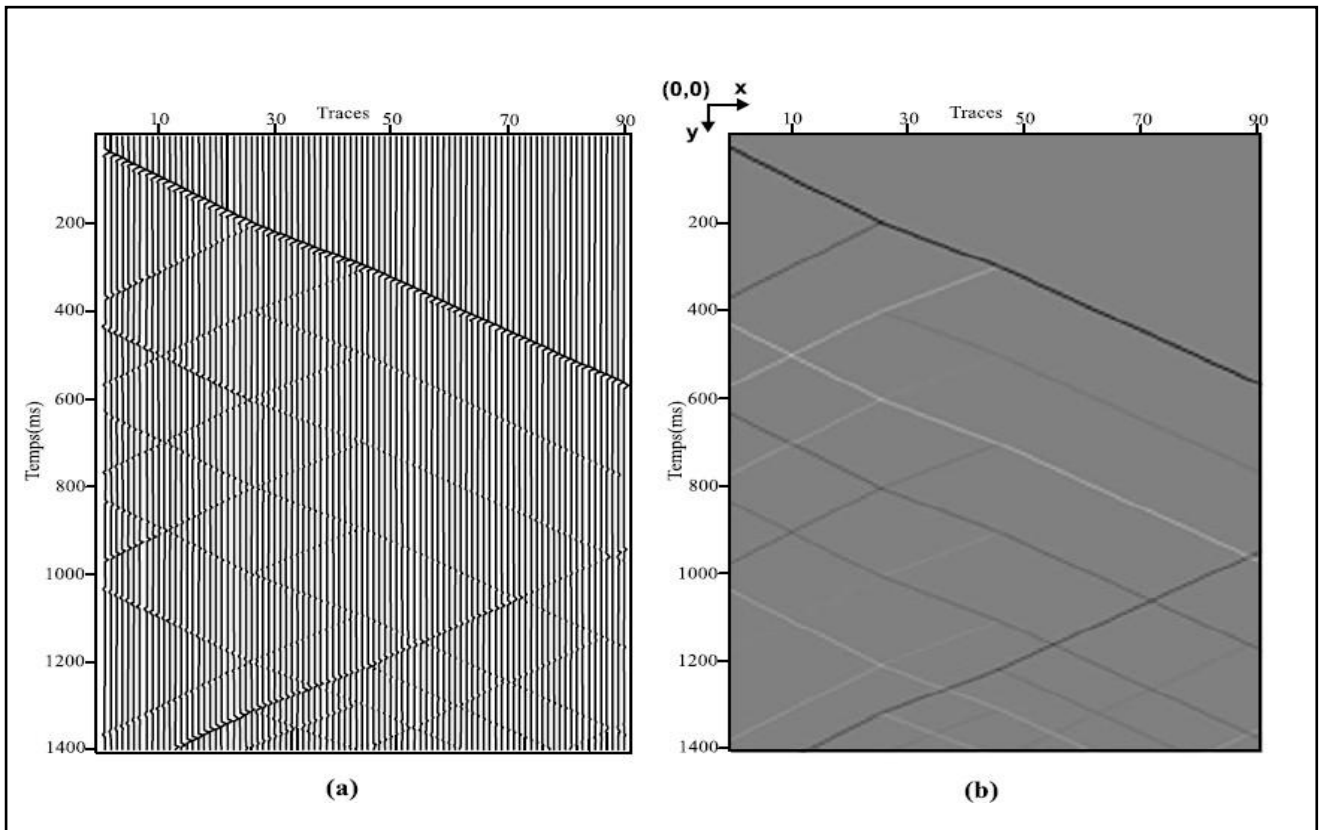


Figure II.6 : Données synthétiques PSVS : (a) Enregistrement PSVS correspondant à la réponse du modèle géologique à trois couches de la figure II.4 ; (b) Image en niveau de gris correspondante

II.3.1. 2. Séparation des champs d'ondes montant et descendant par filtre médian

Pour la séparation par filtre médian des champs d'ondes montant et descendant sur le PSVS, nous avons développé un code sous Matlab 2010a.

Ce code demande à l'utilisateur d'introduire la taille de la fenêtre du filtre (L). Il faut noter que la taille de la fenêtre doit obligatoirement être un entier positif impair pour pouvoir tirer la médiane par la suite.

Pour extraire le champ d'ondes montant, on commence par horizontaliser les ondes montantes sur l'enregistrement PSVS (Fig.II.7). Des fenêtres de longueurs 3, 5, 7 et 11 ont été testées.

La figure II.8d montre le champ d'ondes montant extrait à partir de l'enregistrement PSVS avec ondes montantes horizontalisées (Fig.II.7b), en utilisant un filtre médian d'une fenêtre de longueur fixée à 7 après les tests et le champ d'ondes descendant est éliminé.

Pour extraire les ondes descendantes, on peut procéder de deux façons différentes ; la première façon, dite indirecte, consiste à soustraire, de l'enregistrement PSVS initial, l'enregistrement en ondes montantes extraites par filtre médian (Fig.II.7d). La seconde, utilisée ici, consiste à appliquer le filtre médian sur l'enregistrement PSVS sur lequel nous alignons cette fois les ondes descendantes (Fig.II.8b).

La figure II.8d montre le champ d'ondes descendant extrait à partir de l'enregistrement PSVS avec ondes descendantes horizontalisées (Fig.II.8b), en utilisant le filtre médian d'une fenêtre de longueur fixée à 7 ; les événements extraits sont, comme dans le cas de l'extraction des ondes montantes et le champ d'ondes montant est bien éliminé.

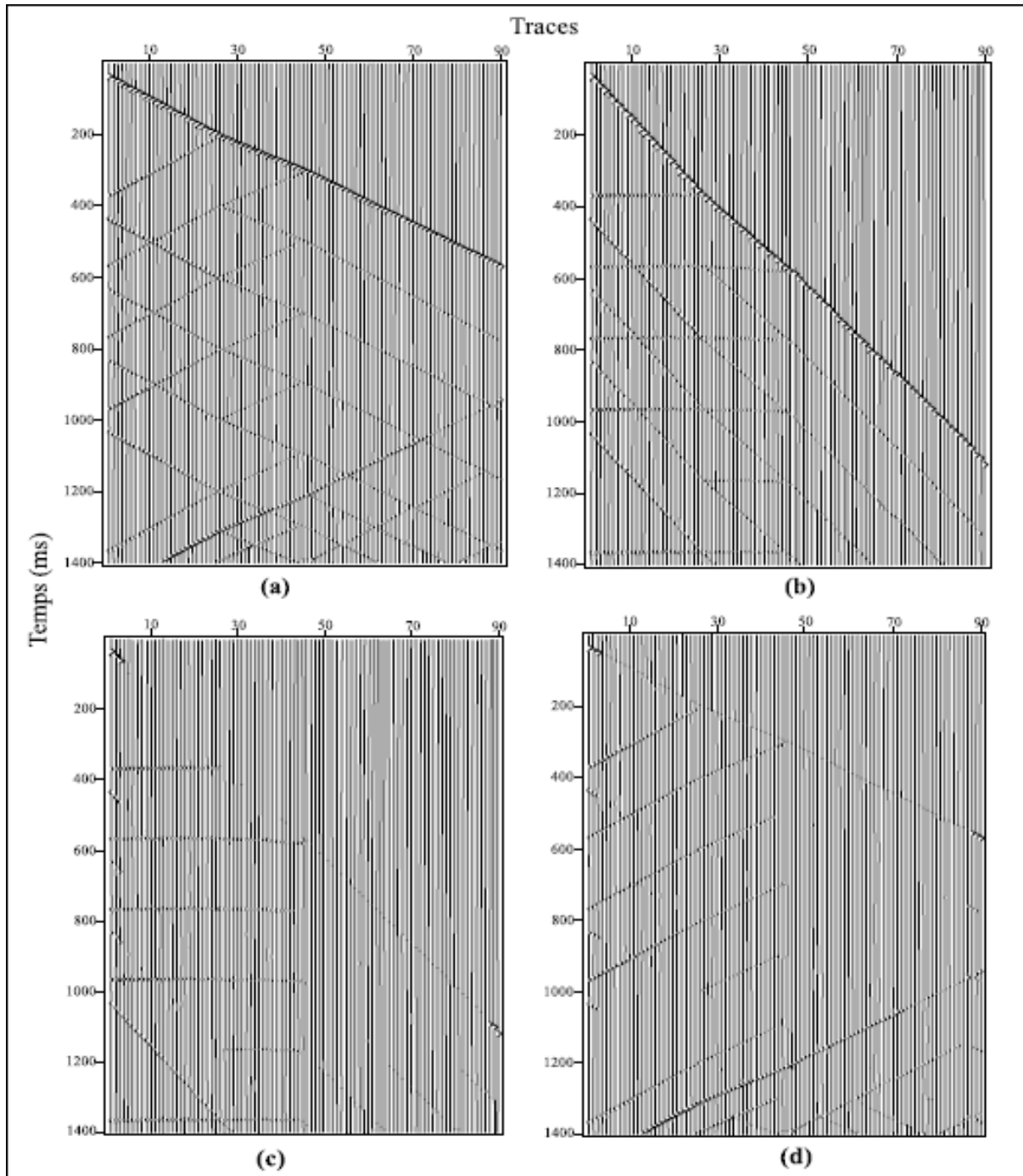


Figure II.7 : Extraction des ondes montantes du PSVS par filtrage médian ($L=7$) : (a) Enregistrement PSVS ; (b) Enregistrement PSVS avec horizontalisation des ondes montantes ; (c) Ondes montantes horizontalisées extraites avec un filtre médian de longueur $L=7$; (d) Ondes montantes extraites.

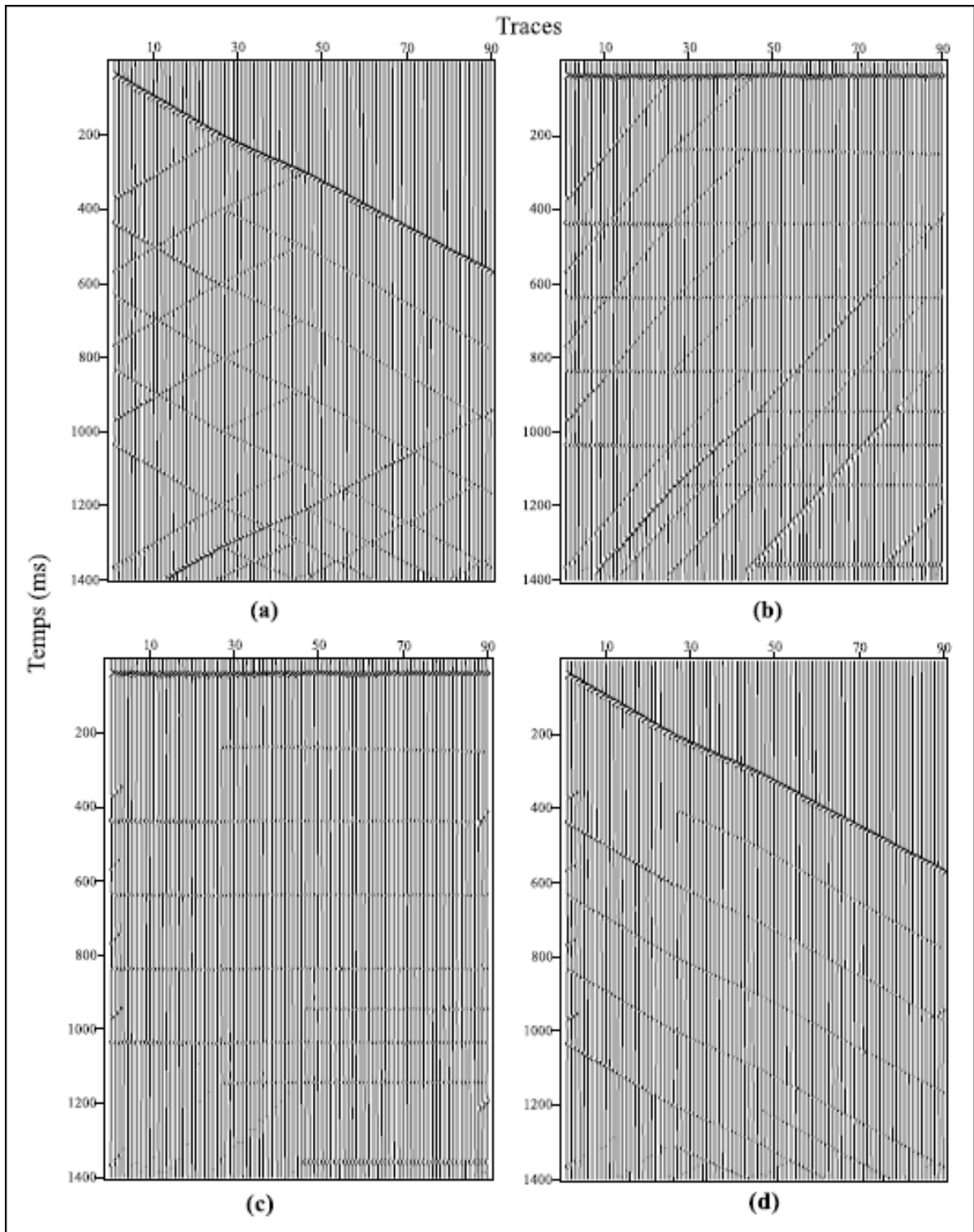


Figure II.8 : Extraction des ondes descendantes du PSVS par filtrage médian ($L=7$) : **(a)** Enregistrement PSVS ; **(b)** Enregistrement PSVS avec horizontalisation des ondes descendantes ; **(c)** Ondes descendantes horizontalisées extraites avec un filtre médian de longueur $L=7$; **(d)** Ondes descendantes extraites.

Conclusion

Le filtre médian est un outil précieux en traitement des données sismiques, offrant une solution efficace pour la suppression du bruit tout en préservant les caractéristiques importantes des données sismiques.

Introduction

Dans le domaine du traitement des données sismiques, le filtre (f-k) joue un rôle essentiel pour améliorer la qualité du signal sismique en éliminant le bruit indésirable et en préservant les informations cruciales pour l'analyse géophysique. Cette présentation vise à expliquer le fonctionnement et les applications du filtre (f-k) dans le contexte du traitement des données sismiques.

III.1. Le filtre (f-k)

Le filtre (f,k) est une technique de filtrage utilisée pour le traitement des données sismiques. Il repose sur la décomposition de Fourier du signal sismique en termes de fréquences (f) et de nombres d'onde (k). Cette décomposition permet d'analyser et de filtrer le signal sismique dans le domaine des fréquences et des nombres d'onde, offrant ainsi une approche puissante pour supprimer le bruit et améliorer la qualité du signal.

III.1.1. Rappels théoriques sur la transformation de Fourier à deux dimensions (f, k)

La transformation (f-k) est la transformée de Fourier à deux dimensions. Soit une fonction $s(t, x)$. Par définition, le double transformé de Fourier de $s(t, x)$, est:

$$TF_{x,t}[s(t, x)] = TF_x\{TF_t[s(t, x)]\}$$

$$S(f, k) = - \iint_{-\infty}^{+\infty} s(t, x) e^{-i2\pi j(ft - kx)} dt dx$$

où f et k sont respectivement les fréquences temporelle et spatiale [19]

Si on considère un enregistrement à M traces dont chacune est composée de N

échantillons, lespectre $S(f, k)$ prend la forme discrète suivante :

$$S(i, j) = \Delta t \Delta x \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^M s(p, q) e^{-2\pi j \left(\frac{(p-1)i}{N} - \frac{(q-1)j}{M} \right)}$$

Si un événement donné à une grande cohérence spatiale dans le domaine (t, x), il sera localisé dans le diagramme (f, k) par des points concentrés et de fortes amplitudes. Par contre, les événements de faible cohérence auront des amplitudes faibles et seront étalés dans le plan image.

Si $s(t, x)$ représente une section sismique, on obtient par la transformation (f-k) une image de cette section dans le plan (f, k) définie par les fréquences temporelle (f) et spatiale (k). Pour retrouver le signal initial, il suffit de prendre la transformation de Fourier inverse.

Cette transformation est intéressante dans le cas où le signal $s(t, x)$ se propage à vitesse constante V et est observé sur un réseau de capteurs régulièrement espacés. $s(t, x)$ peut s'écrire :

$$s(t, x) = g\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

On a alors :

$$TF_{x,t}\left[g\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] = G(f)\delta\left(k - \frac{f}{V}\right) \text{ ou } G(f) = TF_t[g(t)]$$

Dans le plan des deux fréquences f et k , $\delta\left(k - \frac{f}{V}\right)$ représente la droite $k = \frac{f}{V}$ passant par l'origine et de pente $1/V$.

III.1.2. Filtrage dans le domaine (f, k)

Ce filtre, appelé également "filtre en vitesses", est très souvent utilisé en séparation d'ondes sismiques car le paramètre discriminant pour séparer les événements est leur vitesse, entité facilement interprétable. Il a été introduit pour la première fois en sismique par Embree et al. en 1963. [19]. Il est facile d'utilisation et est assez efficace surtout dans le cas où l'onde à extraire est stable et bien localisée dans le domaine (f, k). Ce filtre a été utilisé à plusieurs reprises notamment pour atténuer l'effet des multiples [20] et des ondes de surface (ground roll), ou pour séparer les champs d'ondes montants et descendants dans les enregistrements PSV [21]

Dans le plan (f, k) défini par les fréquences temporelles f et spatiales k , les ondes de vitesse constante peuvent être sélectionnées par des filtres ou gabarits en éventail, en bande ou en polygone. La transformée de Fourier inverse permet de retrouver le signal filtré en tant que section sismique [22].

Sur la figure III.1 sont représentés les gabarits de ce filtre.

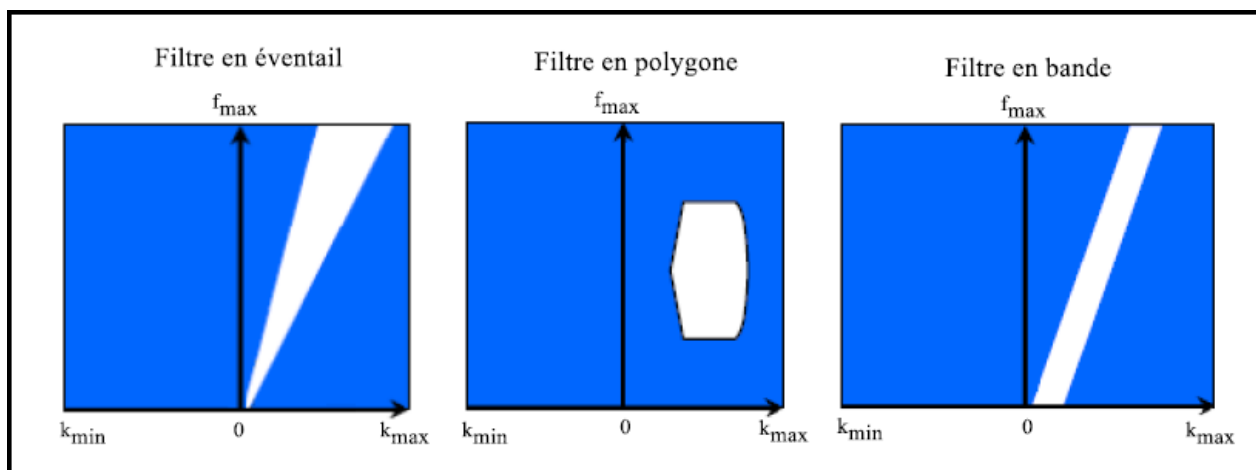


Figure III.1 : Filtres Fréquence-Nombre d'onde (f-k) [9]

La figure III.2 illustre la procédure d'extraction du champ d'ondes M par filtrage (f-k) ; comme ce filtre est basé sur la transformée de Fourier 2D, on applique une double transformée de Fourier à la section sismique (Fig.III.2a). L'image de cette section dans le plan (f, k) est représentée sur la figure III.2b. Avec la définition ici utilisée pour la transformée de Fourier à deux dimensions, à une vitesse apparente positive ($x=Vt$) dans le plan (x, t) correspond une vitesse apparente négative ($f=kV$) dans le plan (f, k). On retrouve les ondes M localisées dans le quadrant des longueurs d'ondes k négatives, on peut alors l'extraire en appliquant un filtre en éventail (Fig.III.2c). Une fois le filtre en éventail appliqué, on repasse dans le plan (x, t) par la transformée inverse pour obtenir la section sismique filtrée (Fig.III.2d).

L'extraction du champ d'ondes D est effectuée avec la même procédure, sauf que, cette fois-ci, on applique le filtre en éventail dans le quadrant des longueurs d'ondes positives, suivi par une transformée inverse afin de reconstituer la section PSV filtrée.

Cependant, une séparation brutale basée sur ces deux demi-espaces introduirait des ondes D dans le champ des ondes M. Une autre façon de procéder est l'horizontalisation de l'onde à extraire ; lorsque l'onde est mise à plat de façon très précise, le spectre de l'onde descendante est alors très focalisé selon la droite $k=0$.

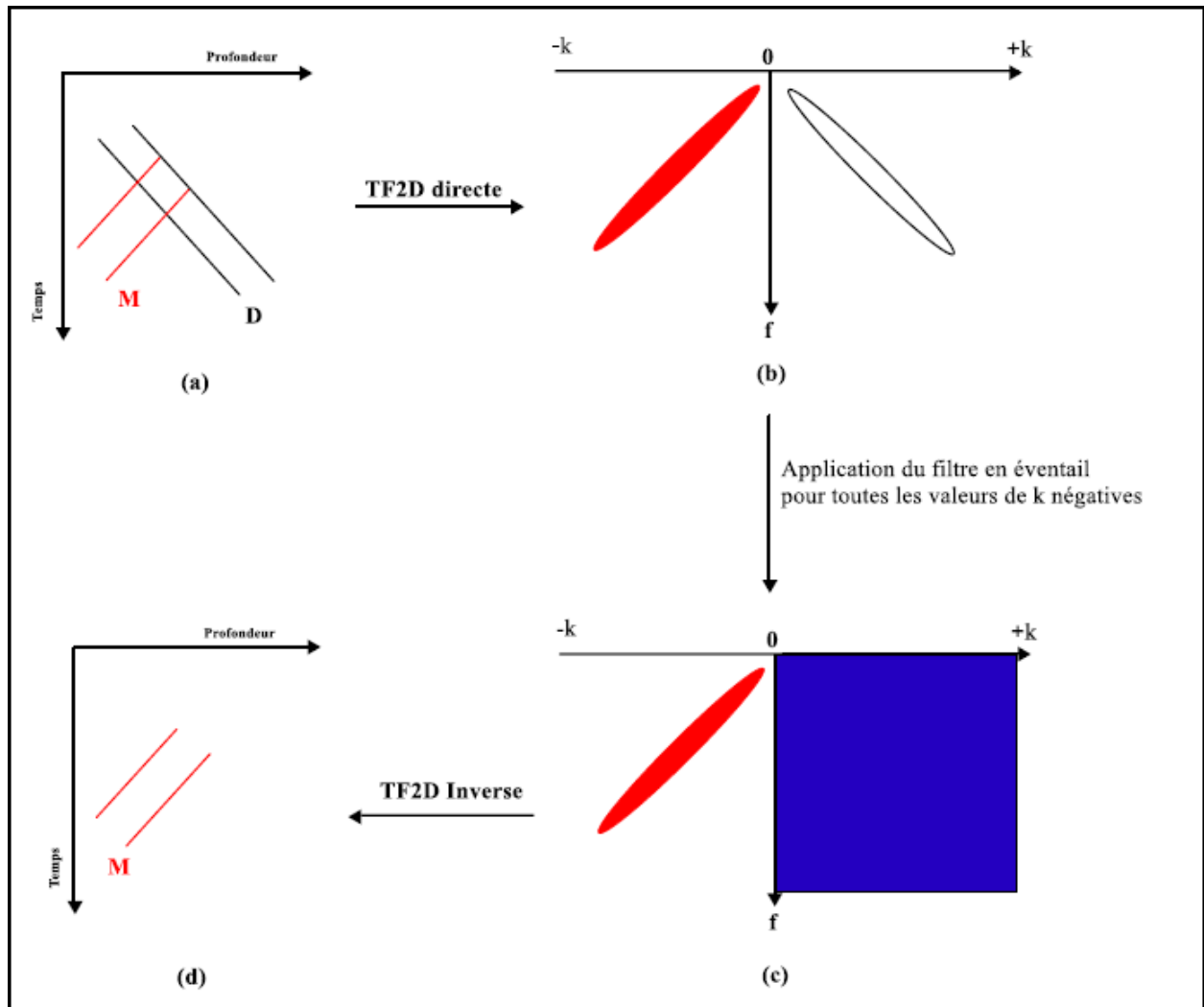
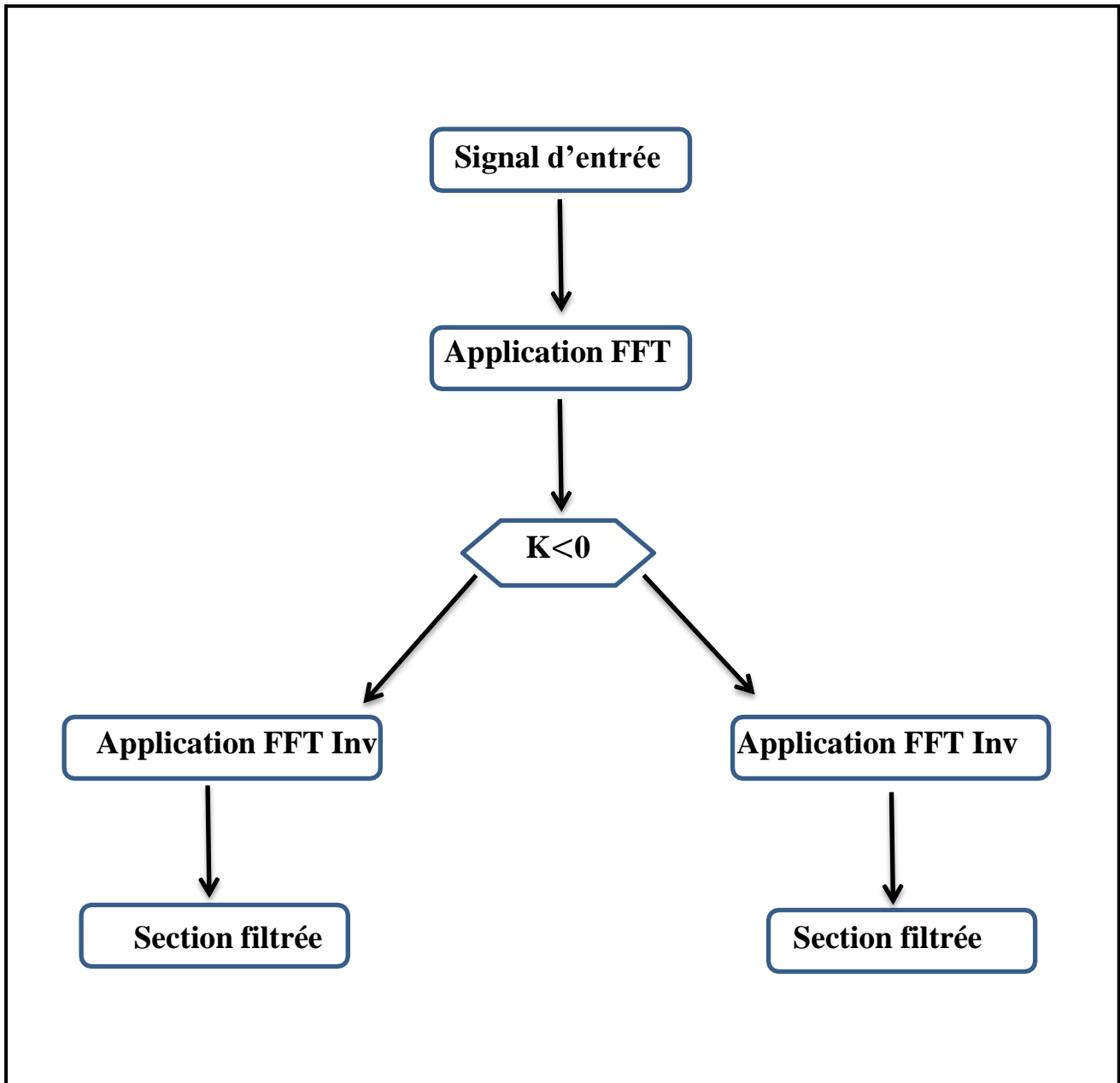


Figure III.2 : Procédure d'extraction des ondes montantes par filtrage (f-k) : **(a)** PSV original avec les ondes montantes (M) et descendantes (D) ; **(b)** PSV dans le domaine (f, k) ; **(c)** PSV dans le domaine (f, k) après application du gabarit ; **(d)** Champ d'ondes M extrait [9]

Le filtrage (f-k) est un filtre linéaire, facile d'utilisation et d'interprétation, et est très peu coûteux en temps de calcul. Cependant, il nécessite un nombre de traces et d'échantillons en temps suffisant et un pas d'échantillonnage en distance régulier, ce qui le rend rarement utilisé car ce n'est pas toujours le cas. Mais l'inconvénient majeur de ce filtre est qu'il ne tient pas compte des caractéristiques temporelles du signal.



Organigramme du filtre (f-k)

III.2. Séparation des champs d'ondes montant et descendant par filtre (f-k)

Afin de bien confirmer l'efficacité et la robustesse de notre algorithme, nous nous proposons de comparer ses résultats avec ceux du filtre (f-k). Pour cela, nous avons développé un algorithme de séparation par le filtre (f-k) sous Matlab 2010a. Le programme peut être appliqué directement sur l'enregistrement sismique ou après alignement du champ à extraire.

Pour cela, on a créé deux fonctions, `fktran` et `ifktran`. La première (`fktran`) calcule la transformée de Fourier rapide (`fft`) de la matrice qui contient l'enregistrement sismique et dans laquelle chaque colonne représente la trace sismique. Cette fonction envoie comme résultat le contenu fréquentiel de la matrice d'entrée. Après une mise à zéro des fréquences non désirées après filtrage, on fait appel à la seconde fonction (`ifktran`) qui permet de calculer la transformée de Fourier inverse des résultats de la transformée `fktran` filtrées.

La transformée (f-k) de l'enregistrement synthétique PSVS (Fig.III.3a) est représentée sur la figure (Fig.III.3b). On voit bien la distribution fréquentielle des champs d'ondes montant et descendant dans le plan (f, k) ; les ondes montantes de vitesse apparentes négatives sont présentes dans le quadrant des fréquences spatiales négatives tandis que les ondes descendantes de vitesse apparentes positives se trouvent dans le quadrant des fréquences spatiales positives.

Le champ d'ondes montant est obtenu par la mise à zéro des fréquences spatiales positives (Fig.III.3c), puis application de la transformée (f-k) inverse sur les autres coefficients. Le résultat est affiché sur la figure III.3d. Quant au champ d'ondes descendant, il est obtenu par la mise à zéro des fréquences spatiales négatives (Fig III.4c) puis application de la transformée (f, k) inverse sur les coefficients restants (Fig.III.4d).

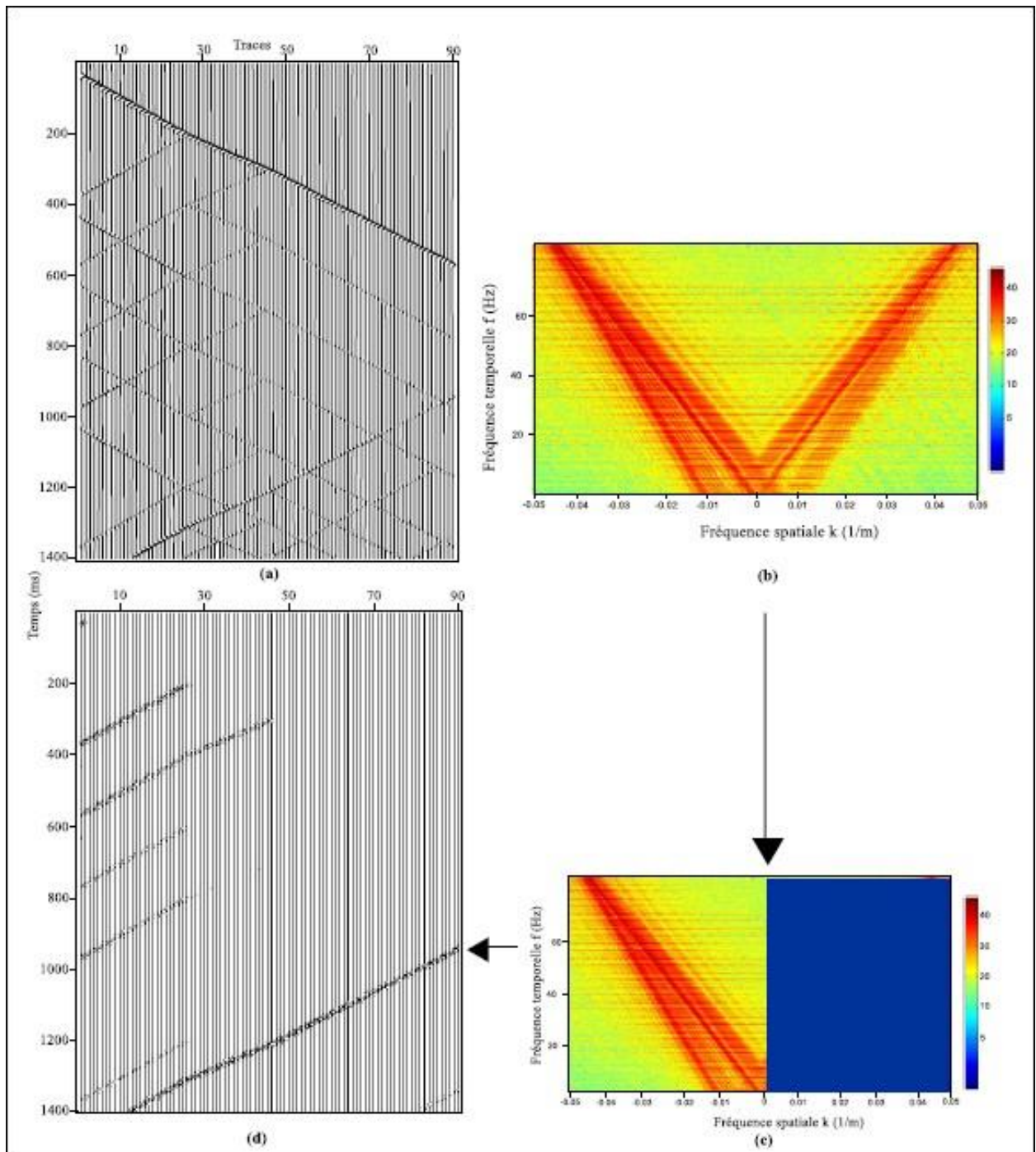


Figure III. 3 : Extraction des ondes montantes du PSVS par filtrage (f-k) : **(a)** Enregistrement PSVS ; **(b)** Domaine (f, k) associé ; **(c)** Mise à zéro des coefficients correspondant aux ondes descendantes ($0 \leq k \leq 0.05$) ; **(d)** Ondes montantes extraites.

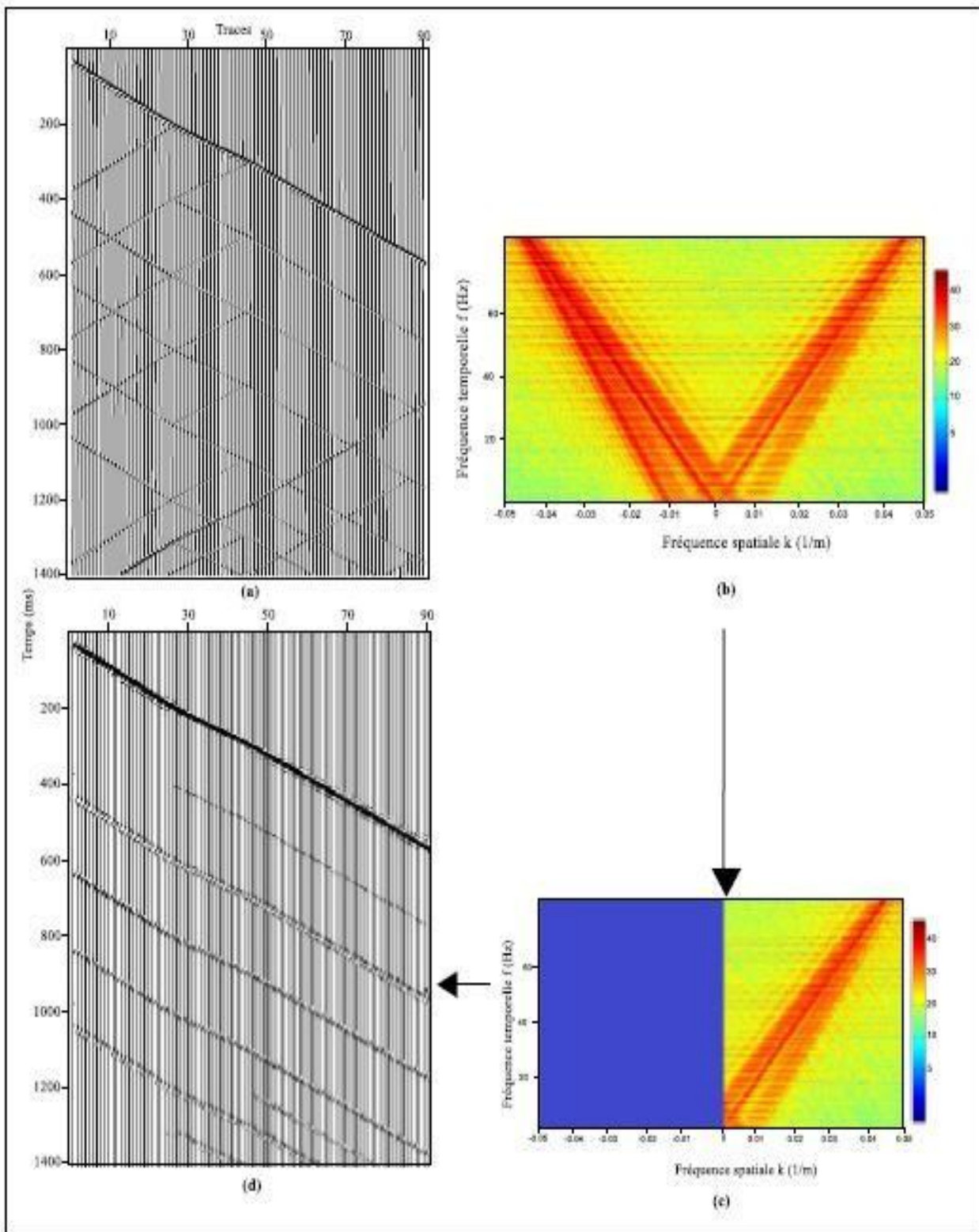


Figure III. 4 : Extraction des ondes descendantes du PSVS par filtrage (f-k) : (a) Enregistrement PSVS ; (b) Domaine (f, k) associé ; (c) Mise à zéro des coefficients correspondant aux ondes montantes ($-0.05 \leq k \leq 0$) ; (d) Ondes descendantes extraites.

III.3. Comparaison des résultats obtenus

Les figures III.5 montrent les champs d'ondes montant extraits sans et avec bruit par les filtres médian et (f-k), successivement. ; Tous les évènements montants obtenus après filtrage apparaissent exactement comme sur l'enregistrement initial, avec préservation des amplitudes.

Les évènements montants extraits n'ont subi donc aucune déformation lors de la transformation du plan des paramètres de Hough vers le plan image.

Les résultats obtenus par le filtre médian montrent une bonne séparation des deux champs d'ondes ; Les résultats obtenus avec le filtre (f-k) sont satisfaisants, même si on peut voir de très faible résidu de l'arrivée directe sur le champ d'onde montant extrait. De plus, il reste du bruit et il y a une perte d'amplitude, ceci est essentiellement dû au lissage spatial.

Une étude spectrale menée sur la trace 50 du PSVS avant et après les deux filtrages, montre que : 1/ le filtre médian préserve aussi le contenu fréquentiel à l'exception des hautes fréquences et des fluctuations importantes des amplitudes spectrales liées aux variations d'amplitude (à cause de la non-linéarité du filtre médian), 2/ l'application du filtre (f-k) génère des fréquences parasites introduites par la TF2D, ce qui représente un inconvénient majeur pour ce filtre.

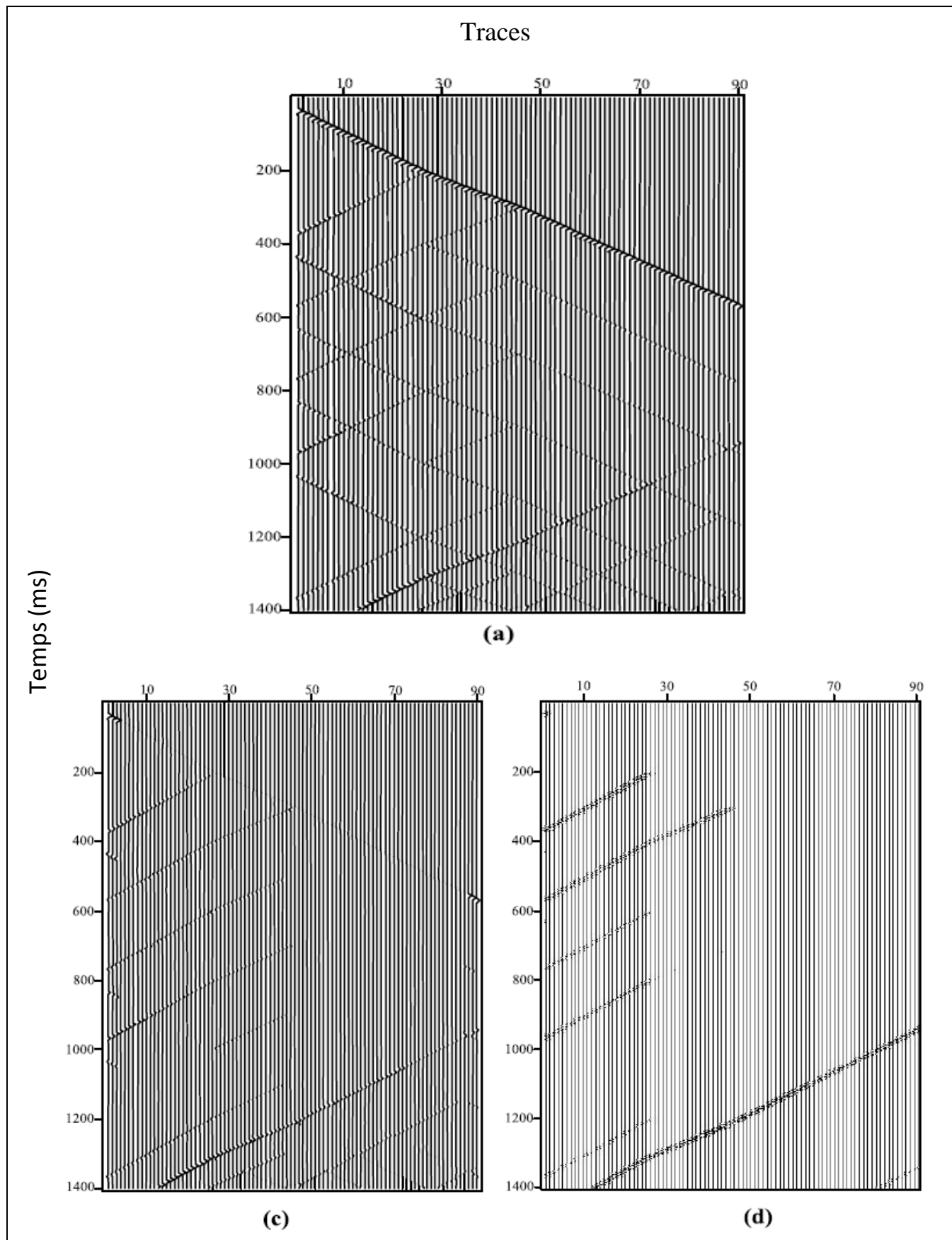


Figure III.5 : Comparaison des résultats obtenus sur le PSVS – Ondes montantes : **(a)** Enregistrement PSVS initial ; **(c)** Ondes montantes extraites par filtre médian ($L=7$) ; **(d)** Ondes montantes extraites par filtrage (f-k) ($0 \leq k \leq -0.005$).

VI. Application de l'algorithme sur des données réelles de type PSV à déport nul

VI.1. Présentation des données PSV réelles utilisées

VI.1.1 Acquisition des données

Les données réelles utilisées dans cette partie sont extraites de la composante verticale d'un PSV à déport nul, acquis par la compagnie "ENAGEO (Algeria)", pour le compte de la SONATRACH /EXPLORATION (Algeria). La source, positionnée à 50 m de la tête du puits, est un vibroseis, générateur d'ondes P et le signal émis est un sweep [8-80] Hz, avec un balayage de 12 s. Les traces, de longueur 300ms, ont été enregistrées avec un pas d'échantillonnage de 2 ms sur 980 côtes et avec un pas de remontée de la sonde variable d'une côte à l'autre. La côte la plus proche de la surface du sol est de 273 m. La plus profonde, associée à la trace 1, est de 3470 m (Fig.VI.1).

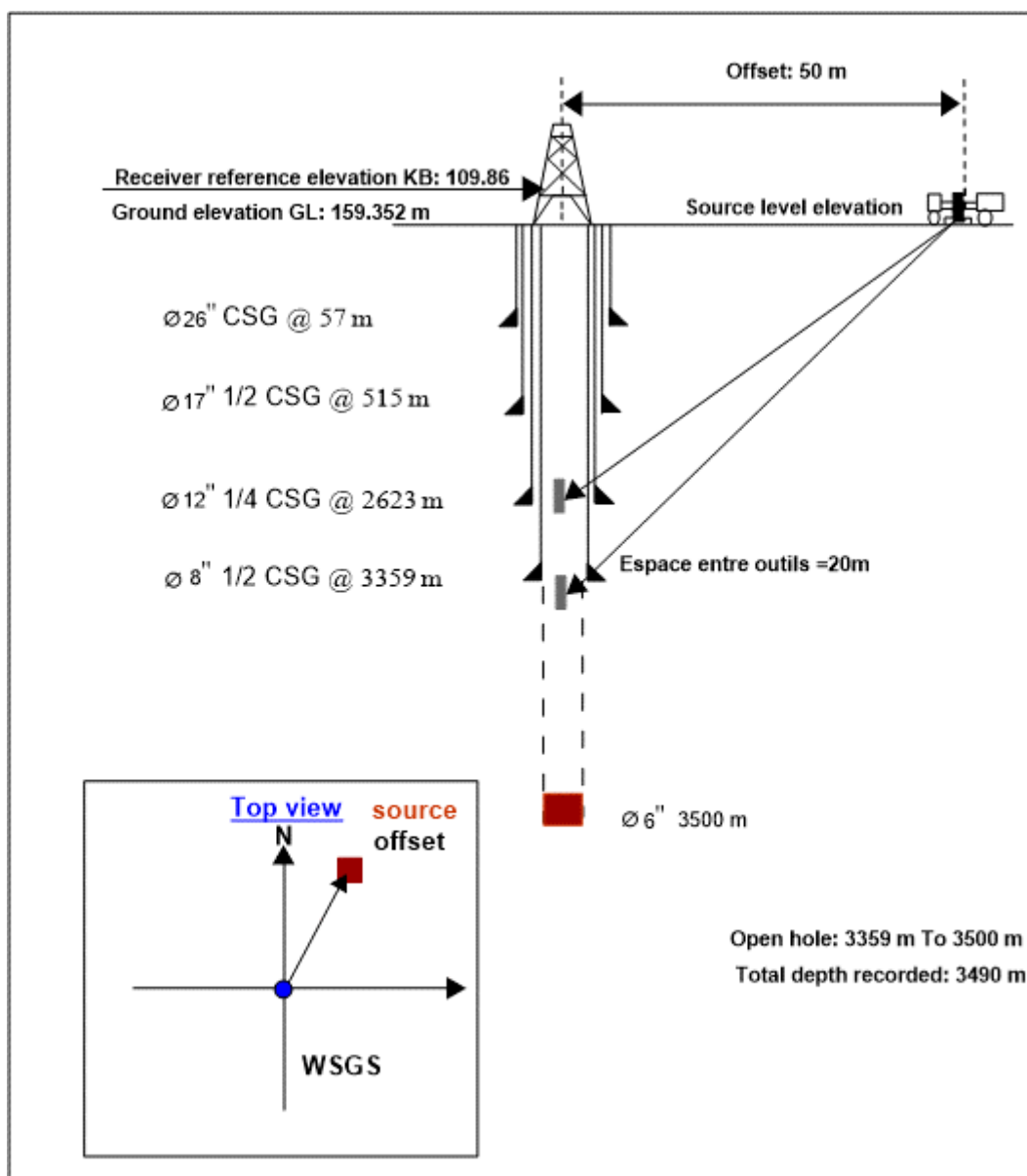


Figure VI.1 : Schéma synoptique de la sonde et dispositif d'acquisition du PSV.

VI.1.2. Prétraitement des données

Les données sismiques sont enregistrées sur un PC puis archivées sur un CD en format MIRF.

Elles sont ensuite transformées en format SEG Y. Les données sont représentées en polarité conforme aux conventions SEG.

La signature temporelle de la source sismique utilisée, ou sweep, est un signal sinusoïdal long dont la fréquence instantanée varie en fonction du temps. Dans le cadre de notre présente étude, le sweep utilisé est linéaire de fréquence [8-80] Hz, c'est-à-dire que la fréquence instantanée varie linéairement au cours de la vibration. Cette méthode implique néanmoins, une étape de prétraitement. Le signal généré étant long, les enregistrements bruts doivent être transformés par une opération qui comprime le long sweep en un pulse court. Cette compression du signal est faite en corrélant le signal enregistré par le signal émis.

Pour chaque niveau d'enregistrement, les données du PSV sont éditées (les traces bruitées sont supprimées) et sommées pour améliorer le rapport signal sur bruit. La figure VI.2 montre les enregistrements (stacks bruts) des composantes verticale (V_z) et horizontales (H_x , H_y).

Les temps des arrivées directes sont pointés et relevés pour calculer les vitesses moyennes, les vitesses quadratiques moyennes et les vitesses d'intervalle. Afin de récupérer les amplitudes réelles qui représentent les coefficients de réflexion, un gain d'expression t_n , avec $n=1.2$, est appliqué pour compenser les pertes par divergence sphérique. Ceci est suivi d'un top mute et un filtre passe bande [8-10 - 70-80] Hz.

Nous pouvons remarquer que le signal utile correspondant aux ondes P est principalement enregistré sur la composante VZ , seule composante prise en considération dans la suite du traitement, et que, sur les composantes horizontales, ne figure que du bruit.

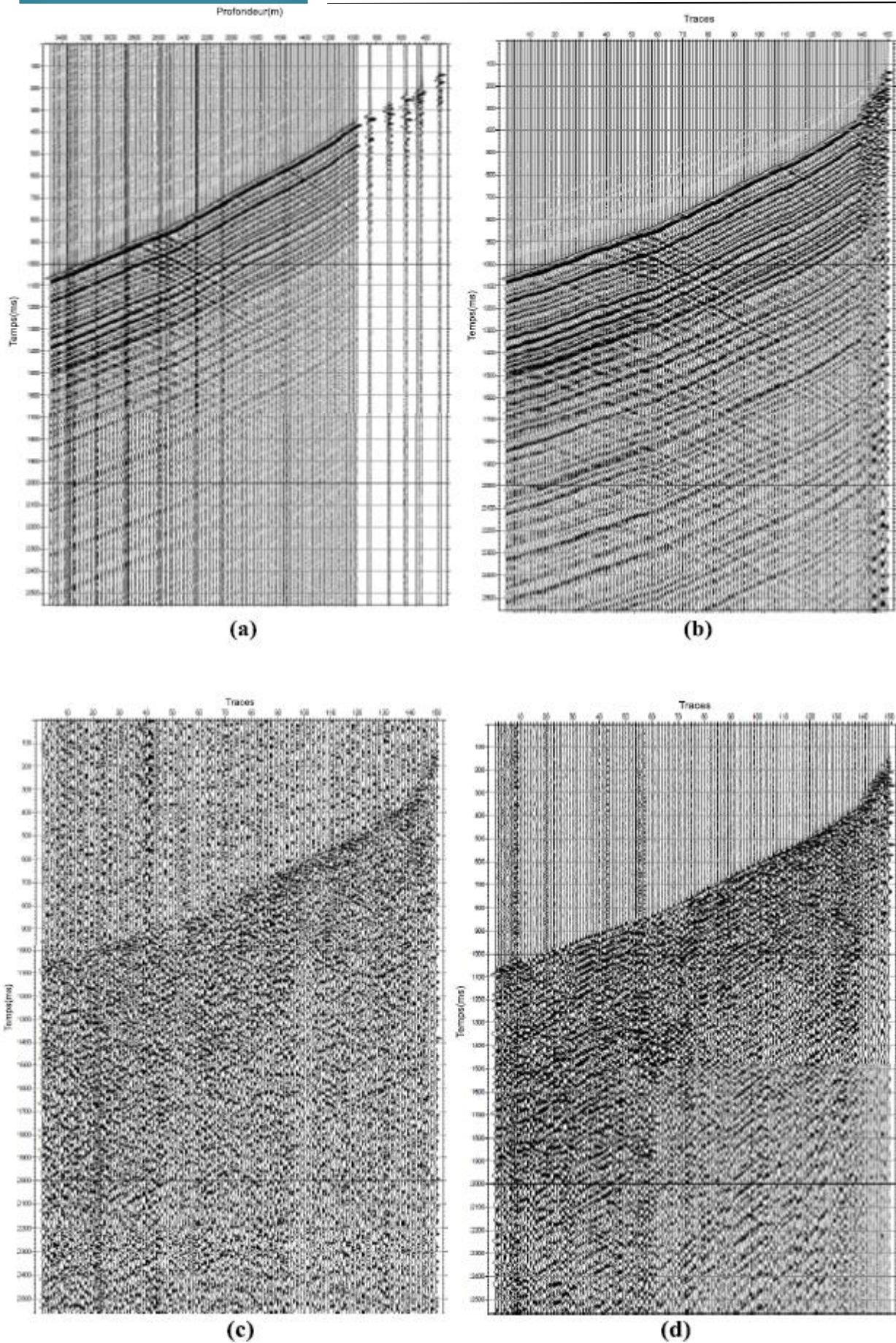


Figure VI.2 : Enregistrement PSV réel : (a) Composante verticale V_z en fonction de la profondeur ; (b) Composante verticale V_z après prétraitement ; (c) Composante horizontale H_x ; (d) Composante horizontale H_y .

IV.1.2. Séparation des champs d'ondes montant et descendant

IV.1.2.1. Séparation des champs d'ondes montant et descendant par filtre médian

Pour extraire les champs d'onde montant et descendant, nous avons besoin de connaître le temps de transit des arrivées premières.

Le champ d'onde montant extrait par le filtre médian de longueur 7, après horizontalisation des ondes montantes (Fig.VI.3a) par ajout des temps de transit des arrivées premières sur l'enregistrement PSV initial (Fig.VI.3c), est composé dans l'ensemble des mêmes événements que ceux après filtrage par médian, mais ici avec de faibles amplitudes, surtout en début de traces (réflexions primaires), ce qui diminue beaucoup de la qualité du corridor stack correspondant (Fig. VI.4), déjà affaibli par la diminution du nombre de traces prises en compte dans la réalisation du corridor stack.

Pour extraire le champ d'ondes descendant, nous avons soustrait le champ d'ondes montant obtenu par filtrage médian (Fig. VI.3c) de l'enregistrement initial avant filtrage (Fig.VI.2a).

Le résultat obtenu est représenté sur la figure ci-dessous.

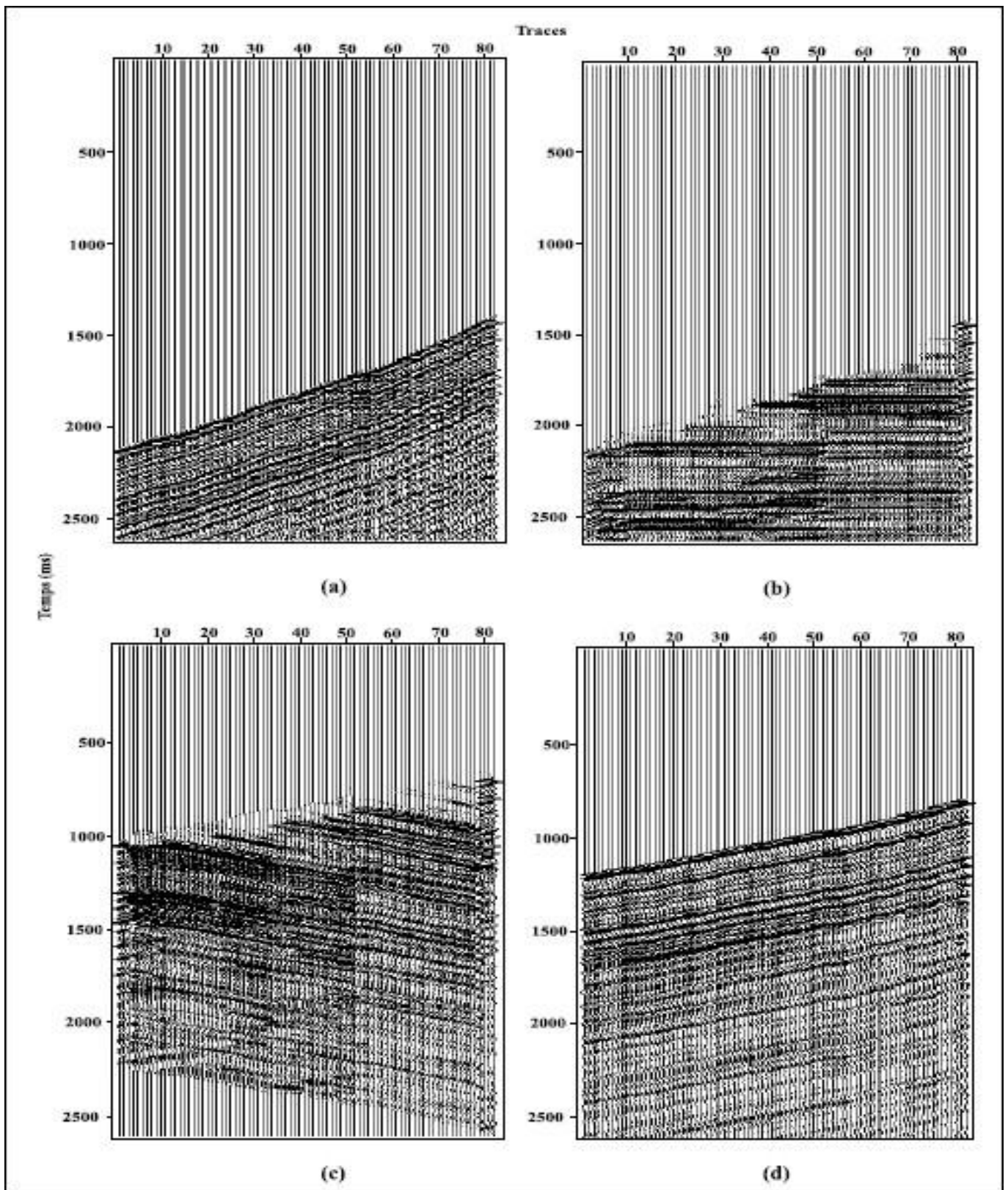


Figure VI. 3 : Extraction des champs d'ondes montant et descendant de la composante Vz du PSV réel par filtre médian : (a) Enregistrement de la composante Vz avec alignement des ondes montantes ; (b) Ondes montante extraites par filtre médian ($L=7$) ; (c) Ondes montantes extraites désalignées ; (d) Ondes descendantes extraites par soustraction des ondes montantes désalignées de l'enregistrement de la composante Vz initiale.

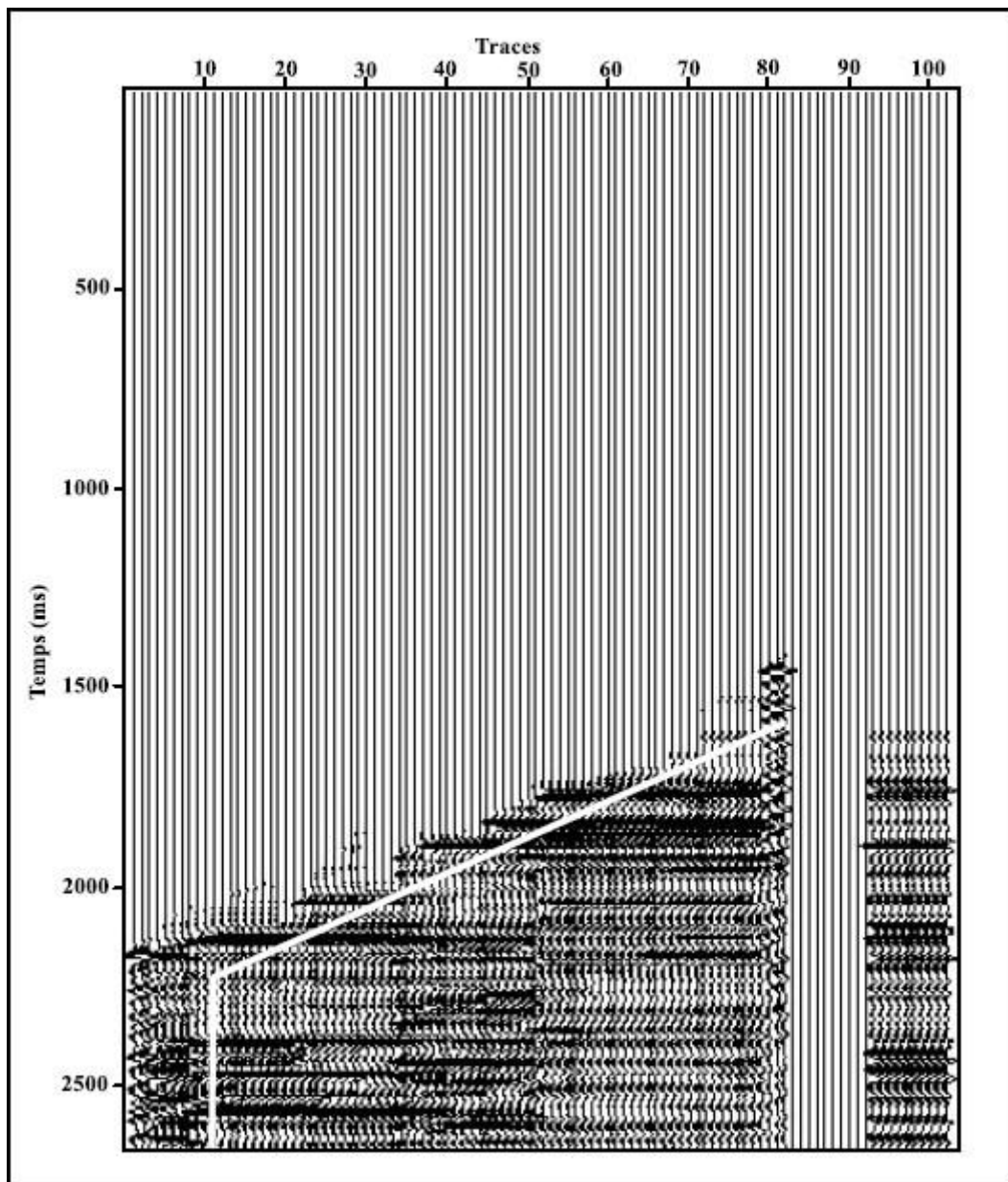


Figure VI. 4 : Enregistrement en ondes montants extraites de la composante Vz du PSV réel par filtre médian (à gauche) et le corridor stack correspondant (à droite). La ligne blanche sur l'enregistrement délimite le couloir de sommation.

VI. 1.2.2. Séparation des champs d'ondes montant et descendant par le filtre (f-k)

La procédure du filtrage par le filtre (f-k) est identique à celle appliquée sur l'enregistrement PSVS ; dans un premier temps, nous avons appliqué la TF2D sur l'enregistrement de la composante Vz du PSV réel (Fig.VI.5). Sur la figure VI.5b, les ondes montantes et descendantes sont séparées : les montantes dans les nombres d'onde k négatifs et les descendantes dans les nombres d'onde k positifs.

L'extraction du champ d'ondes montant est réalisée en ne gardant que les fréquences à nombres d'onde négatifs ($-0.025 \leq k \leq 0$). La transformée inverse permet de reconstruire l'enregistrement filtré. Pour obtenir le champ d'ondes descendant, on procède de la même façon sauf qu'on ne garde, cette fois, que les fréquences à nombres d'onde positifs ($0 \leq k \leq 0.025$).

Les figures VI.5c et d représentent, dans le plan (x, t), respectivement, les champs d'ondes montant et descendant extraits par filtre (f-k) ; le résultat de la séparation est satisfaisant dans l'ensemble. Cependant, des parasites générés par la TF2D viennent affaiblir le rapport signal sur bruit sur l'ensemble de l'enregistrement filtré.

Notons que la séparation des champs d'ondes montant et descendant est réalisée sans alignement des ondes à extraire.

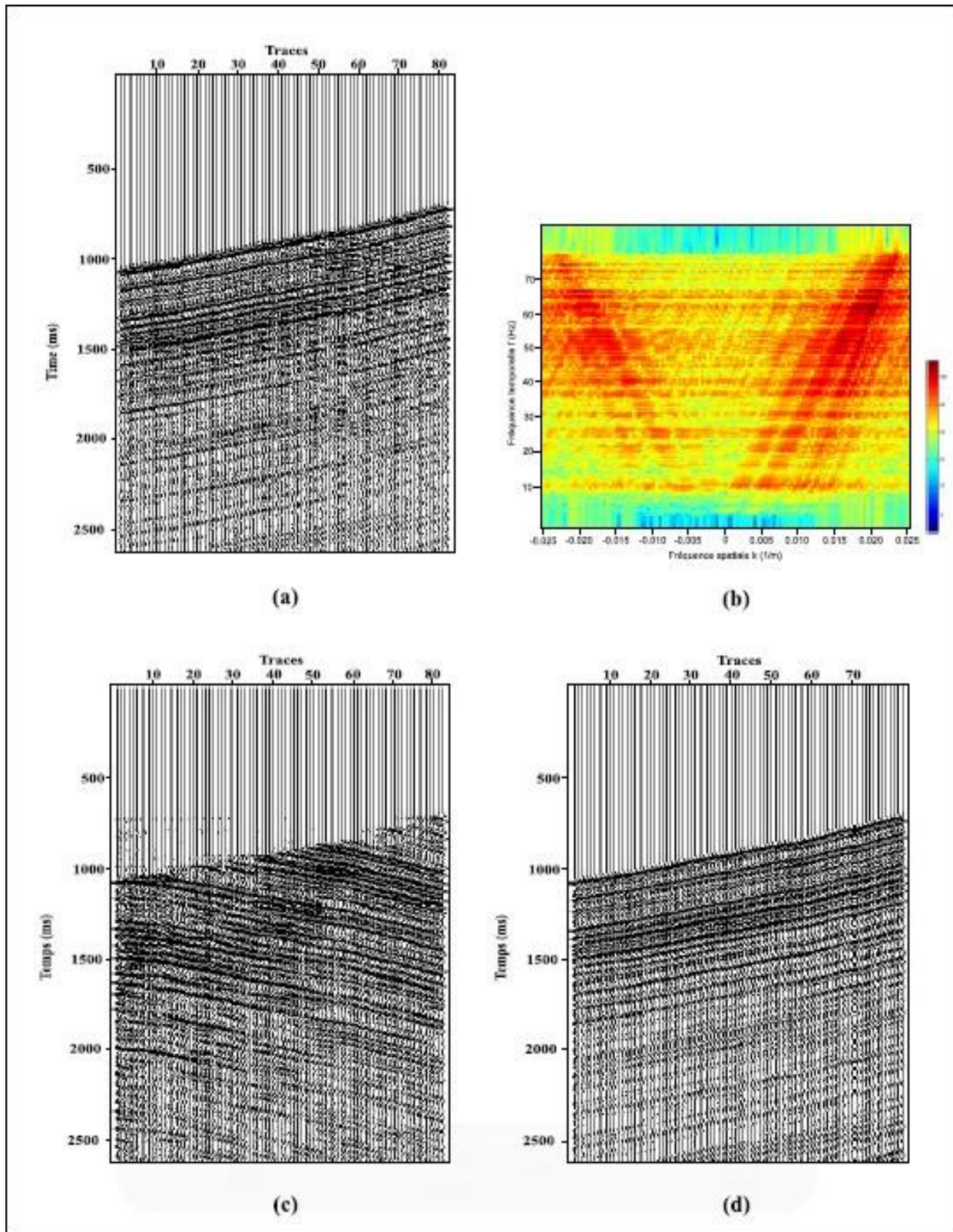
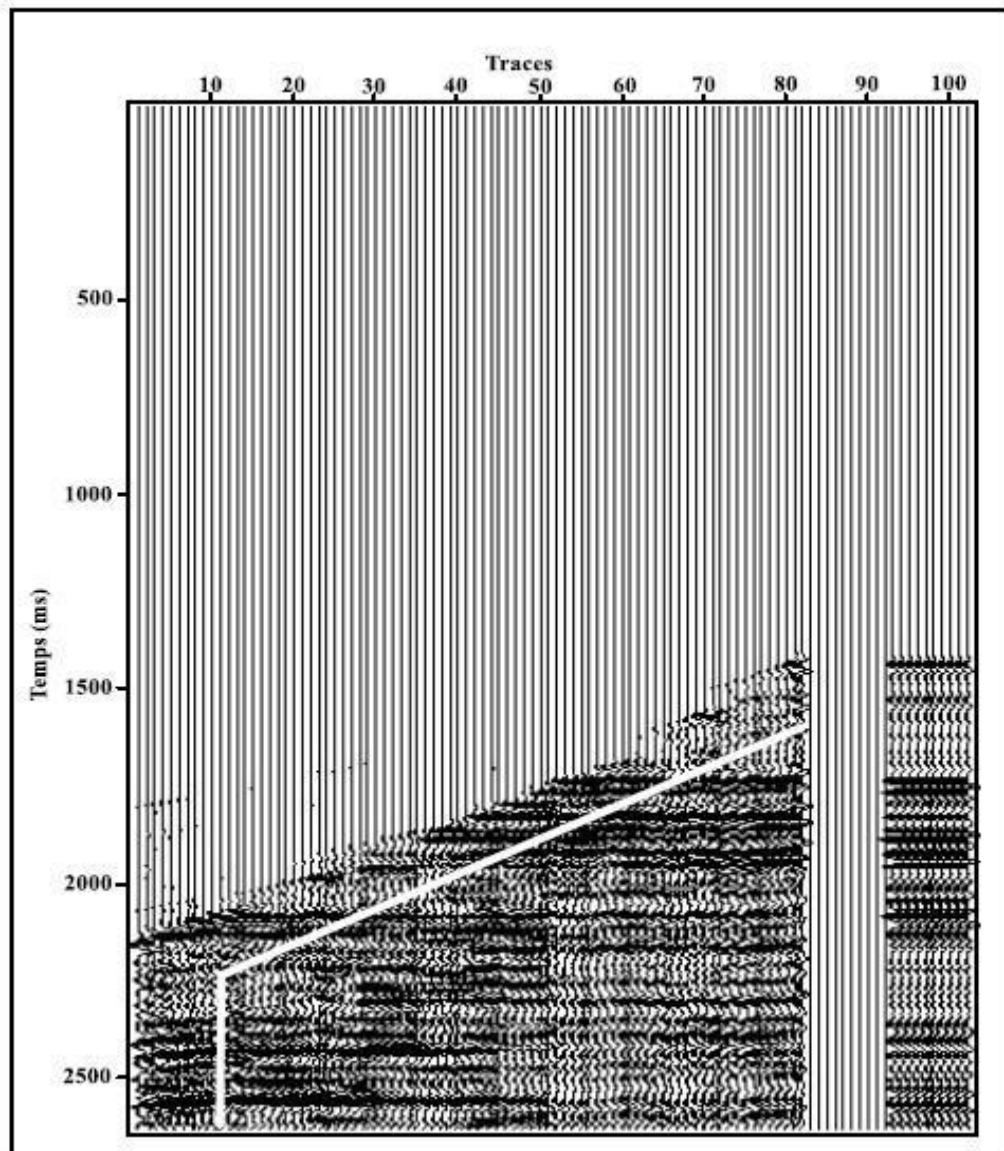


Figure VI.5 : Extraction des champs d'ondes montant et descendant de la composante V_z du PSV rééparé par filtre (f-k) : (a) Enregistrement V_z initial ; (b) Représentation correspondante dans le plan (f, k) ; (c) Ondes montantes extraites après filtrage avec $(-0.025 \leq k \leq 0)$; (d) Ondes descendant extraites après filtrage avec $(0 \leq k \leq 0.025)$.



Figures VI. 6 : Enregistrement en ondes montants extraites de la composante Vz du PSV réel par filtre (f-k) (à gauche) et le corridor stack correspondant (à droite). La ligne blanche sur l'enregistrement délimite le couloir de sommation.

IV.2. Comparaison des résultats obtenus

Afin de bien confirmer et valider les résultats de séparation des champs d'ondes montant et descendant, on compare les différents champs d'ondes montants extraits par les deux filtres, à savoir le filtre médian et le filtre (f-k). Les figures VI.7a et b montrent les champs d'ondes montants extraits par ces derniers ; la séparation par le filtre médian est meilleure, la plus part des évènements montants apparaissent exactement comme sur l'enregistrement PSV initial, mis à part des évènements descendants entre 2100-2600 ms, avec aussi l'effet de bord au début et à la fin du champ extrait et les amplitudes qui ne sont pas les mêmes.

Les résultats obtenus avec le filtre (f-k) sont satisfaisants même si on peut voir de très faibles résidus de l'arrivée directe sur le champ d'onde montant extrait. De plus, comme pour les données synthétiques, du bruit persiste et il y a une perte d'amplitude, du essentiellement au lissage spatial.

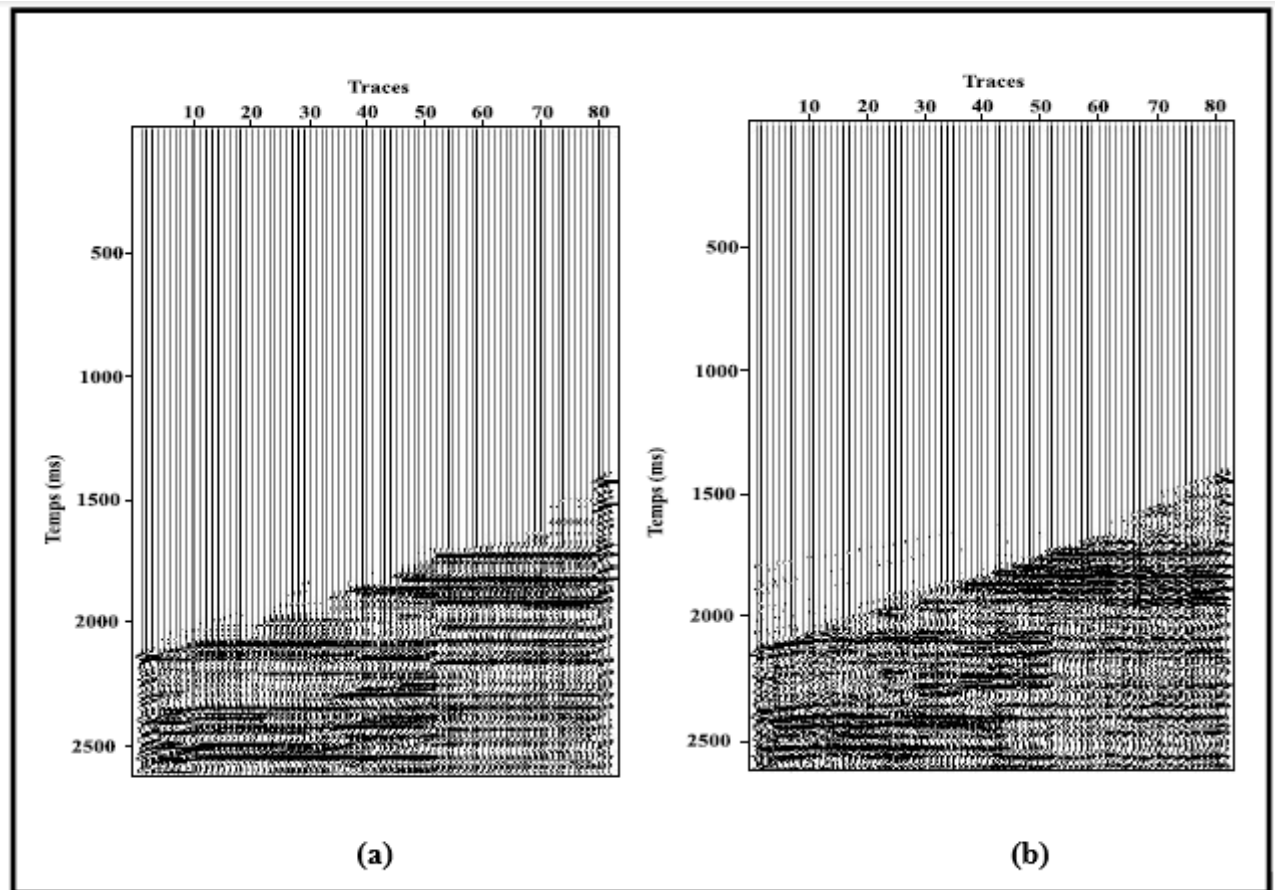


Figure VI.7 : Comparaison des résultats obtenus sur l'enregistrement PSV réel : (a) Ondes montantes alignées extraites du PSV réel par filtre médian ($L=7$) ; (c) Ondes montantes alignées extraites du PSV réel par filtrage (f-k) ($0 \leq k \leq 0.025$).

L'analyse spectrale des résultats obtenus sur la trace 62 du PSV réel (Fig.VI.8), avant et après filtrages, nous montre que le spectre après filtrage par le filtre median est celui qui se rapproche le plus du contenu initial, mis à part pour les fréquences inférieures à 10 Hz qui ont disparu sur cet intervalle de fréquences et qui seraient en majorité attribuées à du bruit qui se trouve dans l'enregistrement PSV initial (Fig.VI.8b, c).

Ce qui n'est pas le cas du filtre (f-k) ; le contenu fréquentiel est conservé, avec les basses fréquences qui persistent, montrant que ce filtre n'améliore pas le rapport signal sur bruit.

À partir de ces résultats obtenus lors de la séparation des champs d'ondes montant et descendant dans un enregistrement PSV réel, on peut noter que le filtrage par le filtre médian donne les meilleurs résultats.

En pratique, l'extraction du champ d'onde montant est délicate à cause de leur faible énergie, le filtre médian permet, malgré ça, d'extraire tous les évènements montants dans leur position exacte, sans altérer ou changer leurs contenus fréquentiels, contrairement au filtre (f-k).

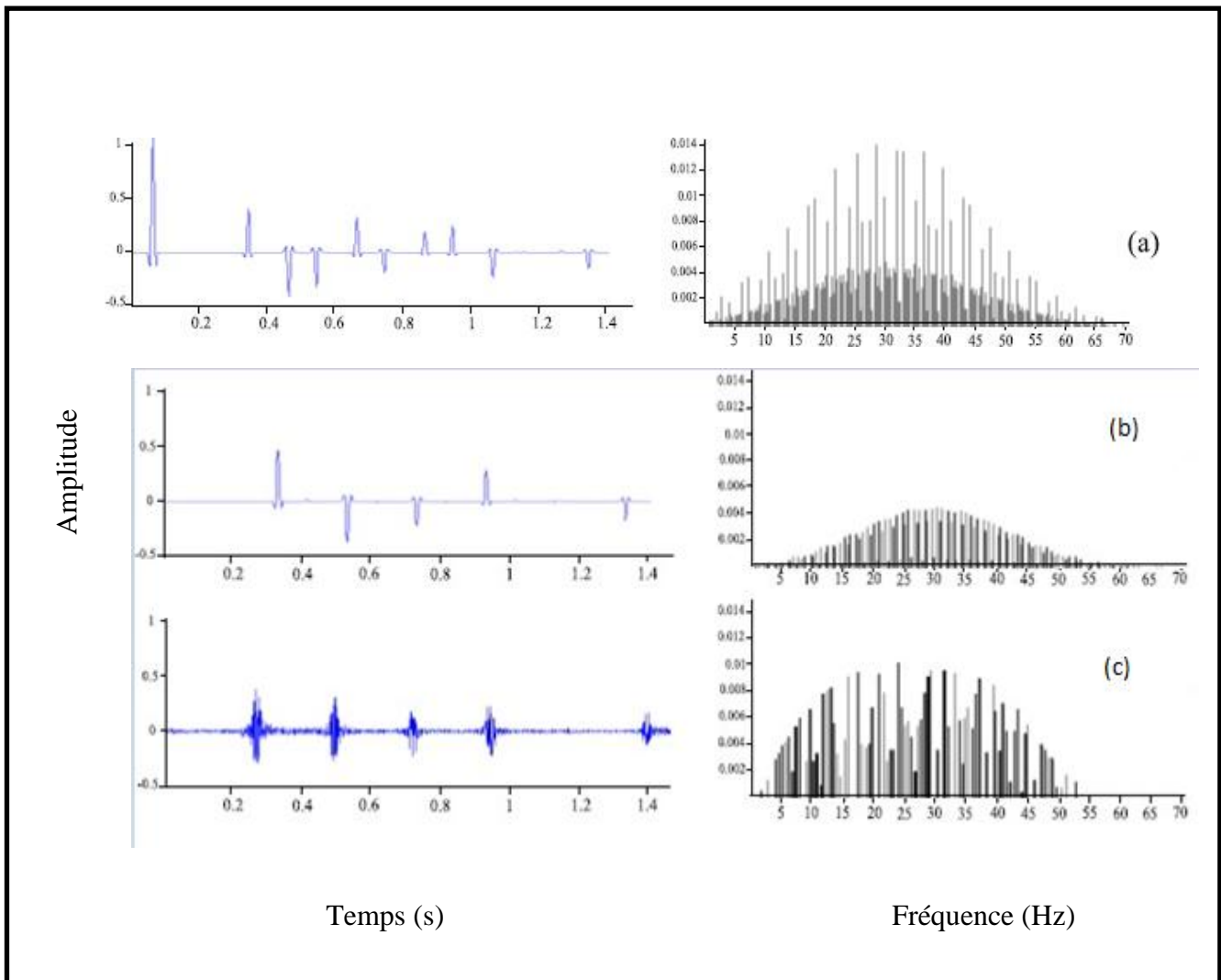


Figure VI.8 : Effets des filtrages médian et (f-k) sur les spectres de fréquences. Exemple de la trace 50 - Enregistrement et spectre correspondant de : **(a)** Trace 50 du PSVS Fig.II.6a ; **(b)** Trace 50 du champ d'ondes montant Fig.II.8d extrait par filtrage médian ($L=7$) ; **(c)** Trace 50 du champ d'ondes montant Fig.III.3d extrait par filtrage (f-k).

IV.3. Calage avec la section sismique de surface

Comme nous l'avons déjà noté dans le chapitre I de cette thèse, parmi les principales applications du PSV, figure le calage des données de puits avec celles de la sismique de surface. Le PSV constitue un moyen de calage des enregistrements de la sismique réflexion de surface au niveau du puits, ce qui permet l'identification assez précise en profondeur des horizons sismiques. La figure VI.9 représente la section sismique relative au profil passant par le puits où a été effectué le PSV considéré ci-dessus.

Cette section, d'assez bonne qualité, montre de nombreux horizons sismiques ou évènements. Le calage du corridor stack issu du PSV permettra de les identifier.

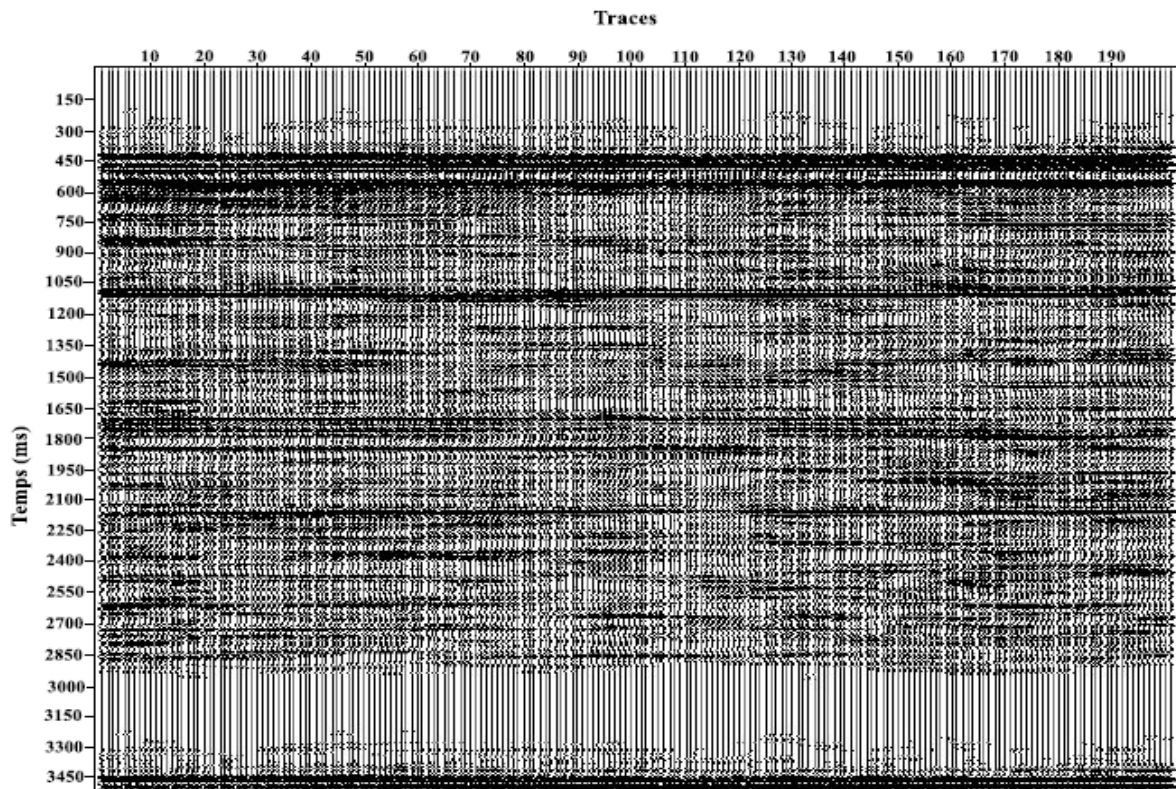


Figure VI. 9 : Section sismique de surface passant par le puits où est réalisé le PSV réel considéré dans cette étude.

La figure VI.10 représente le calage des traces sommes PSV obtenues avec les deux méthodes (médiann et (f-k)), sur la trace correspondant au CDP 2739 de la section sismique qui passe par le puits relatif au PSV étudié.

Le tableau VI.1 donne les profondeurs mètres et temps des toits des formations traversées par le puits. Ces profondeurs vont permettre d'identifier les différents horizons sur les corridors stacks puis, grâce à ces derniers, sur la section sismique (Fig.VI.10).

La figure VI.10 représente le calage des traces sommes PSV obtenues avec les deux méthodes (médian et (f-k)), sur la trace correspondant au CDP 2739 de la section sismique qui passe par le puits relatif au PSV étudié.

Le tableau VI.1 donne les profondeurs mètres et temps des toits des formations traversées par le puits. Ces profondeurs vont permettre d'identifier les différents horizons sur les corridors stacks puis, grâce à ces derniers, sur la section sismique (Fig.VI.10).

Le corridor obtenu par le filtre médian permet d'identifier presque tous les horizons sur la section sismique de surface : les tops du Turonien et du Cénomaniens sont très bien soulignés. Des horizons comme les tops de l'Aptien et du Barremien, qui ne se voyaient presque pas sur la section sismique, sont bien visibles sur cette trace somme. Les horizons sismiques des toits des formations du Néocomien, Malm, Dogger argileux, Dogger lagunaire, Lias LD1, Lias Argileux et Trias Roches Eruptives sont aussi bien identifiés sur la section sismique de surface.

Par contre, ils sont plus difficiles à identifier sur les corridors obtenus par le filtre (f-k) ; les tops de l'Albien, Néocomien, Dogger lagunaire et Lias LD1 n'apparaissent pas sur le corridor stack relative au filtre médian et les tops de l'Aptien et du Barremien ne se voient pas sur le corridor stack relative au filtre (f-k).

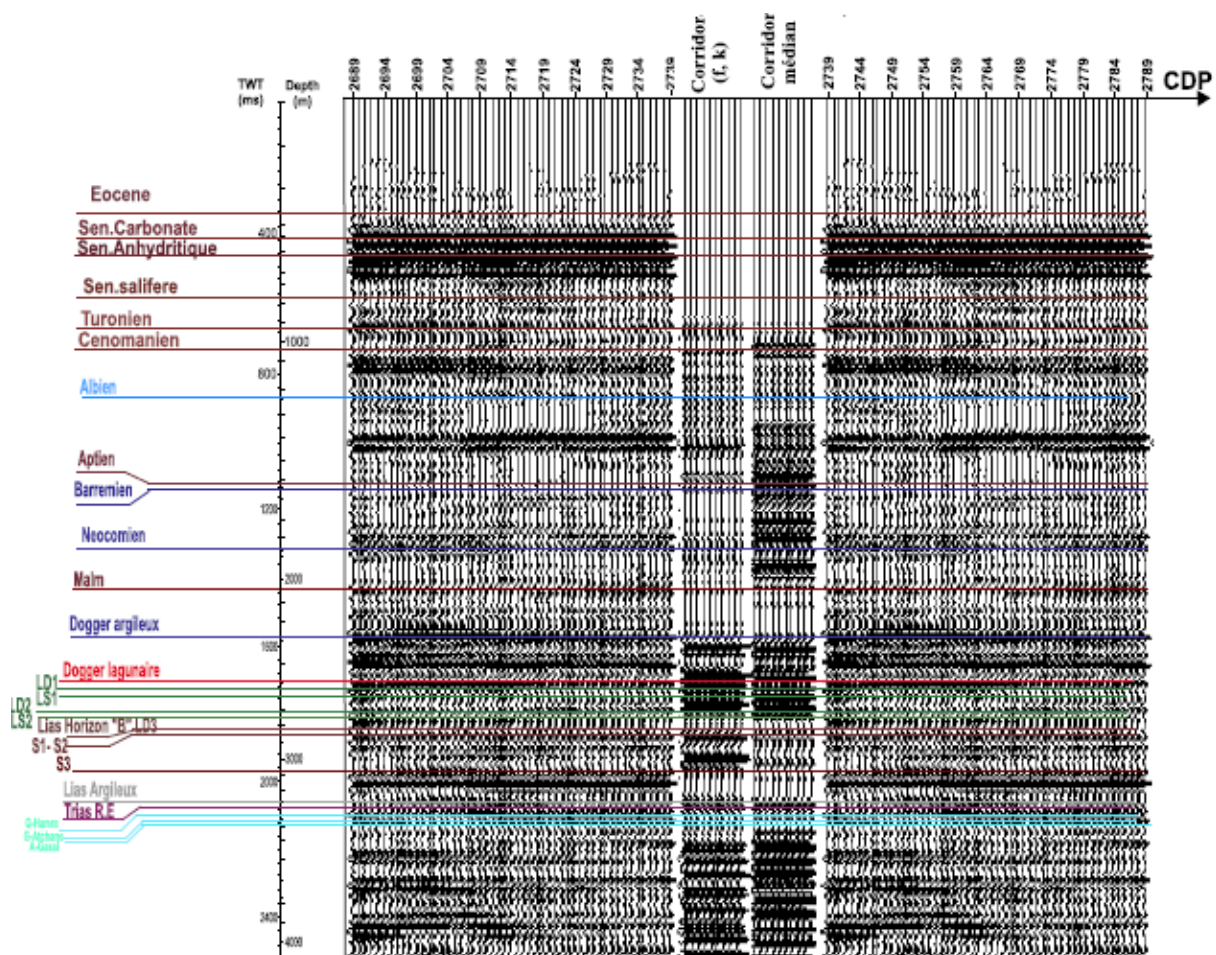


Figure VI. 10 : Calage des corridors stacks obtenus par les deux méthodes de séparation d'ondes sur la composante Vz du PSV réel et identification des horizons sur la section sismique passant par le puits d'acquisition du PSV au CDP 2739.

Conclusion Générale

Dans cette étude, nous avons élaborés deux techniques de filtrage, à savoir le filtre médian et le filtre (f-k). le filtre médian à, donné des bons résultats par apport au filtre (f-k), ce filtre permet une excellente séparation des ondes montantes et descendantes d'un profil sismique vertical et offre les avantages suivants :

- Il ne nécessite pas un pas d'échantillonnage régulier entre les différents niveaux d'enregistrement,
- Les bruits sont automatiquement atténués,
- Le bon choix de la longueur de la fenêtre qui dépend cependant de la qualité des données sismiques, donne une très bonne séparation des ondes. Néanmoins, il présente aussi l'inconvénient suivant :
Il ne conserve pas exactement les amplitudes,

Quand il s'agit de filtrage par l'algorithme (f-k); Ce filtrage permet une bonne séparation des ondes montantes et descendantes d'un profil sismique vertical et offre les avantages suivants :

- L'horizontalisation des ondes à extraire n'est pas obligatoire avant d'effectuer le filtrage
- Les bruits sont automatiquement atténués.

Les résultats obtenus après le filtrage donnent une bonne séparation des ondes. Néanmoins, il présente aussi les inconvénients suivants :

- Il nécessite un pas d'échantillonnage constant,
- Il ne conserve pas exactement les amplitudes.

La trace somme obtenue avec le filtre médian a montré une forte corrélation avec la sismique de surface par apport à celle obtenue avec le filtre (f-k) ; on peut y identifier la majorité des horizons sismique ce qui nous facilite l'interprétation des données sismique.

Ce travail, qui nous a permis d'approfondir nos connaissances en traitement des données sismique ainsi qu'en informatique, nous a menées vers quelques recommandations intéressantes :

- Application de ces filtres sur des sections PSVO .

Références bibliographiques

- [1]: Mari, J. L., Coppens, F., 2000. Sismique de puits, Editions Technip.
- [2]: (Hardage, 1993).
- [3]: Hardage, 1993 ; Mari, J. L, Coppens, F., 1989. La sismique de puits. Première partie : le profil sismique vertical. Principes de base, applications et mise en oeuvre. Revue de l'Institut Français duPétrole 44(2): 135-160.
- [4]: Hardage, 1993 ; Chapellier, D., Mari, J. L., 2000. Principes de base. Cours [online] de géophysique,université de Lausanne & Institut français du pétrole.
- [5]: Mari, J. L., Coppens, F., 2000. Sismique de puits, Editions Technip.; Hardage, 1989.
- [6]: Mari, J. L., Coppens, F., 2000. Sismique de puits, Editions Technip.; Hardage, B. A., 2000. Vertical seismic profiling, principles. Third updated and revised edition.
- [7]: Telford, M., Geldart, P., Sherief, R., 1976. Prospection géophysique (Tome1). Edition ERG,Cambridge.
- [8]: (Mari, 2000).
- [9]: Mari, J. L., Glangeaud, F., Coppens, F., 2001. Traitement du signal pour géologues et géophysiciens.Prospection sismique, Editions Technip, volume 1. Paris.
- [10]: Mari et al., 1997 ; Mari, J. L., Coppens, F., 2000. Sismique de puits, Editions Technip.
- [11]: Mari, J. L., Glangeaud, F., Coppens, F., 2001. Traitement du signal pour géologues etgéophysiciens. Prospection sismique, Editions Technip, volume 1. Paris.
- [12]: Dillon, P. B., Collyer, V. A., 1985. On timing the VSP first arrival. Geophysical Propsecting, 33:1174-1194.; Mari, J. L., Coppens, F., 2000. Sismique de puits, Editions Technip.
- [13]: Hardage, 1999 ; Chapellier, D., Mari, J. L., 2000. Principes de base. Cours [online] de géophysique,université de Lausanne & Institut français du pétrole.
- [14]: Mari, J., Glangeaud, F., Coppens, F., 1999. Wave Separation by an Oblique Polarization. 1st International Symposium on Physics in Signal and Image Processing (PSIP99). Paris : 94- 100.; Hardage, B. A., 2000. Vertical seismic profiling, principles. Third updated and revised edition.
- [15]: Le Gall, 2006. Integration, Probability and Random Processes. ENS course 248p.
- [16]: Hardage, B. A., 1985. Vertical seismic profiling. The Leading Edge 4(11): 59-59.
- [17]: Duncan, G., Beresford, G., 1995. Median filter behavior with seismic data. Geophysical prospecting43(3): 329-345.; Mari, J. L., Glangeaud, F., Coppens, F., 2001. Traitement du signal pour géologues et géophysiciens. Prospection sismique, Editions Technip, volume 1. Paris.

Références bibliographies

- [18]: Taneja, H. C., 2008. Fourier integrals and Fourier transforms. Advanced Engineering Mathematics. New Delhi, India.
- [19]: Embree, P., Burg, J. P., 1963. Wide-band velocity Filtering. The pie-slice process, geophysics(28):948-974.
- [20]: Chen, C. M., Simaan, M. A., 1991. Velocity Filters for multiple interferences in two dimensional geophysical data. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing 4(29): 563-570.; Hanna, M. T., 1988. Velocity filters for multiple interference attenuation in geophysical array data. Geoscience and Remote Sensing 26(6): 741-748.
- [21]: Suprajitno, M., Greenhalgh, S. A., 1985. Separation of upgoing and downgoing waves in vertical seismic profiling by contour slice filtering. Geophysics 50(6): 950- 962.
- [22]: Mars, M., 1988. Séparation d'ondes. Thèse de Doctorat de 1^{er} Institut National Polytechnique, Grenoble.