



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة أمحمد بوقرة ببومرداس
University M'hamed Bougara of Boumerdes
كلية المحروقات والكيمياء
Faculty of Hydrocarbons and Chemistry



Département : Génie Parasismique, Géophysique et Phénomène Aléatoire.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hydrocarbure.

Spécialité : Géophysique Pétrolière.

Thème

**Traitement d'un Profil Sismique Vertical Zéro Offset et
Calage avec la Sismique de Surface : Approche Appliquée sur
PROMAX dans la région Amguid-Messaoud,
Grand Touggourt.**

Présenté par :

**KAMLI Aya
AIT ABDALLAH Zahra**

Devant le jury composé de :

Pr. ALIOUANE Leila	Professeur	UMBB	Président
Pr. DJEDDI Mabrouk	Professeur	UMBB	Examineur
Pr. ELADJ Said	Professeur	UMBB	Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

Dédicaces

Louange à Dieu, Le Très-Haut, Le Sage, à Lui reviennent la gratitude éternelle et les louanges infinies. C'est par Sa miséricorde, Sa guidance et Sa force que j'ai pu franchir chaque étape de ce parcours.

À ma douce maman, ton amour pur, tes prières dans le silence de la nuit, ta tendresse infinie... Tout cela m'a portée bien plus que les mots ne peuvent le dire Que Dieu te protège et t'élève dans ce monde et dans l'au-delà.

À mon père bien-aimé, merci pour ta patience, ta foi en moi et ton soutien discret mais solide. Tu es un modèle de sagesse et d'endurance. Que Dieu te comble de Ses bienfaits.

À mes deux frères, merci pour vos encouragements, vos sourires sincères et votre présence rassurante. Votre affection a toujours été un soutien dans les moments de doute.

À mon binôme, merci pour ta collaboration, ton implication, ton sérieux et ton soutien tout au long de ce travail. Nous avons traversé les moments difficiles ensemble avec détermination et respect. Ce mémoire est aussi le fruit de ton engagement, et je t'en remercie du fond du cœur.

À mes enseignants et encadrants, merci pour votre accompagnement, vos conseils éclairés et votre bienveillance. Votre savoir et votre dévouement ont marqué mon parcours.

À mes amis sincères, merci pour votre présence apaisante, vos mots qui réconfortent et vos encouragements qui ont souvent fait la différence.

Et enfin, **à moi-même**, pour avoir tenu bon malgré les tempêtes, pour avoir persévéré dans le silence et la fatigue, et pour avoir cru, même faiblement, que tout cela en valait la peine. Je suis fière de la femme que je deviens.

Ce mémoire est l'aboutissement d'un long chemin tissé de foi, de labeur, de gratitude et d'amour.

KAMLI Aya

Dédicaces

Louange à Dieu, le Très Haut, source de toute sagesse et de toute force, pour m'avoir guidé et soutenu tout au long de ce parcours.

À mes chers parents, Maman, Papa, vous êtes mes piliers, mes repères et mon refuge. Merci pour votre amour immense, vos sacrifices silencieux et votre foi en moi, même quand moi-même j'en doutais. Ce travail est le fruit de votre patience et de vos prières.

À mes merveilleuses sœurs, Merci pour votre tendresse, vos mots rassurants et votre présence lumineuse dans ma vie. Vous êtes bien plus que des sœurs, vous êtes mes confidentes et mes alliées.

À mon binôme, Merci pour ta solidarité, ton écoute, ta bonne humeur et ta motivation inépuisable. Ce mémoire n'aurait pas été le même sans cette belle collaboration.

À mes collègues, compagnons de route dans les moments de doute comme dans les éclats de rire.

À tous mes enseignants, Merci pour votre accompagnement, vos conseils et l'inspiration que vous nous transmettez. Votre passion pour l'enseignement a laissé une empreinte durable sur mon parcours.

À tous les ingénieurs de Sonatrach département géophysique, pour leur savoir transmis avec passion, et leur encadrement si précieux et pour leur disponibilité, leur accueil et leur professionnalisme inspirant.

Et à moi-même, pour n'avoir jamais abandonné, même lorsque le chemin semblait trop long. Pour la patience, les nuits blanches, les efforts et la foi en mes capacités.

À chacun de vous, un merci du fond du cœur. Ce mémoire est aussi un peu le vôtre.

AIT ABDALLAH Zahra

Remercîments

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, notre Créateur, pour la force, la patience et la persévérance qu'il nous a accordé tout au long de cette expérience.

Nous exprimons notre sincère gratitude à notre encadreur de mémoire Monsieur **S.ELADJ** pour son encadrement éclairé, ses conseils pertinents et son soutien constant tout au long de cette recherche. Sa expertise et son expérience ont été des atouts précieux pour la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives qui nous permettront d'améliorer nos compétences et nos connaissances.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux Messieurs Chefs de département Géophysique Sismique **A.ZERIRI** et **Y.HAMDAOUI**, pour leur soutien constant, leurs encouragements, la mise à disposition des moyens nécessaires, ainsi que pour leur accompagnement attentif tout au long de notre formation.
Merci infiniment, Messieurs.

Nous tenons à adresser un grand merci aux Messieurs **A.GACEM** et **F.GHELLOUDJ**, pour leur bienveillance, leur soutien permanent, leur assistance à chaque étape, ainsi que pour leurs encouragements et leurs conseils précieux. Mille merci à vous.

Nous remercions chaleureusement les ingénieurs de Sonatrach département de géophysique **B.BOUABDA**, **A.GHAFFAR**, **T.METTAH**, **A.HAMIDI**, **D.BOUSSOUF**, **S.BENBROUK** et **H.BAALI** pour leur accueil, leurs conseils et leur soutien durant toute la période de stage.

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux enseignants du département géophysique pour leurs aides et orientations durant notre formation.

Nous remercions nos familles et nos proches pour leur soutien indéfectible et leur compréhension. Leur encouragement et leur amour ont été des facteurs clés de notre motivation et de notre détermination.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Qu'elles trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Résumé :

Le mémoire intitulé "**Traitement d'un Profil Sismique Vertical Zéro Offset et Calage avec la Sismique de Surface : Approche Appliquée sur PROMAX dans la région Amguid-Messaoud, Grand Touggourt**" présente une étude approfondie de la méthode géophysique du Profil Sismique Vertical (PSV) zéro offset, essentielle pour l'exploration pétrolière. Cette technique, caractérisée par une source sismique placée à proximité de la tête de puits, permet un trajet d'onde quasi vertical, facilitant ainsi la calibration précise des temps de réflexion avec les profondeurs réelles des formations géologiques. Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux : le premier expose les fondements théoriques du PSV zéro offset, ses principes physiques, configurations d'acquisition et problématiques liées aux bruits et ondes parasites ; le deuxième détaille la chaîne de traitement des données, incluant le prétraitement, la séparation des ondes par divers filtres (notamment le filtre médian qui surpasse la transformation de Karhunen-Loeve), l'imagerie sismique et le calage avec la sismique de surface ; le troisième chapitre applique ces méthodes à des données réelles du puits AZ-1 en Algérie, traitées sous PROMAX et comparées favorablement aux résultats obtenus par ENAGEO avec VSPROWESS. Les conclusions soulignent la fiabilité du PSV zéro offset pour la calibration sismique et l'identification des réservoirs, la supériorité du filtre médian pour la séparation des ondes, ainsi que la cohérence des résultats entre les deux logiciels, tout en recommandant une supervision rigoureuse lors de l'acquisition et une optimisation des paramètres de traitement. Ce travail confirme que le PSV zéro offset, couplé à un traitement adapté, constitue un outil puissant pour améliorer la résolution et la précision des données sismiques en exploration pétrolière.

Abstract :

The thesis titled "**Processing of a Zero Offset Vertical Seismic Profile and Calibration with Subsurface Seismic: An Applied Approach Using PROMAX to the Amguid-Messaoud Region, Grand Touggourt**" presents an in-depth study of the geophysical method known as the Zero Offset Vertical Seismic Profile (VSP), which is essential for oil exploration. This technique, characterized by a seismic source placed near the wellhead, allows for a nearly vertical wave path, thereby facilitating the precise calibration of reflection times with the true depths of geological formations. The thesis is structured into three main chapters: the first presents the theoretical foundations of the zero offset VSP, its physical principles, acquisition configurations, and challenges related to noise and unwanted waves;

the second details the data processing workflow, including preprocessing, wave separation using various filters (notably the median filter, which outperforms the Karhunen-Loeve transform), seismic imaging, and calibration with surface seismic data; the third chapter applies these methods to real data from the AZ-1 well in Algeria, processed with PROMAX and favorably compared to results obtained by ENAGEO using VSPROWESS. The conclusions highlight the reliability of the zero offset VSP for seismic calibration and reservoir identification, the superiority of the median filter for wave separation, as well as the consistency of results between the two software packages, while recommending rigorous supervision during acquisition and optimization of processing parameters. This work confirms that the zero offset VSP, coupled with appropriate processing, is a powerful tool to improve the resolution and accuracy of seismic data in oil exploration.

Table des matières :

Introduction Générale :	1
Chapitre I : Généralités sur le PSV zéro offset.	
I. Introduction :	3
I.1. Généralités sur la sismique réflexion et la sismique réfraction :	3
I.1.1. Sismique réflexion :	4
I.1.2. Sismique réfraction :	5
I.2. Configuration des différents types de sismique de puits:	6
I.2.1. Sismique de puits à puits :	7
I.2.2. Tirs en puits :	7
I.2.3. Tirs en surface	8
• Choix de la méthode en fonction des objectifs :	9
I.3. Mise en œuvre et matériel utilisé :	10
I.3.1. Le puits :	10
I.3.2. Le câble :	10
I.3.3. Le système de réception :	10
I.3.4. La source sismique :	11
I.3.5. La sonde signature :	11
I.3.6. Le laboratoire d'enregistrement des données sismiques :	12
I.4. Définition du PSV :	12
I.5. Principe et objectifs du PSV :	13
I.6. Géométrie et acquisition des données :	14
I.6.1. Choix de l'offset :	14
I.6.2. Choix du pas d'échantillonnage :	14
A. Échantillonnage temporel :	14
B. Échantillonnage spatial (en profondeur) :	15
I.6.3. Déroulement d'une opération PSV :	15

I.7. Géométrie des rayons :.....	16
I.7.1. Cas d'une seule couche horizontale :	16
I.7.2. Cas de plusieurs couches horizontales :	17
I.8. Les ondes élastiques dans la sismique de puits :	18
I.8.1. L'onde de cisaillement :	19
A. Applications des ondes S :	19
I.9. La mécanique des roches :	21
I.9.1. Détermination des vitesses sismiques dans les roches :	21
I.9.2. Calibrage temps-profondeur et modélisation géomécanique :	23
I.9.3. Identification des zones de fracturation naturelle ou artificielle :	23
I.10. Différents types d'ondes enregistrées :	23
I.10.1. Ondes descendantes :	23
I.10.2. Ondes montantes :	24
I.10.3. Les bruits en sismique de puits:	25
a. Les ondes de câble :	25
b. Les ondes de tube :	26
I.11. Problèmes rencontrés dans l'établissement d'un Profil Sismique Vertical (PSV) et leurs solutions :	27
I.11.1. Problèmes d'acquisition :	28
I.11.2. Problèmes de traitement :	28
I.12. Conclusion :	29
Chapitre II : Traitement du PSV zéro offset.	
II. Introduction:.....	30
II.1. Prétraitement:	30
II.1.1. Le démultiplexage:.....	31
II.1.2. Corrélation :	31
II.1.3. Récupération des amplitude réel (TAR):.....	32

II.1.4. Normalisation :	32
II.1.5. Édition des données :	32
II.1.6. Compensation des pertes d'énergie :	33
A. Facteurs influençant l'atténuation des ondes sismiques :	33
B. Égalisation dynamique :	35
C. Égalisation avec préservation des amplitudes relatives :	36
II.1.7. Détection des temps des premières arrivées :	37
II.2. Traitement PSV Zéro Offset :	37
II.2.1. Séparation des champs d'ondes :	37
A. Filtre médian :	38
B. Filtrage dans le domaine F-K :	39
C. Filtrage dans le domaine (τ , p) :	41
D. Transformation de Karhunen-Loeve (KL) :	43
II.2.2. Traitement de l'imagerie sismique :	44
A. Déconvolution :	44
C. Le Mute :	47
D. Le couloir de sommation (corridor stack) :	47
II.3. Le calage avec la sismique de surface :	48
II.4. Conclusion:	50
III. Introduction:	50
Chapitre III : Application sur des données réelles.	
III.1. Généralités sur PROMAX :	51
III.2. Acquisition des données PSV :	51
III.2.1. Réalisation des travaux :	51
III.2.2. Formations traversées :	54
III.3. Objectif du sondage :	56
III.4. Séquence de Traitement du PSV zéro offset :	56

III.4.1. Prétraitement des données :.....	56
III.5.2 Traitement du PSV à zéro offset :.....	56
A. Données brutes du PSV :.....	56
B. Sélection de la composante verticale Z :.....	56
C. Géométrie et habillage des traces :.....	57
D. Le pointé des temps des premières arrivées :.....	57
E. Calcul des vitesses :.....	57
F. Récupération des amplitudes réelles (TAR) :.....	62
G. Séparation des champ d'ondes :.....	62
H. Déconvolution :.....	63
I. Corridor stack :.....	64
J. Calage du corridor stack avec la section sismique :.....	64
K. Comparaison entre les deux résultats :.....	64
III.6. Conclusion:.....	65
Conclusion Générale :.....	66
Références :.....	67

Annexes.

Liste des figures :

Figure I.1 : Propagation des ondes élastiques (Djeddi, M. (2017). Les méthodes sismiques : les principes fondamentaux de propagation des ondes sismiques).....	3
Figure I.2 : le principe de la sismique réflexion et la sismique réfraction.....	6
Figure I.3 : Tirs en sismique de puits à puits.	7
Figure I.4 : Tirs en puits.....	8
Figure I.5 : Les différents types du PSV (Geometries Borehole Seismic Course, BAKER HUGHES).	9
Figure I.6 : Système de réception (Sismique de puits-mise en œuvre-principe, Université de Lausanne).	11
Figure I.7 : Mise en œuvre d'un PSV (Djeddi, M. (2017). Les méthodes sismiques : les principes fondamentaux de propagation des ondes sismiques).	12
Figure I.8 : Principe du PSV Zéro Offset (Djeddi, M. (2017). Les méthodes sismiques : les principes fondamentaux de propagation des ondes sismiques).	13
Figure I.9 : Cas d'une seule couche (document Sonatrach).	17
Figure I.10 : Cas de plusieurs couches (document Sonatrach).	18
Figure I.11 : Trajet des ondes descendantes en PSV.....	24
Figure I.12 : Trajet des ondes montantes en PSV.	24
Figure I.13 : Technique de réduction de l'onde de câble.	26
Figure I.14 : Atténuation de l'onde de tube en creusant un tranché entre la source et le puit.	27
Figure II.1 : Divergence sphérique	33
Figure II.2 : L'absorption (Bob. A. HARDAGE 1985).....	34
Figure II.3 : Le phénomène de transmission d'une onde sismique.....	35
Figure II.4 : Principe du filtre médian.....	38
Figure II.5 : Le filtre médian.....	39
Figure II.6 : Le principe du filtre F-K.	40
Figure II.7 : Filtrage dans le domaine (τ, p) [Élimination d'un demi-plan].	42
Figure II.8 : Filtrage dans le domaine (τ, p) [Alignement horizontal et fenêtrage].	43
Figure II.9 : Modèle implicite des ondes montantes utilisé pour la déconvolution (documentation Sonatrach).....	46
Figure II. 10 : Correction statique.	47
Figure II.11 : Exemple d'un corridor stack (SEG Library).....	48

Figure II.12 : Calage d'une section sismique de surface passant par les puits A et B.....	49
Figure III.1 : Schéma synoptique de la sonde et dispositif d'acquisition du PSV.....	53
Figure III.2 : Fiche stratigraphique du puit AZ-1.	55

Liste des tableaux :

Tableau I.1: Le choix des méthodes de PSV.	9
Tableau I.2: Problèmes d'acquisitions rencontrés dans l'établissement d'un PSV.....	28
Tableau I.3: Problèmes de traitements rencontrés dans l'établissement d'un PSV.	28
Tableau III. 1 : Les différentes formations traversées par le puits.	54

Liste des organigrammes :

Organigramme II.1 : Différentes phases de traitement d'un PSV Zéro Offset.	30
Organigramme II.2 : Séquence de Prétraitement d'un PSV.....	31
Organigramme II.3 : Diagramme de déconvolution.	45

Abréviations :

PSV : Profil Sismique Vertical.

RMS : Root Mean Square (Vitesse Quadratique Moyenne).

TVDSD : Profondeur vertical du récepteur au-dessous de la surface (m).

Tpick : Temps des premières arrivées (s).

Tv : Temps vertical source-récepteur (s).

Vmoy : Vitesse moyenne (m/s).

VRMS : Vitesse RMS (m/s).

Vint : vitesse d'intervalle (m/s).

TWT : Temps double(s).

Introduction Générale

Introduction Générale :

Depuis son apparition, la sismique de puits est considérée comme un excellent outil qui a contribué à développer les études sismiques, car elle représente le seul moyen avec lequel on peut caler la sismique de surface, ce qui permet une bonne identification en profondeur des marqueurs sismiques. Elle est utilisée pour une meilleure connaissance du gisement en phase d'exploration, mais peut être également utilisée en phase d'exploitation en sismique répétitive pour l'étude du gisement au cours du temps (monitoring).

L'une des mises en œuvre les plus utilisées est celle du PSV, qui, après traitement, fournit une trace sismique comparable à la section sismique de surface passant au voisinage du puits (corridor stack).

D'après toutes les études faites, les profils sismiques verticaux (zéro offset) fournissent des résultats jugés satisfaisants concernant les structures du sous-sol au voisinage du puits et à des distances considérables mais aussi des informations importantes concernant l'origine des réflexions primaires et multiples. La nature de l'atténuation du signal, ils représentent donc un bon outil d'amélioration pour l'interprétation structurale et stratigraphique à la fois.

Dans le cadre de l'obtention du diplôme du Master en Géophysique Pétrolière, il nous a été confié le sujet suivant : "**Traitement d'un Profil Sismique Vertical Zéro Offset et Calage avec la Sismique de Surface : Approche Appliquée sur PROMAX dans la région Amguid-Messaoud, Grand Touggourt**".

L'objectif principal de ce travail est la réalisation d'une séquence de traitement complète sur données réelles d'un PSV zéro offset sur le logiciel PROMAX ainsi de faire une petite comparaison avec les résultats de calage obtenu par la société ENAGEO lequel est réalisé avec logiciel VSPROWESS mais aussi de soulever les remarques qui peuvent être utiles pour assurer un bon déroulement de l'opération.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** est consacré aux notions fondamentales et aux généralités relatives à l'acquisition des profils sismiques verticaux, en mettant l'accent sur le dispositif de mise en œuvre et les principes de l'enregistrement.

- **Le deuxième chapitre** traite des différentes étapes de traitement d'un PSV zéro offset, en détaillant les méthodes utilisés dans la chaîne de traitement et calage du PSV Zéro Offset.
- **Le troisième chapitre** représente l'application pratique du traitement sur des données réelles d'un profil sismique vertical, mettant en évidence les résultats obtenus et le calage avec la section sismique.

Chapitre I :
Généralités sur le
PSV zéro offset.

I. Introduction :

Le Profil Sismique Vertical (PSV) est une technique géophysique utilisée en sismique pour obtenir des informations détaillées sur les propriétés des formations géologiques en profondeur. Contrairement aux méthodes de surface, le PSV implique l'installation de capteurs sismiques dans un puits de forage, ce qui permet d'enregistrer les ondes sismiques directement à différentes profondeurs. Cette méthode offre une résolution verticale élevée et permet de corréler les données sismiques avec les informations lithologiques obtenues par carottage. Le PSV est particulièrement utile pour l'étalonnage des données sismiques de surface, l'identification des multiples, et l'amélioration de l'imagerie des structures géologiques complexes. Selon [5], le PSV est un outil essentiel pour l'exploration pétrolière et gazière, car il fournit des informations précises sur la vitesse des ondes sismiques et les réflexions aux interfaces géologiques, contribuant ainsi à une meilleure interprétation des données sismiques.

I.1. Généralités sur la sismique réflexion et la sismique réfraction :

Les méthodes sismiques sont au cœur de la prospection géophysique, en particulier dans le domaine de l'exploration et de la surveillance des réservoirs d'hydrocarbures. Deux approches classiques dominent la sismique terrestre : la sismique réflexion et la sismique réfraction. Elles sont toutes deux basées sur la propagation des ondes élastiques dans le sous-sol, mais exploitent des phénomènes physiques différents [9].

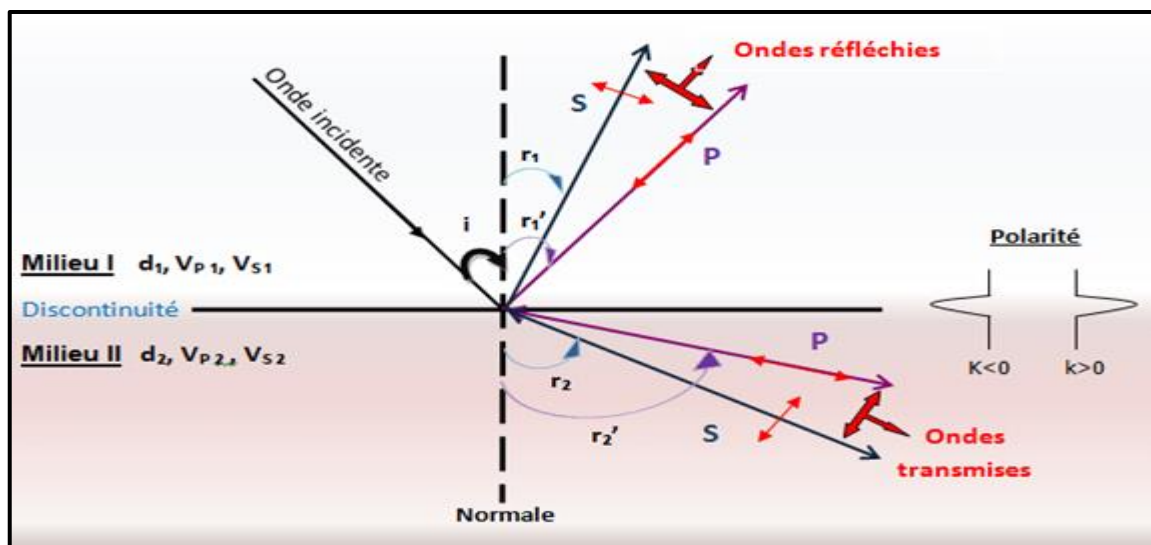


Figure I.1 : Propagation des ondes élastiques (Djeddi, M. (2017). Les méthodes sismiques : les principes fondamentaux de propagation des ondes sismiques).

I.1.1. Sismique réflexion :

La sismique réflexion repose sur l'analyse des ondes sismiques qui sont réfléchies aux interfaces séparant des couches géologiques ayant des impédances acoustiques différentes, où :

$$Z = \rho \cdot V \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

- ρ : la densité du milieu.
- V : la vitesse de propagation des ondes.

Lorsque ces ondes rencontrent une discontinuité, une partie de l'énergie est réfléchie vers la surface. L'amplitude de cette onde réfléchie est définie par le coefficient de réflexion :

$$K = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots \dots \dots (2)$$

Où Z_1 et Z_2 sont les impédances acoustiques des couches successives [17].

Si une onde se réfléchit sur une interface plane, son temps d'arrivée à un géophone situé à une distance x s'exprime par :

$$t = \frac{2h}{V} \dots \dots \dots (3)$$

Ou plus généralement :

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \left(\frac{x}{V}\right)^2} \dots \dots \dots (4)$$

- h : profondeur de la couche.
- x : distance source-récepteur (offset).
- t_0 : temps d'aller-retour vertical (zéro-offset).

I.1.2. Sismique réfraction :

La sismique réfraction, quant à elle, exploite les ondes qui se propagent le long des interfaces à grande vitesse après avoir subi une réfraction critique, conformément à la loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} \dots \dots \dots (5)$$

Si $V_2 > V_1$ alors :

$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2} \dots \dots \dots (6)$$

Si une onde se réfracte sur une interface plane, son temps d'arrivée à un géophone situé à une distance x s'exprime par :

$$t(x) = t_i + \frac{x}{V_2} \dots \dots \dots (7)$$

Avec :

$$t_i = \frac{2h \cos i_c}{V_1} \dots \dots \dots (8)$$

- t_i : temps d'interception (croisement des courbes de temps),
- h : profondeur de l'interface,
- V_1, V_2 : vitesses des deux couches,
- x : distance source-récepteur.

Elle permet d'estimer les vitesses sismiques des couches et la profondeur des interfaces, notamment dans les premiers centaines de mètres du sous-sol. La sismique réfraction est particulièrement utile dans les études géotechniques, l'ingénierie civile, et pour la reconnaissance de la roche saine [7].

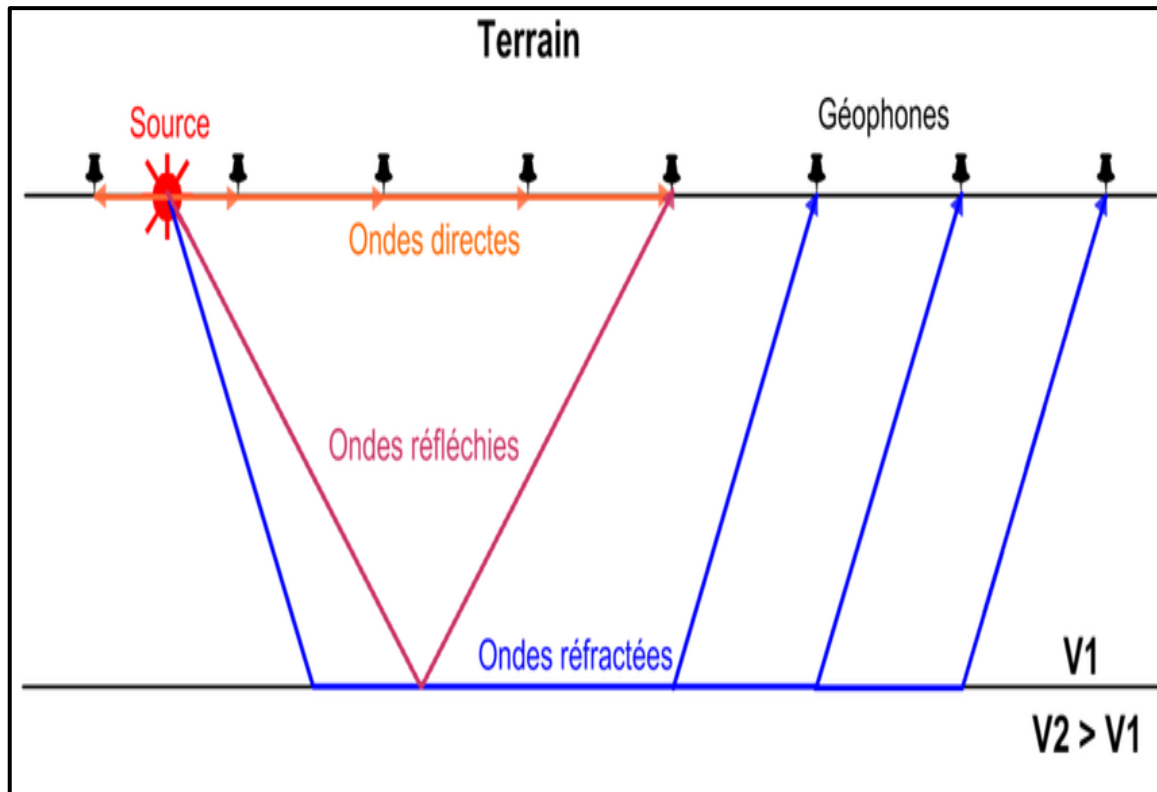


Figure I.2 : le principe de la sismique réflexion et la sismique réfraction.

Donc le Profil Sismique Vertical PSV est une méthode de sismique réflexion où les récepteurs sont placés dans un puits, ce qui permet une meilleure résolution verticale et une calibration des données de surface.

I.2. Configuration des différents types de sismique de puits:

Les configurations varient en fonction des objectifs et des conditions opérationnelles. Voici les principaux types de sismique de puits et leurs configurations :

- Sismique de puits à puits (Crosswell seismic) : La source est placée dans un puits et les récepteurs dans un autre puits adjacent.
- Tirs en puits (Reverse VSP) : La source est située dans le puits, tandis que les récepteurs sont déployés en surface.
- Tirs en surface (Vertical Seismic Profile) : La source est en surface et les récepteurs sont installés dans le puits.

I.2.1. Sismique de puits à puits :

Dans cette configuration, la source est placée dans un puits et les récepteurs dans un autre puits voisin. Les ondes directes, réflexions et réfractions sur les couches géologiques situées au-dessus et en dessous de la source et des récepteurs rendent cette méthode complexe. Elle permet d'obtenir des images des formations entre les puits sous forme de sections sismiques en réflexion. Cette technique est couramment utilisée dans le domaine minier ou en génie civil.

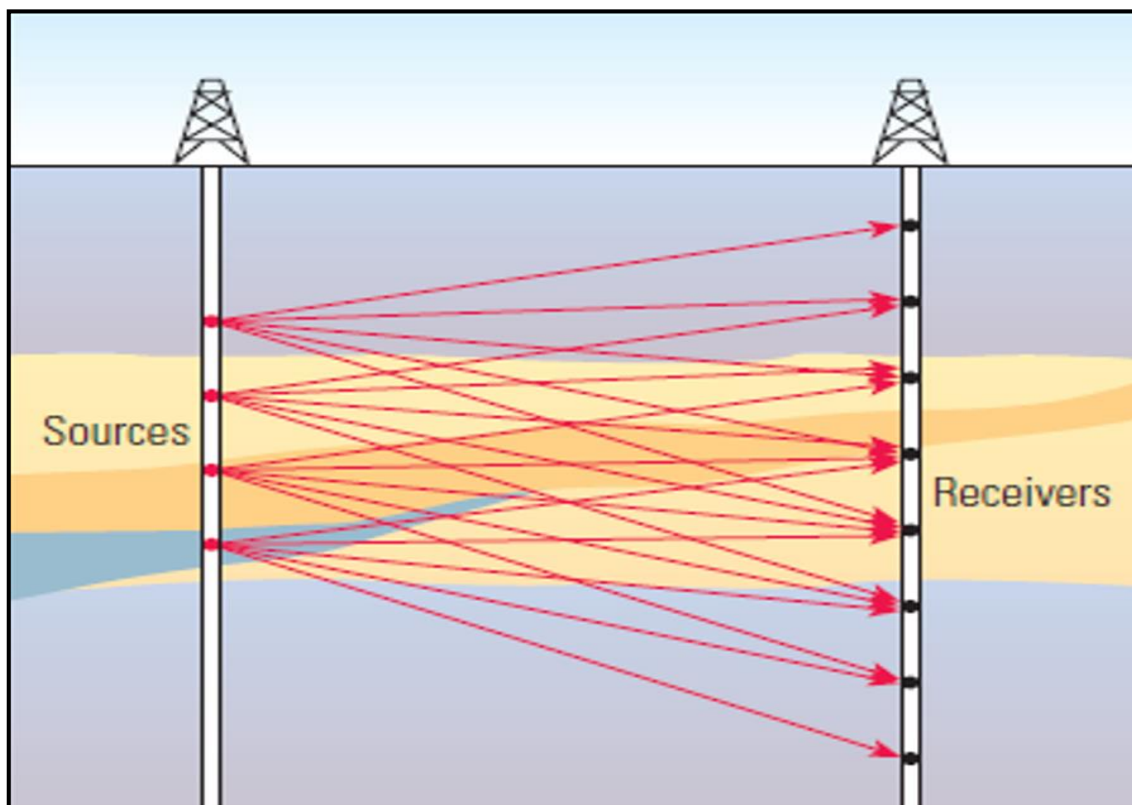


Figure I.3 : Tirs en sismique de puits à puits.

I.2.2. Tirs en puits :

Dans cette méthode, la source est placée dans le puits, tandis que les récepteurs sont disposés en surface, soit en ligne, soit en nappe. Cette configuration permet d'obtenir des résultats similaires à ceux d'un PSO (Profil Sismique Oblique), mais en deux ou trois dimensions. Elle est principalement utilisée pour l'étude des réservoirs.

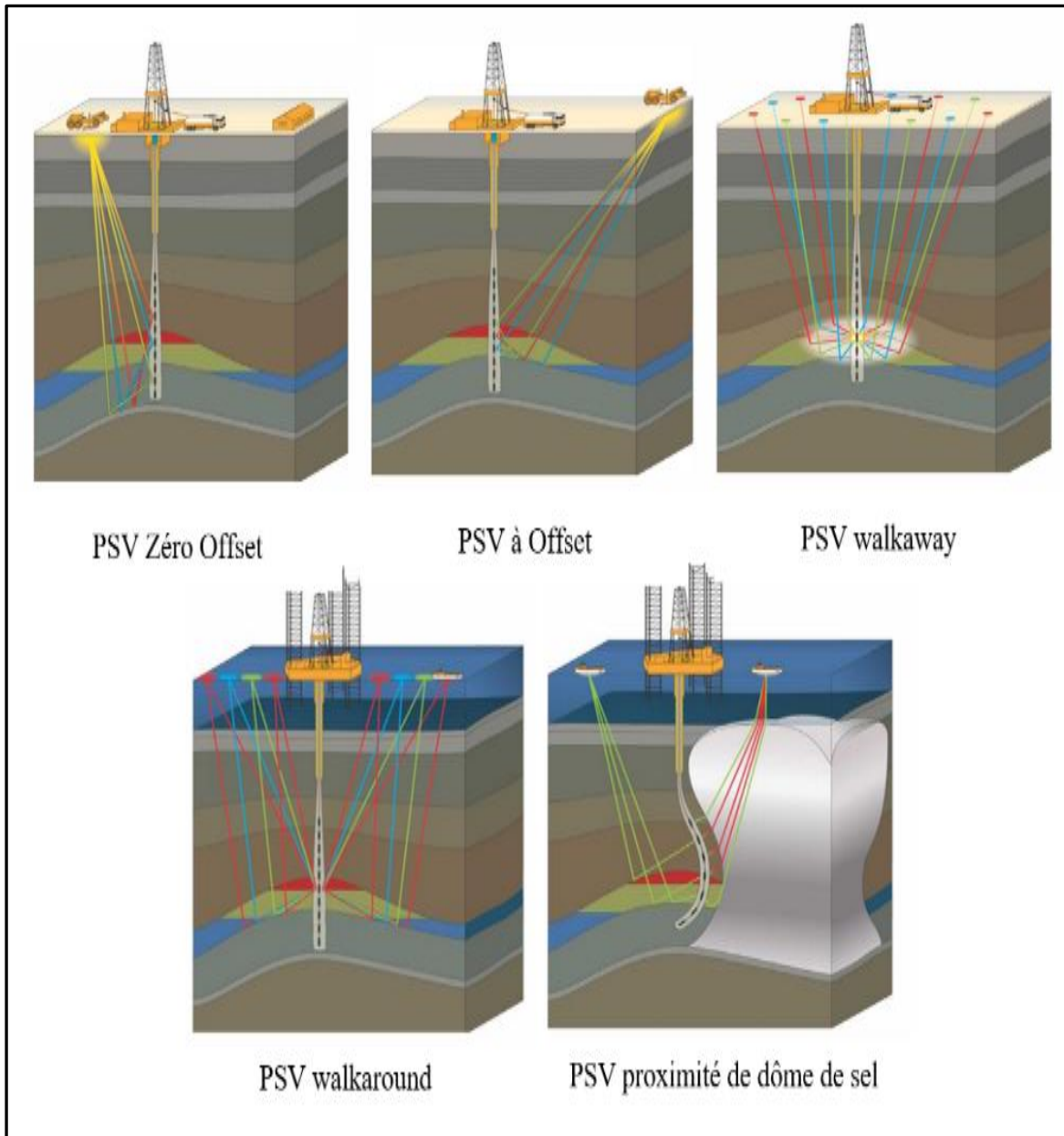


Figure I.5 : Les différents types du PSV (Geometries Borehole Seismic Course, BAKER HUGHES).

• **Choix de la méthode en fonction des objectifs :**

Méthode	Résolution	Couverture	Applications typiques
ZOVSP	Haute	Verticale	Calibration vitesse
Offset VSP	Moyenne	Latérale limitée	Imagerie des failles
Walkaway VSP	Haute	2D étendue	Caractérisation réservoir

Tableau I.1: Le choix des méthodes de PSV.

I.3. Mise en œuvre et matériel utilisé :

I.3.1. Le puits :

Pour minimiser les effets des ondes de tube et assurer un bon couplage entre le géophone et la formation, il est préférable d'utiliser un puits parfaitement cimenté et tubé avec un tubage unique sur toute sa profondeur. Un tel puits garantit une transmission optimale des ondes sismiques et une meilleure qualité des données acquises [5].

I.3.2. Le câble :

Le câble joue un rôle essentiel dans la mise en œuvre de la sismique de puits. Il permet :

- La descente et la remontée de la sonde dans le puits.
- La transmission des données sismiques du récepteur au laboratoire d'enregistrement.
- La mesure précise de la profondeur de la sonde.

I.3.3. Le système de réception :

Le système de réception est généralement composé d'un capteur à trois composantes, d'un système d'ancrage et d'une unité de numérisation (Figure I.2). Pour assurer des mesures de haute qualité, le système doit être conçu pour minimiser les effets des ondes de tube et optimiser le couplage avec la formation. Les caractéristiques essentielles du système de réception incluent :

- Deux extrémités pointues et un petit diamètre pour faciliter la descente dans le puits.
- Des bras d'ancrage rétractables pour un couplage optimal avec la paroi du puits.
- Une taille compacte et une masse légère pour une manipulation aisée.
- Trois géophones disposés en géométrie trirectangle pour capturer les ondes dans toutes les directions.
- Un système d'orientation pour aligner les capteurs avec les ondes incidentes.
- Un système de mesure du couplage pour vérifier la qualité du contact avec la formation.
- Un système de contrôle de profondeur pour localiser précisément la sonde.
- Une unité de numérisation pour convertir les signaux analogiques en données numériques.
- La possibilité de connecter plusieurs sondes pour des configurations complexes.

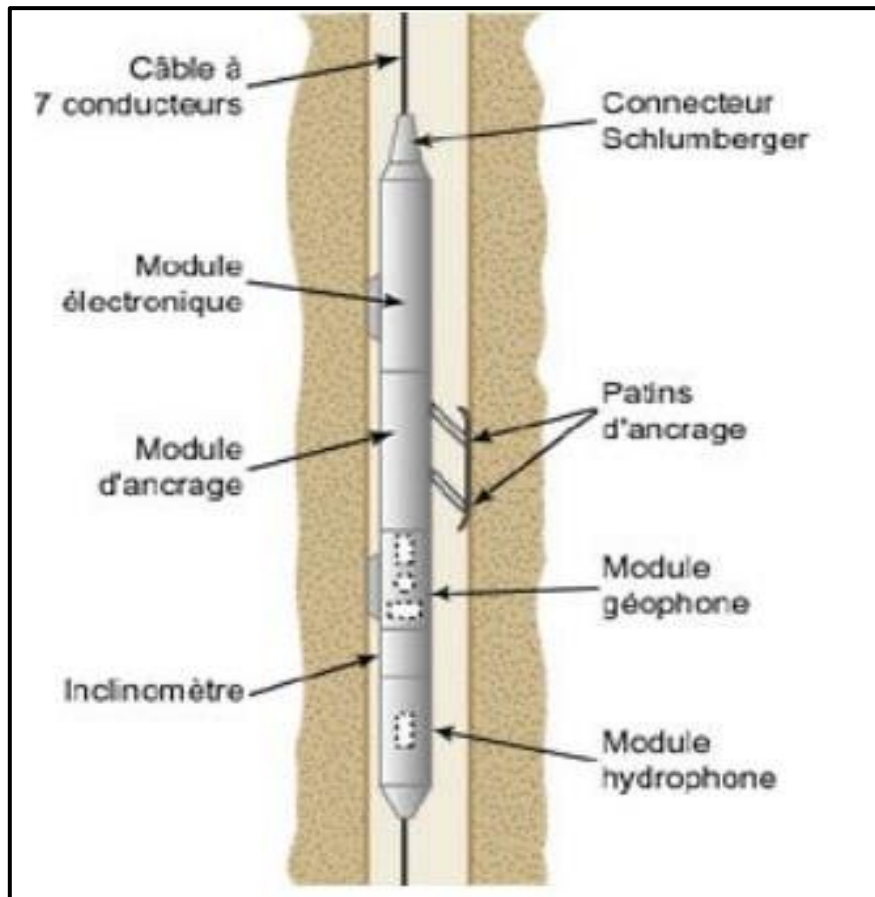


Figure I.6 : Système de réception (Sismique de puits-mise en œuvre-principe, Université de Lausanne).

I.3.4. La source sismique :

La source utilisée en sismique de puits doit avoir des caractéristiques similaires à celles utilisées en sismique de surface pour assurer un calage cohérent des données. Une énergie modérée (légèrement inférieure à celle de la sismique conventionnelle) est généralement privilégiée pour garantir un bon rapport signal/bruit [17].

I.3.5. La sonde signature :

La sonde signature est utilisée pour enregistrer la signature de la source à chaque tir, permettant ainsi d'évaluer la répétitivité de la source. Elle peut être remplacée par un ensemble de trois géophones de surface disposés en géométrie trirectangle : un géophone vertical et deux géophones horizontaux.

I.3.6. Le laboratoire d'enregistrement des données sismiques :

Le laboratoire d'enregistrement joue un rôle central dans l'acquisition des données. Ses principales fonctions incluent :

- Le positionnement et l'ancrage de la sonde.
- Le contrôle en temps réel des enregistrements pour assurer la qualité des données.
- La visualisation des données pendant l'acquisition.

Pour éviter le phénomène d'aliasing, le laboratoire doit être capable d'un échantillonnage temporel fin (inférieur à 1 ms), comparable aux standards de la sismique de surface [9].

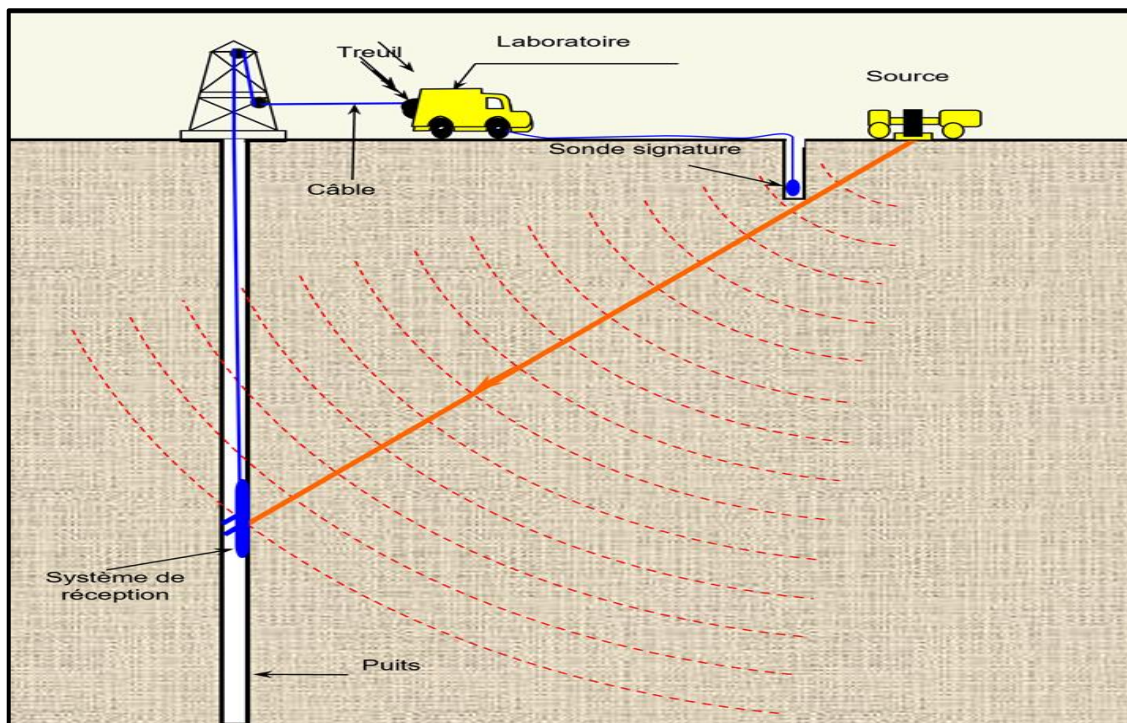


Figure I.7 : Mise en œuvre d'un PSV (Djeddi, M. (2017). Les méthodes sismiques : les principes fondamentaux de propagation des ondes sismiques).

Dans cette étude on s'intéresse à l'établissement d'un PSV zéro offset

I.4. Définition du PSV :

Le Profil Sismique Vertical (PSV), également appelé Vertical Seismic Profile (VSP), est une méthode géophysique qui permet d'étudier en détail les formations géologiques en profondeur. Contrairement à la sismique conventionnelle, où les sources et les récepteurs

sont placés en surface, le PSV utilise des récepteurs (géophones ou hydrophones) positionnés à différentes profondeurs dans un puits. Une source sismique, située en surface ou dans l'eau, génère des ondes élastiques qui traversent les formations géologiques. Ces ondes sont enregistrées par les récepteurs dans le puits, permettant d'obtenir des données sur les propriétés des couches traversées, telles que leur vitesse, densité et structure [9][14].

I.5. Principe et objectifs du PSV :

Le principe du Profil Sismique Vertical (PSV zéro offset) repose sur :

- La mesure précise des temps de trajet des ondes sismiques et leur interaction avec les interfaces géologiques.
- La génération d'ondes sismiques à l'aide d'une source (vibrateur, pistolet à air ou charge explosive).
- L'enregistrement des ondes par des récepteurs placés dans le puits.
- Le traitement des données pour obtenir une image détaillée des structures géologiques environnantes.

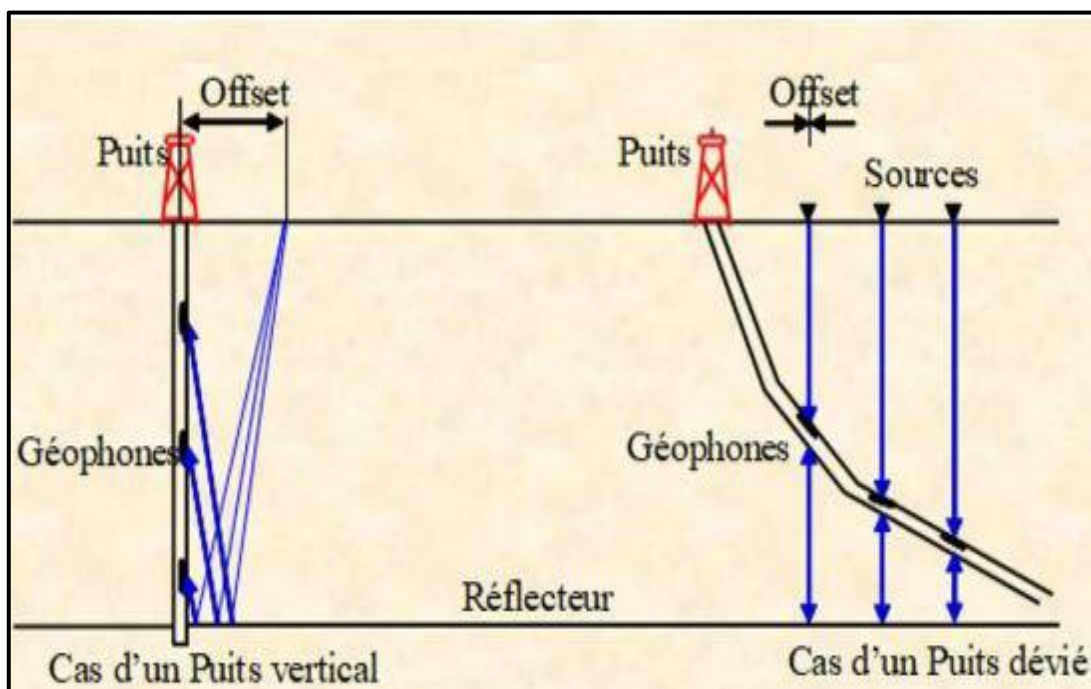


Figure I.8 : Principe du PSV Zéro Offset (Djeddi, M. (2017). Les méthodes sismiques : les principes fondamentaux de propagation des ondes sismiques.).

Ces données permettent :

- Calibrer les données sismiques de surface pour associer les temps de réflexion à des profondeurs précises.
- Imager les structures géologiques complexes et détecter les hétérogénéités locales.
- Caractériser les réservoirs pétroliers et gaziers, notamment leurs propriétés physiques [5][6][17].

I.6. Géométrie et acquisition des données :

I.6.1. Choix de l'offset :

Le choix de l'offset pour un PSV à offset nul (PSV classique) est basé sur l'angle d'incidence, qui ne doit pas dépasser 30° pour éviter les distorsions des signaux sismiques. En revanche, pour un PSO (Profil Sismique Oblique), il n'existe pas de limite théorique stricte pour l'offset. Cependant, en pratique, l'offset est déterminé en fonction de l'objectif géologique. Il est généralement recommandé de choisir un offset inférieur ou égal aux $\frac{3}{4}$ de la profondeur de l'objectif. Si plusieurs objectifs sont visés, plusieurs offsets peuvent être utilisés.

$$D \leq \frac{3}{4} H \dots \dots \dots (9)$$

D : l'offset de source.

H : la profondeur de l'objectif géologique.

L'offset est également conditionné par la nécessité d'éviter l'apparition d'ondes réfractées, qui peuvent masquer les réflexions primaires et réduire la qualité des données [5].

I.6.2. Choix du pas d'échantillonnage :

Le choix du pas d'échantillonnage, qu'il soit temporel ou spatial, est crucial pour éviter le phénomène d'aliasing et garantir une acquisition précise des données sismiques. Les critères suivants doivent être respectés :

A. Échantillonnage temporel :

Pour un échantillonnage temporel adéquat, le pas d'échantillonnage temporel τ doit respecter la condition suivante :

Selon la relation de Nyquist-Shannon,

$$\tau \leq \frac{1}{2F_{max}} \dots \dots \dots (10)$$

où F_{max} est la fréquence maximale du signal enregistré.

Dans la pratique, pour assurer une reconstitution optimale du signal analogique, on choisit un pas d'échantillonnage encore plus petit, selon la relation :

$$\tau \leq \frac{1}{4F_{max}} \dots \dots \dots (11)$$

Ce choix garantit une meilleure précision dans des données et la reconstruction des signaux analogiques [17].

B. Échantillonnage spatial (en profondeur) :

Pour un échantillonnage spatial efficace, la distance minimale ΔZ entre deux niveaux d'enregistrement successifs dans le puits doit obéir à la relation suivante :

$$\Delta Z \leq \frac{V_{min}}{2F_{max}} \dots \dots \dots (12)$$

- V_{min} est la vitesse minimale des ondes entre deux niveaux d'enregistrement.
- F_{max} est la fréquence maximale du signal sismique enregistré lors du PSV.

Ces critères garantissent une résolution optimale, évitant la perte d'information ou l'apparition d'artefacts lors du traitement et de l'interprétation des données [17].

I.6.3. Déroulement d'une opération PSV :

L'enregistrement d'un PSV à une profondeur donnée comprend les étapes suivantes :

1. Contrôle de la profondeur : Vérifier la position de la sonde dans le puits.
2. Ancrage de la sonde : Fixer la sonde pour assurer un bon couplage avec la formation.
3. Mise en mou du câble : Donner du mou au câble pour éviter les bruits causés par le vent ou les vibrations.
4. Acquisition des données : Effectuer les mesures sismiques et les contrôler en temps réel à l'aide de moniteurs ou d'un système de contrôle.

5. Tension du câble : Tendre le câble pour préparer la sonde à la remontée.
6. Désencrage de la sonde : Libérer la sonde pour la déplacer à la profondeur suivante.

Cette séquence peut être répétée plusieurs fois à la même profondeur pour évaluer les variations de couplage et le rapport signal/bruit. L'acquisition est généralement réalisée du fond du puits vers la surface pour des raisons pratiques.

Il produit une section sismique en deux dimensions, où :

- L'axe vertical ΔZ représente le temps de trajet des ondes.
- L'axe horizontal représente la profondeur du capteur.

I.7. Géométrie des rayons :

I.7.1. Cas d'une seule couche horizontale :

Dans un modèle géologique simplifié composé d'une seule couche homogène, isotrope et avec un réflecteur plan horizontal, les temps d'arrivée des ondes descendantes et montantes suivent des hodochrones hyperboliques non symétriques [5][9].

L'abscisse X_M du point miroir réfléchissant est une fonction simple de la profondeur H du réflecteur, de la position Z de la sonde et de l'offset D de la source. Les expressions mathématiques sont les suivantes :

- Temps d'arrivée de l'onde directe (trajet ER) :

$$t_{ER} = t_{dir} = \frac{\sqrt{Z^2 + D^2}}{V} \dots \dots \dots (13)$$

- Temps d'arrivée de l'onde montante (trajet EMR) :

$$t_{EMR} = t(H, Z) = \frac{\sqrt{D^2 + (2H - Z)^2}}{V} \dots \dots \dots (14)$$

- Abscisse du point miroir X_M :

$$X_M(H, Z) = \frac{D(H - Z)}{2H - Z} \dots \dots \dots (15)$$

- Temps vertical de l'onde montante (pour $D=0$) :

$$t_0(H, Z) = \frac{2H - Z}{V} \dots \dots \dots (16)$$

- t_{dir} : Temps d'arrivée de l'onde directe.
- $t(H, Z)$: Temps d'arrivée de l'onde montante.
- X_M : Position du point miroir réfléchissant.
- $t_0(H, Z)$: Temps vertical de l'onde montante.

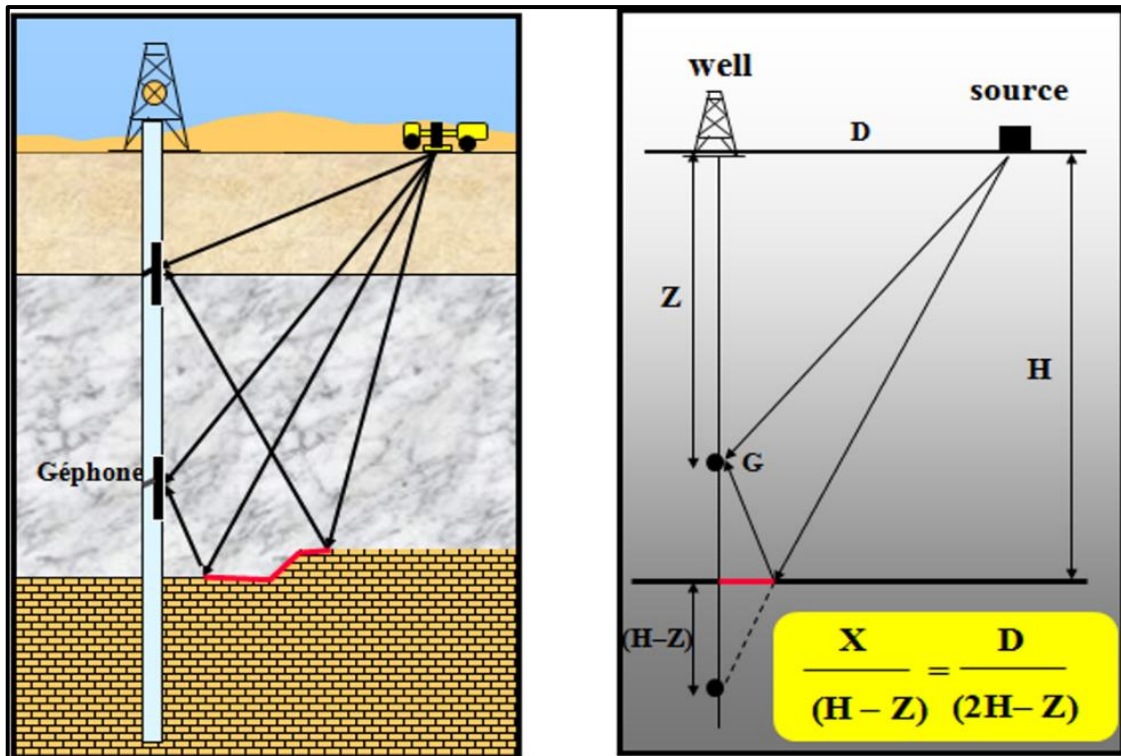


Figure I.9 : Cas d'une seule couche (document Sonatrach).

I.7.2. Cas de plusieurs couches horizontales :

Pour un modèle géologique à plusieurs couches horizontales homogènes et isotropes, les points de réflexion ($M1, M2, M3, M4$) des rayons sismiques forment une courbe lisse (CI) lorsque l'épaisseur des couches est réduite [17].

À mesure que la profondeur des réflecteurs augmente, cette courbe s'approche de la verticale passant par le point milieu entre la source et l'axe du puits. Pour des couches horizontales, la courbe ne dépasse jamais cette verticale [9].

Les points miroirs éclairés se situent entre l'axe du puits et la verticale passant par $D/2$, où D est l'offset de la source.

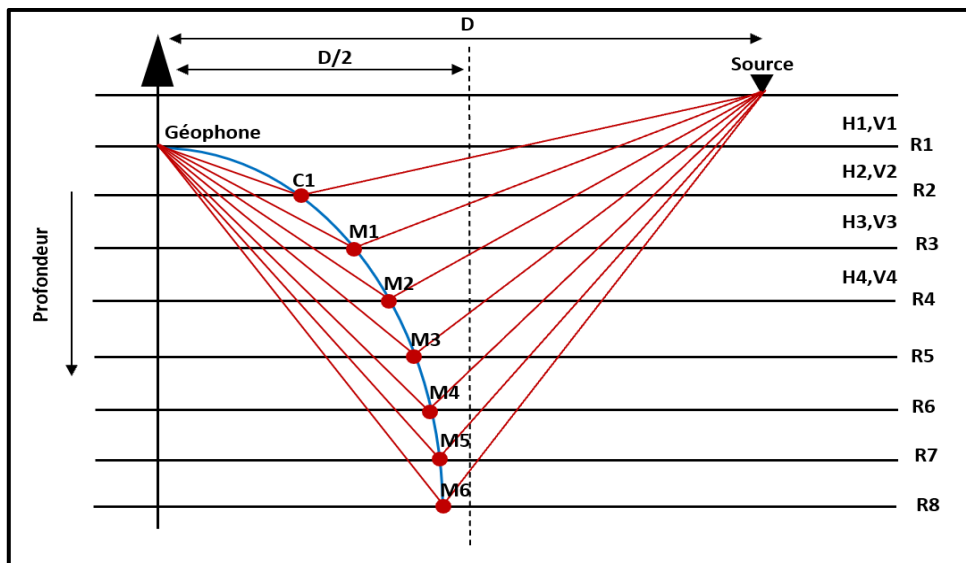


Figure I.10 : Cas de plusieurs couches (document Sonatrach).

Remarque :

Pour un réflecteur situé sous le géophone le plus profond, la zone miroir éclairée s'écarte progressivement de la verticale.

En théorie, si le géophone le moins profond est situé à la surface, le point d'abscisse maximale se trouve à mi-distance entre le puits et la source. En pratique, le géophone le moins profond n'est jamais à la surface, ce qui déplace légèrement le point d'abscisse maximale [5][17].

I.8. Les ondes élastiques dans la sismique de puits :

La plupart des sources sismiques génèrent des ondes de compression (ondes P). Cependant, les enregistrements PSV (Profil Sismique Vertical) contiennent également d'autres types d'ondes, qui peuvent soit fournir des informations supplémentaires utiles (les ondes S), soit dégrader la qualité des données (les ondes de tube).

I.8.1. L'onde de cisaillement :

L'énergie des ondes P se propage avec un mouvement de particules aligné dans la direction de propagation, tandis que l'énergie des ondes S se propage avec un mouvement de particules perpendiculaire à cette direction. En l'absence d'une source générant directement des ondes S en surface, tout mouvement d'onde S détecté par les géophones dans le puits résulte de la conversion des ondes P aux interfaces géologiques.

La conversion des ondes P en ondes S se produit généralement lorsqu'elles traversent un contraste d'impédance acoustique. La conversion inverse est également possible, générant une variété d'ondes en sous-sol. Les ondes S, avec leurs composantes horizontales et verticales, peuvent également subir des conversions, rendant leur identification complexe dans les données PSV Zéro Offset. Cependant, leur analyse fournit des informations précieuses sur les formations géologiques autour du puits.

A. Applications des ondes S :

A.1. Augmentation de la résolution des données :

La vitesse des ondes S (V_S) est généralement 50 à 75% de celle des ondes P (V_P). À fréquence égale, la longueur d'onde des ondes S est plus courte, ce qui permet une meilleure résolution des images sismiques.

Vitesse de l'onde P :

$$V_P = \sqrt{\frac{k + \frac{3}{4}\mu}{\rho}} \dots \dots \dots (17)$$

Vitesse de l'onde S :

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \dots \dots \dots (18)$$

Avec :

- μ : Coefficient de lamé.
- ρ : Densité de formation.
- K : Module d'élasticité.

Pour les fluides : $\mu = 0$ Donc $V_S = 0$

Pour les roches : $\mu > 0$ Et $(k + \frac{3}{4}\mu) > \mu \rightarrow V_P > V_S$

A.2. Détection des zones de fractures :

Les roches fracturées atténuent fortement les ondes S, et leur vitesse est affectée par la rigidité et la densité du milieu. En comparant les enregistrements avant et après une fracturation hydraulique dans les schistes bitumineux d'Antrim, il s'observe des variations dans les temps d'arrivée des ondes P et S, permettant de délimiter la zone fracturée [11].

Aussi la propriété biréfringence des ondes S peut être utilisée. Lorsqu'une onde de cisaillement traverse une zone fracturée, elle se divise en deux composantes polarisées :

- Une composante parallèle à l'orientation des fractures, dont la vitesse reste proche de celle de la roche intacte.
- Une composante perpendiculaire, dont la vitesse est fortement influencée par les fluides remplissant les fractures.

Cette division permet de déterminer l'orientation des fractures et la direction des contraintes principales.

A.3. Détermination des paramètres lithologiques :

L'enregistrement des ondes P et S lors d'un PSV (Profil Sismique Vertical) fournit des informations fiables sur les vitesses d'intervalle pour chaque type d'onde. La présence des pores dans la matrice influence de manière distincte sur les vitesses des ondes P (V_P) et S (V_S), ainsi que la densité de la matrice [4]. Le rapport des vitesses V_P/V_S , obtenu à partir des données PSV, permet de **déduire les paramètres lithologiques**, notamment via le coefficient de Poisson (σ), qui est exprimé par :

$$\sigma = \frac{0,5 \left(\frac{v_p}{v_s} \right) - 1}{\left(\frac{v_p}{v_s} \right) - 1} = \frac{0,5 - \left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2}{1 - \left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2} \dots \dots \dots (19)$$

Le rapport $\left(\frac{v_p}{v_s}\right)$ (coef d'absorption) sont des indicateurs plus fiable que les vitesses des ondes P seules pour identifier la lithologie (par exemple, distinguer les roches gréseuses des roches carbonatées) et évaluer la saturation en fluides, en particulier dans les réservoirs de gaz [8].

A.4. Détermination de la porosité de la formation :

La porosité est l'un des paramètres les plus importants pour évaluer une formation réservoir potentielle. Elle est définie comme la fraction volumique de l'espace poreux et peut être estimée à partir de la vitesse des ondes sismiques dans la roche [1]. La relation entre la porosité (ϕ) et la vitesse sismique (V) est souvent exprimée par une équation linéaire de la forme :

$$v^{-1} = a\phi + b \dots \dots \dots (20)$$

Où :

$$a = \frac{1}{V_F} - \frac{1}{V_M} \dots \dots \dots (21)$$

$$b = \frac{1}{V_M} \dots \dots \dots (22)$$

- V : Vitesse des ondes sismiques dans la roche saturée en fluide.
- V_F : Vitesse des ondes dans les fluides des pores.
- V_M : Vitesse des ondes dans la matrice rocheuse.
- a et b : Paramètres dépendant des propriétés de la roche et des fluides.

I.9. La mécanique des roches :

La mécanique des roches intervient indirectement mais de façon cruciale dans l'interprétation et le traitement des données PSV, notamment pour :

I.9.1. Détermination des vitesses sismiques dans les roches :

- Les vitesses P (ondes de compression) et S (ondes de cisaillement) enregistrées en PSV dépendent fortement des propriétés mécaniques des roches :

❖ Coefficient de poisson :

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \dots \dots \dots (23)$$

- V_p : Vitesse de l'onde P.
- V_s : Vitesse de l'onde S.

❖ Module de Young (E) :

$$E = 2G(1 + \nu) \dots \dots \dots (24)$$

- G : module de cisaillement.
- ν : coefficient de poisson.

❖ Module de cisaillement (G) :

$$G = \rho V_s^2 \dots \dots \dots (25)$$

- ρ : Densité de formation.
- V_s : Vitesse de l'onde S.

❖ Module de compressibilité (K) :

$$K = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \dots \dots \dots (26)$$

- ρ : Densité de formation.
- V_p : Vitesse de l'onde P.
- V_s : Vitesse de l'onde S.

Ces paramètres mécaniques sont cruciaux pour :

- Le dimensionnement des tubages.
- La conception des forages.
- La gestion des risques géomécaniques.

Les vitesses P et S peuvent être mesurées très précisément en PSV zéro-offset, et utilisées pour caractériser les modules élastiques des formations traversées → c'est là que la mécanique des roches devient essentielle [10].

I.9.2. Calibrage temps-profondeur et modélisation géomécanique :

- Le PSV zéro-offset permet de calibrer la relation temps-profondeur avec grande précision.
- En combinant ces données avec les mesures de diagraphie (sondes de densité, vitesse, pression de porosité), on peut construire un modèle géomécanique du puits :
 - ✓ Contraintes horizontales et verticales.
 - ✓ Pression de pore.
 - ✓ Résistance des formations.

Ces données sont utilisées pour prévenir les problèmes de stabilité des puits, prédire la fracturation, et guider les forages horizontaux.

I.9.3. Identification des zones de fracturation naturelle ou artificielle :

- Les changements de vitesse détectés dans les profils PSV peuvent refléter :
 - ✓ Zones de failles.
 - ✓ Fractures ouvertes ou fermées.
 - ✓ Pressions anormales.
- La mécanique des roches permet d'interpréter ces anomalies :
→ si la formation est cassante ou ductile, si elle a atteint sa limite de rupture, etc [10].

I.10. Différents types d'ondes enregistrées :

L'onde émise par la source sismique parcourt plusieurs chemins avant d'atteindre la sonde d'enregistrement située à différentes profondeurs dans le puits. Les enregistrements obtenus mettent en évidence deux principaux types d'ondes : les ondes descendantes et les ondes montantes .

I.10.1. Ondes descendantes : Elles incluent les arrivées directes et les multiples descendants. Ces ondes sont caractérisées par des vitesses apparentes positives.

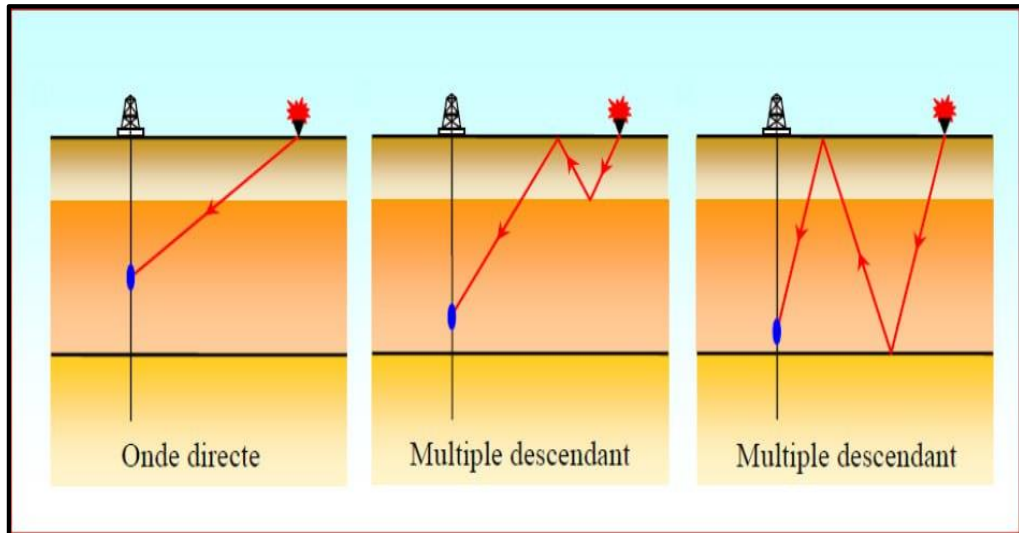


Figure I.11 : Trajet des ondes descendantes en PSV.

I.10.2. Ondes montantes : Elles comprennent les réflexions primaires et les multiples montants. Ces ondes présentent des vitesses apparentes négatives.

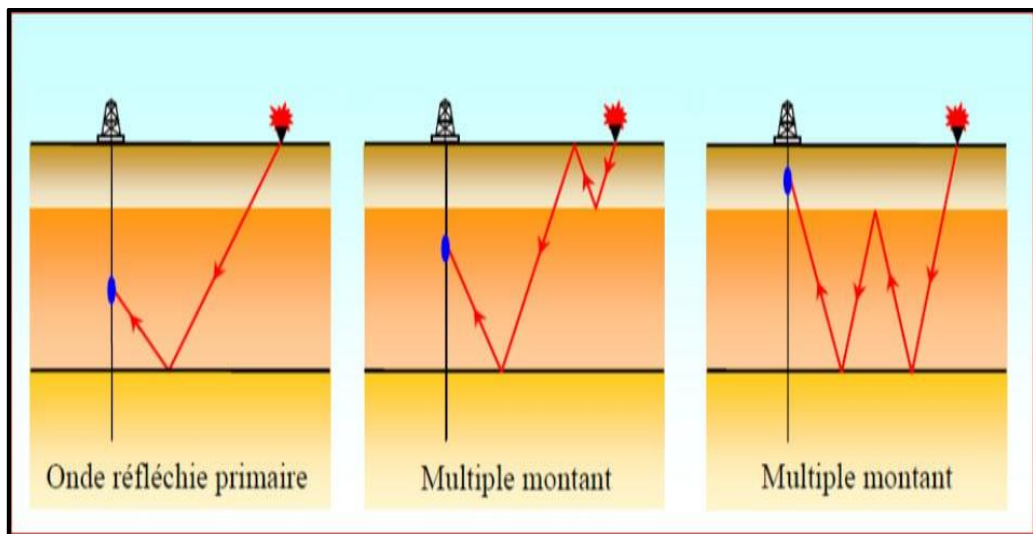


Figure I.12 : Trajet des ondes montantes en PSV.

Dans un enregistrement PSV Zéro Offset, les ondes directes et montantes représentées par des droites, contrairement au PSO (Profil Sismique Oblique), où elles apparaissent courbées.

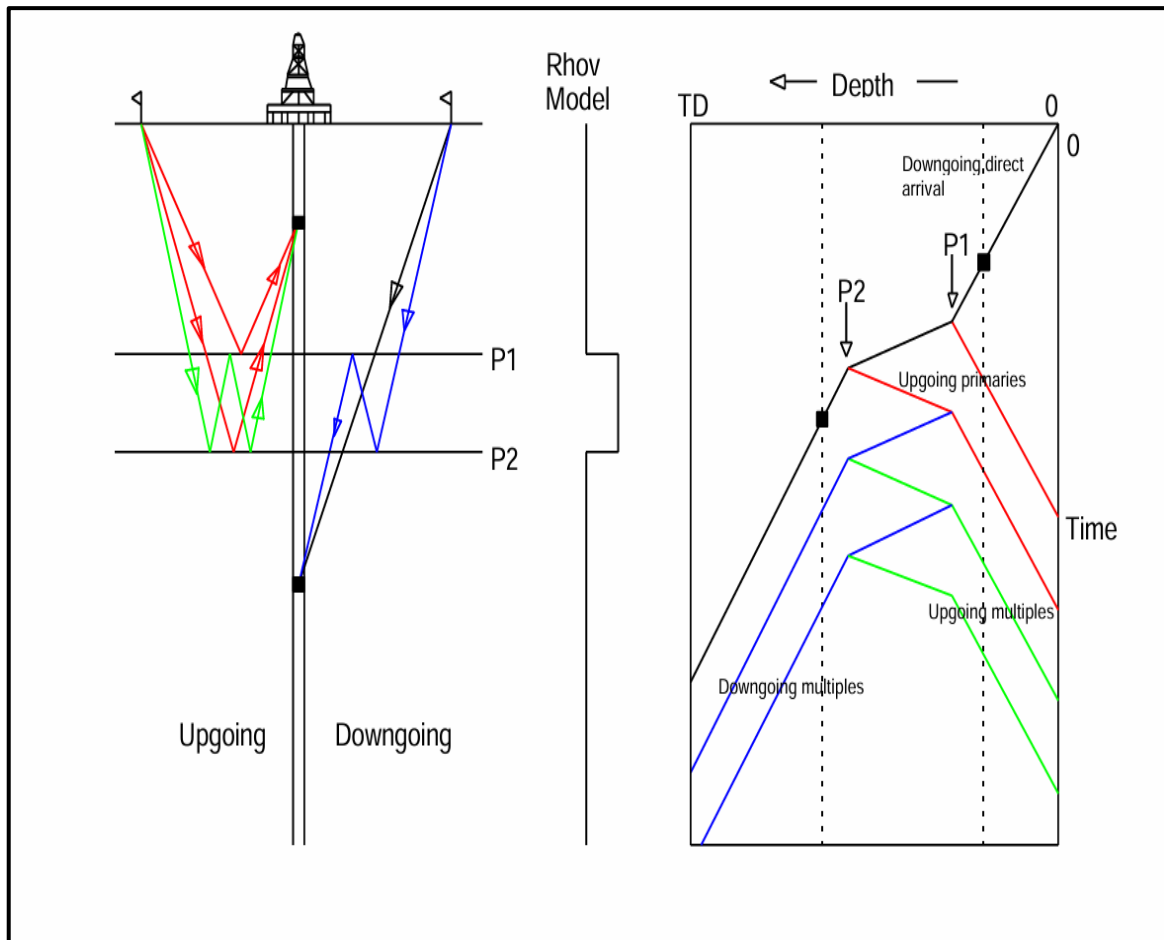


Figure I.10 : Représentation des ondes montantes et descendantes (BAKER HUGHES).

I.10.3. Les bruits en sismique de puits:

D'une façon générale, un enregistrement PSV est composé d'ondes montantes et descendantes, de compression et/ou de cisaillement, ainsi que des ondes liées à la présence de puits et du fluide (ondes de câble et ondes de tube).

a. Les ondes de câble :

Les vibrations du câble, généralement causées par le vent ou le bruit des machines, génèrent des ondes qui perturbent les géophones de puits et introduisent un bruit significatif dans les enregistrements sismiques. Ce type de bruit, appelé ondes de câble, peut être atténué en donnant du mou au câble, réduisant ainsi les vibrations indésirables [5] (Figure I.10).

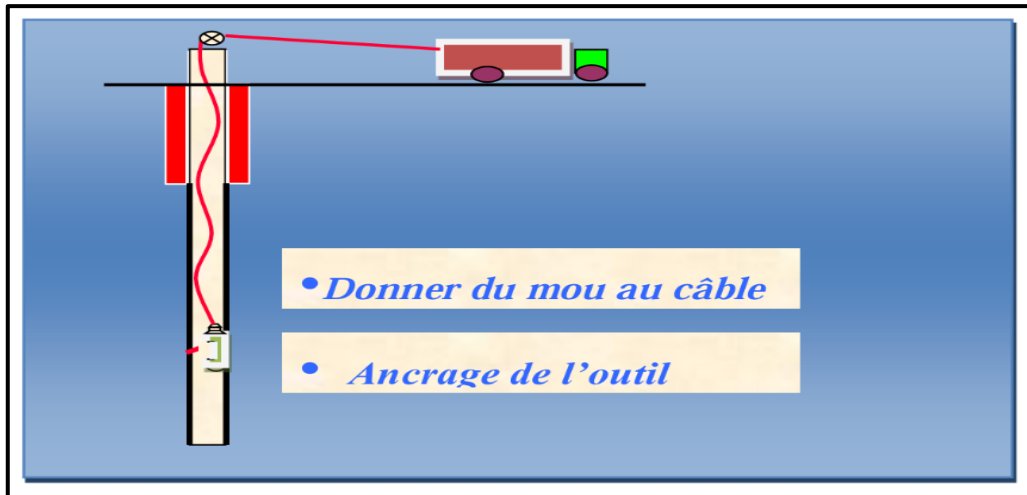


Figure I.13 : Technique de réduction de l'onde de câble.

b. Les ondes de tube :

b.1. Origine :

Les ondes de tube, également appelées ondes de boue, sont des ondes guidées qui se propagent le long de la colonne de fluide dans un puits, qu'il soit tubé ou non. Elles sont principalement générées par les ondes de surface (ondes de Rayleigh) ou par conversion d'énergie aux interfaces géologiques présentant un fort contraste d'impédance acoustique, ainsi qu'au niveau des discontinuités du puits (par exemple, les cavités, les sabots de tubage ou le fond du puits).

b.2. Caractéristiques :

- Les ondes de tube ont un contenu fréquentiel similaire à celui de l'onde source qui les a générées.
- Elles sont répétitives d'un tir à l'autre et ne peuvent pas être éliminées par simple sommation des traces sismiques.
- Leur vitesse de propagation varie entre 1000 et 1500 m/s, en fonction des propriétés de la formation et des caractéristiques du puits.

Dans le domaine de la production pétrolière, les ondes de tube peuvent parfois fournir des informations utiles sur les propriétés physiques des roches, comme la perméabilité. Cependant, dans les enregistrements PSV (Profil Sismique Vertical), elles sont généralement considérées comme un bruit indésirable, car elles masquent les signaux utiles [9].

b.3. Atténuation des ondes de tube :

Plusieurs techniques sont utilisées pour atténuer les ondes de tube :

1. Augmenter l'offset : Un offset plus grand réduit l'amplitude des ondes de surface arrivant au puits.
2. Réduire les ondes de surface à la tête du puits : Abaisser le niveau de la colonne de boue diminue l'amplitude des ondes de surface.
3. Empêcher le transfert d'énergie : Creuser une tranchée entre la source et le puits et éloigner la source d'une distance égale à la demi-longueur d'onde des ondes de surface permet de détourner ces ondes.

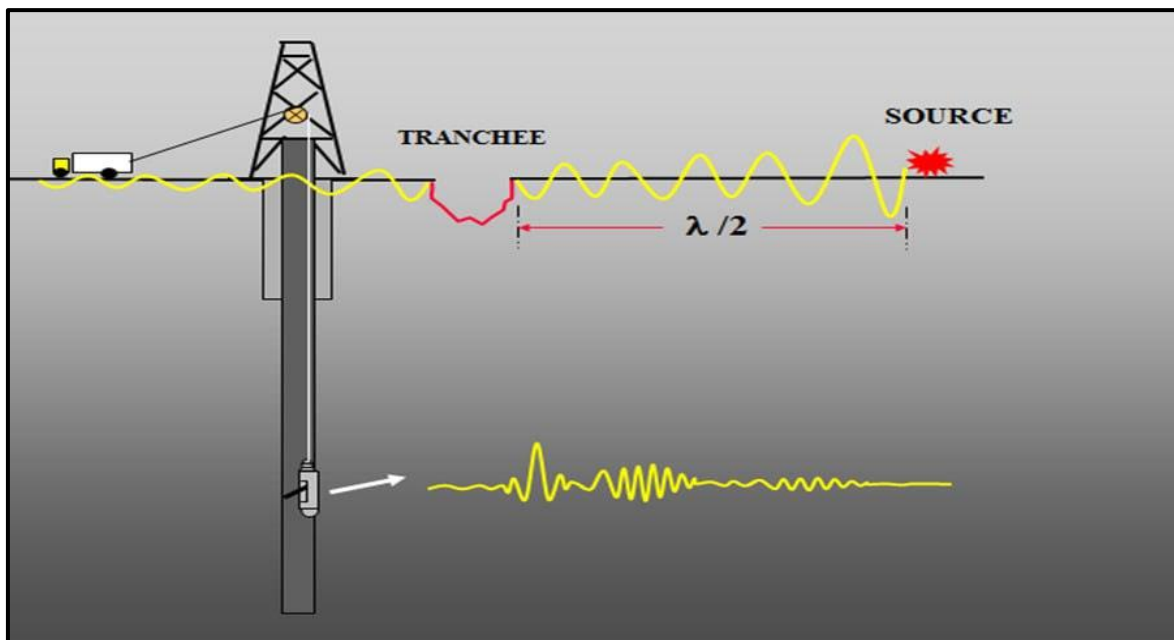


Figure I.14 : Atténuation de l'onde de tube en creusant un tranché entre la source et le puits.

4. Traitement des données : Utiliser des filtres en fréquence ou dans le domaine F-K pour atténuer les ondes de tube lors du traitement des données [17].

I.11. Problèmes rencontrés dans l'établissement d'un Profil Sismique Vertical (PSV) et leurs solutions :

Lors de l'établissement d'un **Profil Sismique Vertical (PSV)**, plusieurs problèmes peuvent survenir, mais des solutions adaptées permettent de les surmonter :

I.11.1. Problèmes d'acquisition :

Problème	Cause	Solution
Bruit de fond élevé	Interférences mécaniques (pompage, forage) ou environnementales	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser des géophones clampés bien couplés - Effectuer des acquisitions nocturnes pour réduire le bruit anthropique
Mauvaise qualité des premières arrivées	Atténuation des hautes fréquences en profondeur	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter l'énergie de la source (vibreur ou explosif) - Utiliser des géophones triaxiaux haute fréquence
Ondes de tube parasites	Résonances dans la colonne de fluide	<ul style="list-style-type: none"> - Placer des absorbeurs de ondes de tube - Utiliser des séquences de tir optimisées

Tableau I.2: Problèmes d'acquisitions rencontrés dans l'établissement d'un PSV.

I.11.2. Problèmes de traitement :

Problème	Manifestation	Solution
Aliasing temporal	Repliement spectral dans les hautes fréquences	<ul style="list-style-type: none"> - Respecter $\tau \leq \frac{1}{4F_{max}}$ - Appliquer des filtres anti-aliasing avant le décimage
Déconvolution inefficace	Ondes multiples résiduelles	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser des opérateurs de déconvolution adaptatifs - Appliquer un traitement Q-compensation
Mauvaise calibration vitesse	Erreurs dans le modèle de vitesse	<ul style="list-style-type: none"> - Corréler avec les diagraphies soniques - Itérer le traitement avec contrôle qualité

Tableau I.3: Problèmes de traitements rencontrés dans l'établissement d'un PSV.

I.12. Conclusion :

Le Profil Sismique Vertical (PSV) est une méthode incontournable en géophysique appliquée, offrant une compréhension approfondie des formations géologiques autour des puits. Grâce à la mesure directe des ondes sismiques dans le sous-sol, le PSV fournit une résolution élevée et une calibration précise des données sismiques de surface.

Les avantages du PSV sont multiples :

- Haute précision : Les données obtenues permettent de relier les temps de trajet aux profondeurs réelles, améliorant ainsi l'imagerie des structures géologiques.
- Caractérisation détaillée des réservoirs : Il offre des informations essentielles sur les propriétés physiques et les hétérogénéités des réservoirs pétroliers et gaziers.
- Investigation latérale : En fournissant des informations sur les structures éloignées du puits, il aide à identifier des discontinuités comme les failles et les dômes de sel.

Cependant, la mise en œuvre du PSV exige une planification minutieuse, notamment dans le choix du matériel et des paramètres d'échantillonnage pour garantir des données fiables et exploitables.

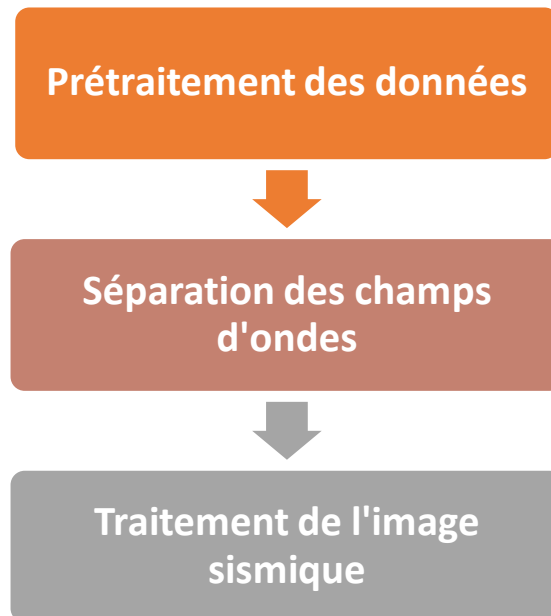
En résumé, le PSV constitue un outil essentiel pour les industries pétrolières et gazières, ainsi que pour les études géologiques complexes, grâce à sa capacité à fournir des données précises et diversifiées. Il est un complément précieux à la sismique de surface pour optimiser l'exploration et la production des hydrocarbures.

Chapitre II :
Traitement du
PSV zéro offset.

II. Introduction:

Le traitement des données PSV Zéro offset se subdivise en trois phases majeurs qui sont :

- Le prétraitement des données
- La séparation des champs d'ondes montant et descendant,
- Enfin le traitement de l'imagerie sismique.

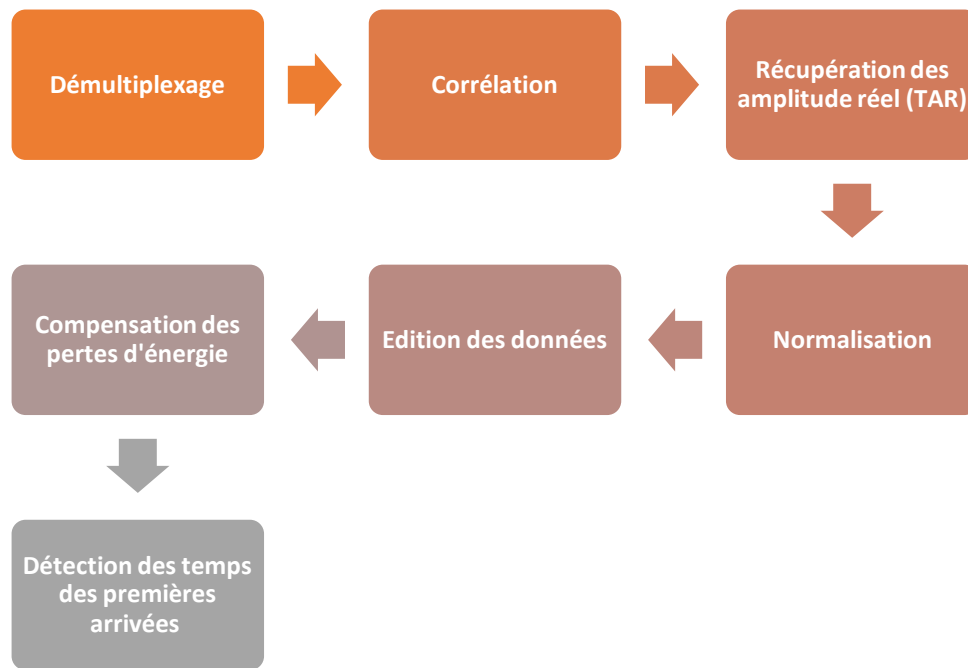


Organigramme II.1 : Différentes phases de traitement d'un PSV Zéro Offset.

Le traitement des données de **Profil Sismique Vertical (PSV Zéro Offset)** a pour objectif principal de séparer les ondes montantes des descendantes, afin de produire une trace sismique sans multiples, comparable à un sismogramme synthétique. Les étapes clés incluent le contrôle de qualité des données, les corrections statiques des temps de trajet, le filtrage des bruits parasites, la séparation des ondes montantes et descendantes, et la déconvolution pour améliorer la résolution temporelle. Les vitesses des ondes sont ensuite extraites pour convertir les temps en profondeurs réelles. Enfin, les données corrigées sont empilées pour générer une trace synthétique permettant une interprétation géologique précise et une calibration fiable des données de surface [9].

II.1. Prétraitement:

Le prétraitement constitue une étape essentielle dans la préparation des données de terrain avant leur traitement. Il vise à améliorer la qualité des signaux enregistrés et à corriger les effets indésirables introduits lors de l'acquisition. Cette phase comprend plusieurs opérations clés :



Organigramme II.2 : Séquence de Prétraitement d'un PSV.

II.1.1. Le démultiplexage:

Le démultiplexage est le processus inverse du multiplexage, permettant de séparer un signal ou un flux de données combiné en plusieurs signaux ou canaux individuels. Il est utilisé pour réorganiser et redistribuer des informations vers leurs destinataires ou composants spécifiques [12].

II.1.2. Corrélation :

La **corrélation** dans le cadre du **Profil Sismique Vertical (PSV)** consiste à associer les événements enregistrés par les récepteurs dans le puits avec les événements sismiques observés à la surface ou dans d'autres profils. Cette opération permet de relier les temps de trajet des ondes aux profondeurs réelles et d'identifier les interfaces géologiques avec précision.

La corrélation repose sur la comparaison des signaux sismiques en fonction de leurs caractéristiques, telles que l'amplitude, la phase et la fréquence. Une bonne corrélation permet de :

- Calibrer les profils sismiques de surface, en associant les temps de réflexion à des profondeurs exactes.
- Améliorer la résolution verticale et la localisation des structures géologiques.

- Identifier les propriétés des réservoirs, comme les changements de lithologie ou de fluides.

Cette étape est indispensable pour intégrer les données du PSV dans des modèles géophysiques et pour valider les interprétations des réservoirs pétroliers et gaziers [9][17].

II.1.3. Récupération des amplitude réel (TAR):

Lors de l'enregistrement des données au niveau du laboratoire, un gain est appliqué à chaque échantillon. Ce traitement permet donc de récupérer l'amplitude vraie des traces en enlevant le gain appliqué au laboratoire [17].

II.1.4. Normalisation :

La normalisation est une étape essentielle du traitement sismique qui vise à homogénéiser les amplitudes des traces en fonction d'un niveau de référence. Cette opération est réalisée en sélectionnant une fenêtre de calcul centrée sur les premières arrivées, puis en ajustant l'amplitude de chaque trace pour atteindre une valeur moyenne souhaitée. Cela est obtenu en multipliant chaque trace par un coefficient d'échelle supérieur ou inférieur à l'unité [17].

II.1.5. Édition des données :

L'édition des données comprend plusieurs opérations visant à améliorer la qualité du signal:

- Calibrage en amplitude : il consiste à appliquer un facteur de correction fixe à chaque trace, basé sur la comparaison entre sa signature et une signature de référence, afin d'assurer une cohérence énergétique entre les différentes traces.
- Suppression des traces bruitées : les enregistrements présentant un niveau de bruit excessif sont éliminés pour éviter toute interférence dans l'interprétation.
- Correction de la polarité : les traces inversées sont corrigées pour respecter la cohérence des phases sismiques.
- Somme des traces du même niveau d'enregistrement : cette opération permet d'améliorer le rapport signal/bruit en combinant les enregistrements issus d'une même profondeur [9].

II.1.6. Compensation des pertes d'énergie :

Lors de la propagation des ondes sismiques dans le sous-sol, l'amplitude du signal diminue sous l'effet de plusieurs facteurs. La compensation des pertes d'énergie est essentielle pour garantir des amplitudes représentatives des coefficients de réflexion.

A. Facteurs influençant l'atténuation des ondes sismiques :

A.1. Divergence sphérique :

La divergence sphérique entraîne une diminution de l'amplitude de l'onde sismique en raison de l'expansion du front d'onde. Cette perte est généralement plus importante que les autres formes d'atténuation. La correction de cette atténuation repose sur un facteur correctif donné par :

$$G = \frac{1}{D} \dots \dots \dots (27)$$

où :

- G est le facteur correctif,
- D est la distance parcourue par l'onde.

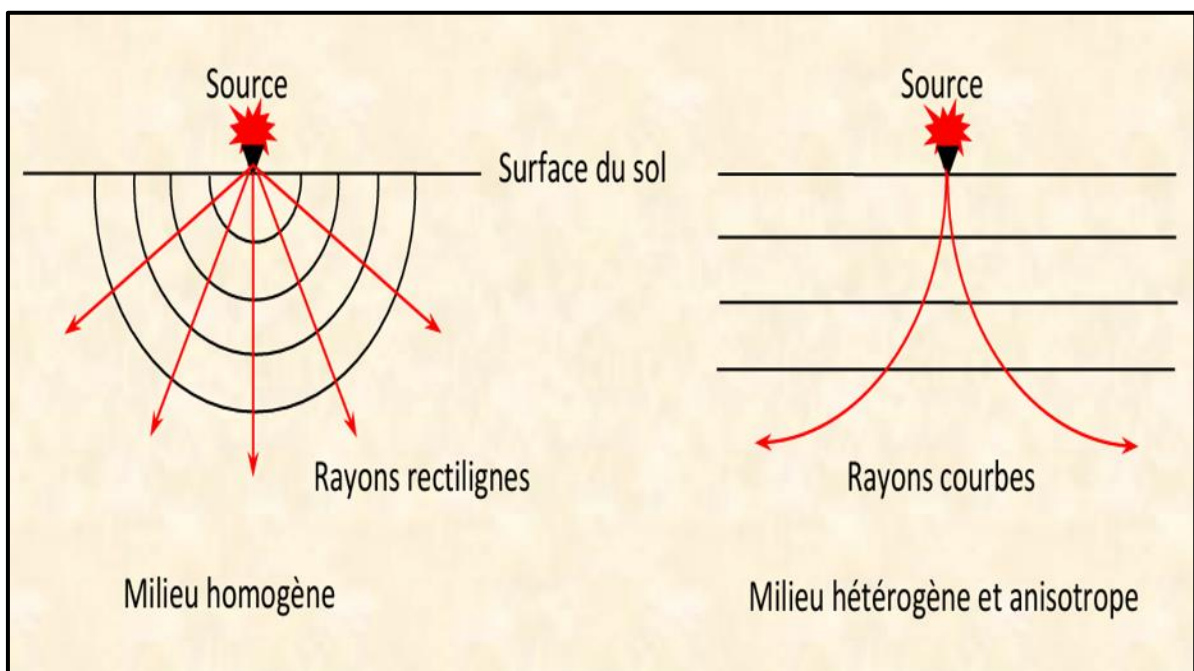


Figure II.1 : Divergence sphérique .

A.2. Absorption :

L'absorption est due à la transformation d'une partie de l'énergie sismique en chaleur à cause de la nature non parfaitement élastique du sous-sol. Cette atténuation suit généralement une loi exponentielle :

$$A(f, x) = A_0 e^{-\alpha(f)x} \dots \dots \dots (28)$$

où :

- $A(f, x)$ est l'amplitude à une distance x de la source,
- A_0 est l'amplitude initiale,
- $\alpha(f)$ est le coefficient d'absorption, qui dépend de la fréquence et est donné par :

$$\alpha(f) = \frac{\pi f}{QV} \dots \dots \dots (29)$$

où :

- f est la fréquence de l'onde,
- V est la vitesse de propagation,
- Q est le facteur de qualité du milieu.

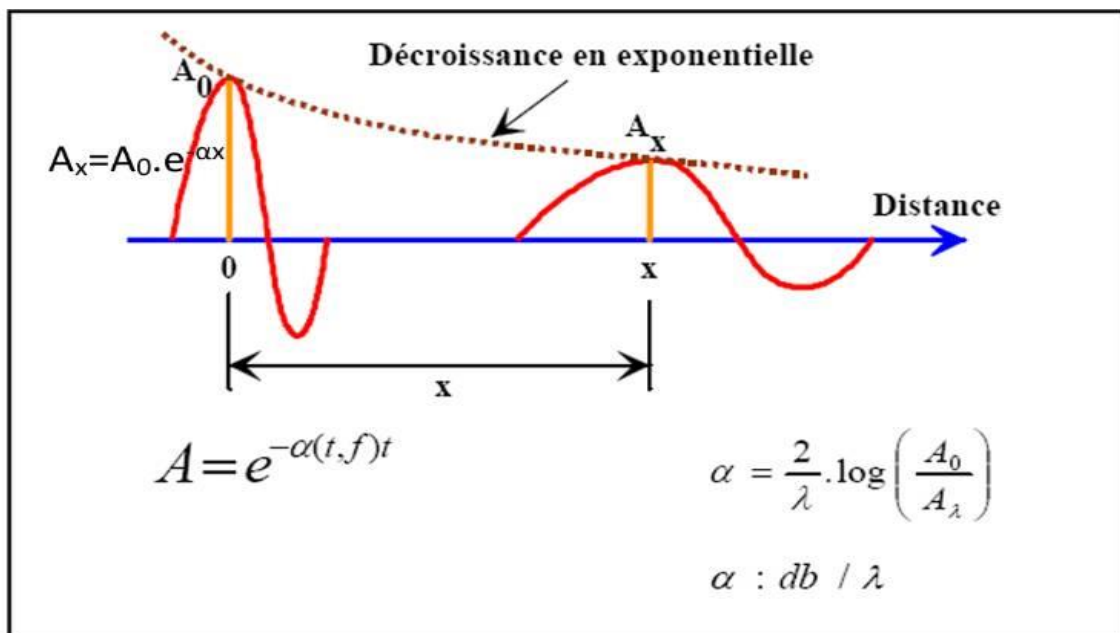


Figure II.2 : L'absorption (Bob. A. HARDAGE 1985).

A.3. Pertes par transmission :

À chaque interface rocheuse rencontrée, une partie de l'énergie de l'onde est réfléchie, tandis que l'autre partie est transmise en profondeur. L'énergie transmise est réduite en fonction du coefficient de réflexion R_i à chaque interface i (figure II.3). L'atténuation cumulative est donnée par :

$$A_n = A_0 R_n \prod_{i=1}^{n-1} (1 - R_u^2) \dots \dots \dots (30)$$

où n est le nombre d'interfaces traversées.

Afin de compenser ces pertes et obtenir des amplitudes représentatives des coefficients de réflexion, des corrections spécifiques sont appliquées en fonction de la nature des données et de l'objectif d'interprétation [15].

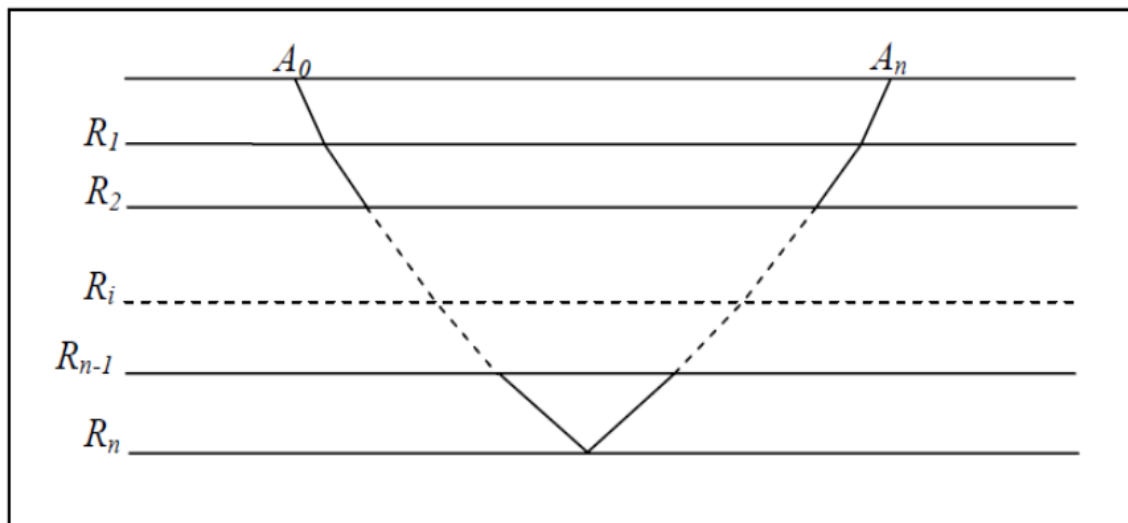


Figure II.3 : Le phénomène de transmission d'une onde sismique.

B. Égalisation dynamique :

L'égalisation dynamique vise à maintenir une amplitude constante tout au long de la trace sismique en appliquant un gain adaptatif. La valeur de ce gain est déterminée en fonction de l'inverse de la moyenne des amplitudes absolues des échantillons d'une trace dans une fenêtre donnée.

$$G(t) = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_i(t)|} \dots \dots \dots (31)$$

- $A_i(t)$ représente les amplitudes des échantillons dans la fenêtre,
- N est le nombre total d'échantillons dans la fenêtre,
- $G(t)$ est le gain appliqué.

Cette méthode permet de :

- Atténuer les fortes amplitudes au début de la trace,
- Amplifier les faibles amplitudes en fin de trace,
- Harmoniser l'énergie des traces proches et lointaines.

L'objectif est d'obtenir une section sismique avec une densité d'énergie homogène latéralement et en profondeur. Cette approche est particulièrement adaptée à l'interprétation structurale [17].

C. Égalisation avec préservation des amplitudes relatives :

L'objectif de cette approche est de garantir que les amplitudes sismiques restent fidèles aux variations des coefficients de réflexion, après élimination des effets parasites. Contrairement à l'égalisation dynamique, elle applique un gain uniforme sur chaque trace pour préserver ses caractéristiques propres [17].

Les principales méthodes utilisées sont :

- **Égalisation par courbe de gain fixe :**

L'amplitude est corrigée en appliquant une fonction mathématique, parmi lesquelles :

– Exponentielle : $G(t, x) = K e^{Lt+Mx} \dots \dots \dots (32)$

– Puissance : $G(t, x) = K t^n x^m \dots \dots \dots (33)$

où K, L, M, m et n sont des constantes déterminées empiriquement pour une région donnée.

- **Égalisation par compensation de la divergence sphérique et de l'absorption :**

Elle repose sur l'application d'un gain de la forme :

$$G(t) = ct^n e^{mt} \dots \dots \dots (34)$$

- $m = 0, n = 1$ pour un milieu homogène.
- $m > 0, n > 1$ pour un milieu hétérogène.

II.1.7. Détection des temps des premières arrivées :

Cette étape consiste à détecter et marquer les temps d'arrivée des premières ondes enregistrées. Ces temps sont essentiels pour :

- L'horizontalisation des ondes montantes et descendantes,
- Le calcul des vitesses sismiques (vitesse moyenne, vitesses d'intervalles et RMS).

Cette détection est généralement réalisée par picking automatique ou manuel, en utilisant des algorithmes de détection des amplitudes maximales ou des changements de phase.

II.2. Traitement PSV Zéro Offset :

Après la phase de prétraitement, la séquence de traitement appliquée suit l'organigramme suivant :

1. Prétraitement
2. Détection des temps des premières arrivées
3. Séparation des champs d'ondes
 - Ondes montantes
 - Ondes descendantes
4. Correction statique
5. Le mute
6. Le couloir de sommation

II.2.1. Séparation des champs d'ondes :

L'enregistrement sismique en puits, qu'il soit de type profil sismique vertical PSV zéro offset ou à offset, comprend plusieurs types d'ondes : ondes montantes, ondes descendantes, ainsi que divers bruits (ondes de tube, ondes de câble, etc.). Afin d'obtenir une imagerie précise du sous-sol, il est essentiel de séparer les ondes montantes des ondes descendantes [9]. Pour ce faire, différentes méthodes de filtrage sont employées :

- Filtre médian.
- Filtrage en vitesse apparente (filtre F-K).
- Filtre (τ , p).
- Transformation de Karhunen-Loeve (Filtre KL).

A. Filtre médian :

Le filtre médian est un filtre non linéaire largement utilisé en sismique de puits pour séparer les ondes montantes et ondes descendantes. Il fonctionne en appliquant une fenêtre glissante en temps ou en distance, remplaçant chaque échantillon par la valeur médiane des N échantillons voisins classés par ordre croissant ou décroissant [17]. Cette approche permet d'éliminer efficacement les valeurs aberrantes isolées et de préserver les événements cohérents horizontalement.

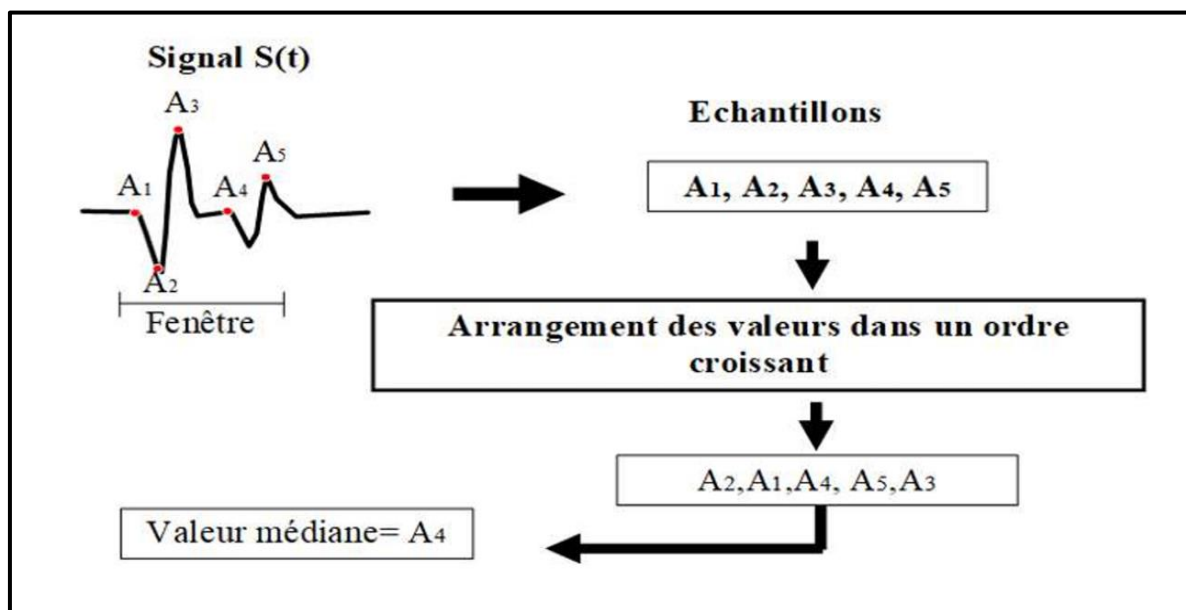


Figure II.4 : Principe du filtre médian.

En sismique PSV Zéro Offset, le filtre médian est appliqué après horizontalisation des ondes à extraire. Pour isoler les ondes descendantes, chaque trace est décalée statiquement en fonction de son temps de première arrivée, le filtre médian est appliqué, puis le décalage est réajouté. Les ondes montantes sont obtenues en soustrayant le champ des ondes descendantes du signal total [15]. Une alternative consiste à horizontaliser directement les ondes descendantes avant application.

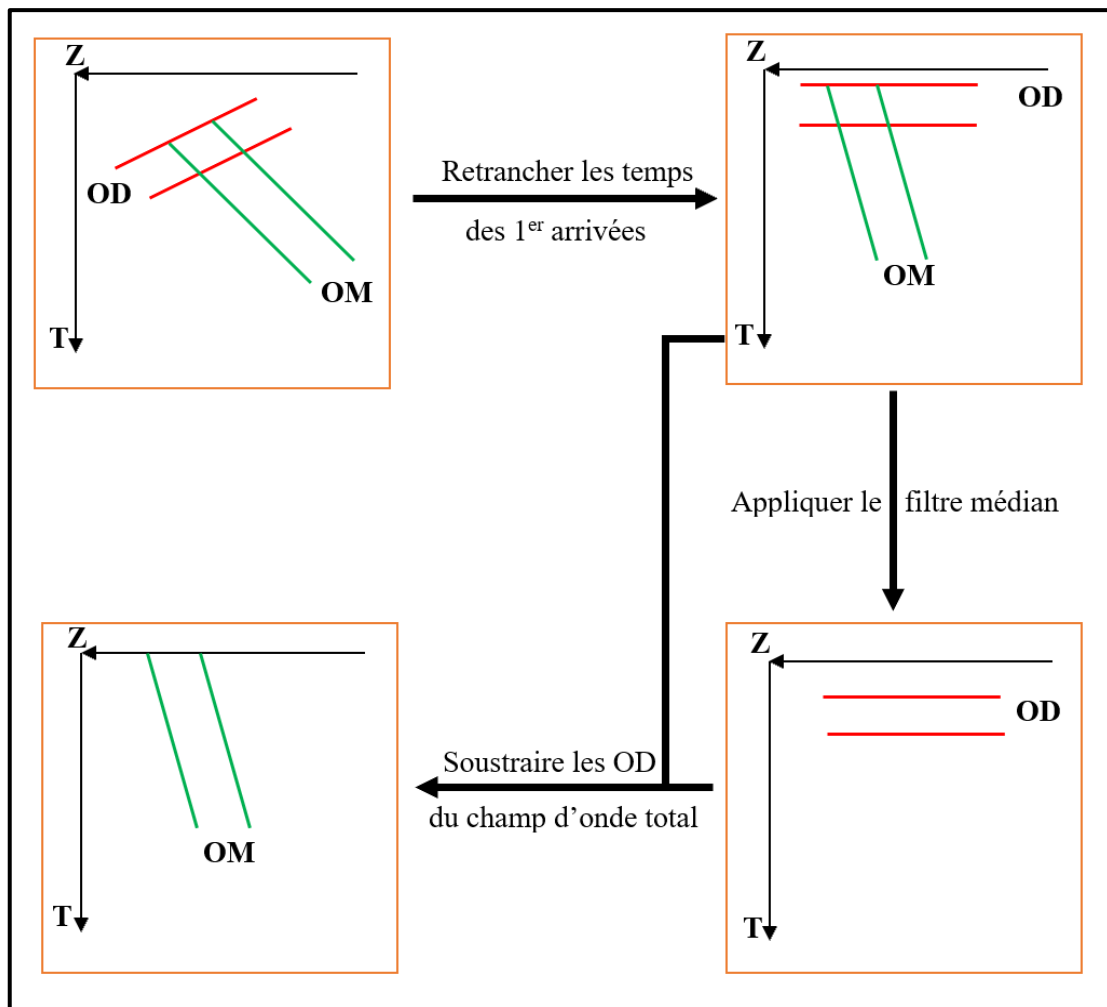


Figure II.5 : Le filtre médian.

Ce filtre est apprécié pour sa rapidité, efficacité et sa capacité à éliminer le bruit impulsionnel sans supposer d'espacement fixe entre niveaux d'enregistrement. Il est souvent utilisé en cascade (avec des ordres croissants) pour améliorer la séparation des ondes.

B. Filtrage dans le domaine F-K :

Le filtrage F-K est une technique de séparation des ondes basée sur leur fréquence et leur nombre d'onde. Il permet d'isoler les ondes montantes et descendantes, qui possèdent des vitesses apparentes de signe opposé.

Cette méthode repose sur l'application de la transformée de Fourier 2D aux données enregistrées en fonction du temps et de la profondeur, ce qui les convertit dans le domaine fréquence-nombre d'onde (F-K). L'analyse est valide uniquement lorsque la distance entre les points d'enregistrement est régulière [9].

Dans le plan F-K, les ondes montantes apparaissent dans la région des nombres d'onde négatifs (vitesse apparente négative), tandis que les ondes descendantes se situent dans la zone des nombres d'onde positifs (vitesse apparente positive). Le filtrage est réalisé en supprimant les événements indésirables en multipliant leurs amplitudes par zéro, tout en conservant les événements utiles avec un facteur un (figure II.6).

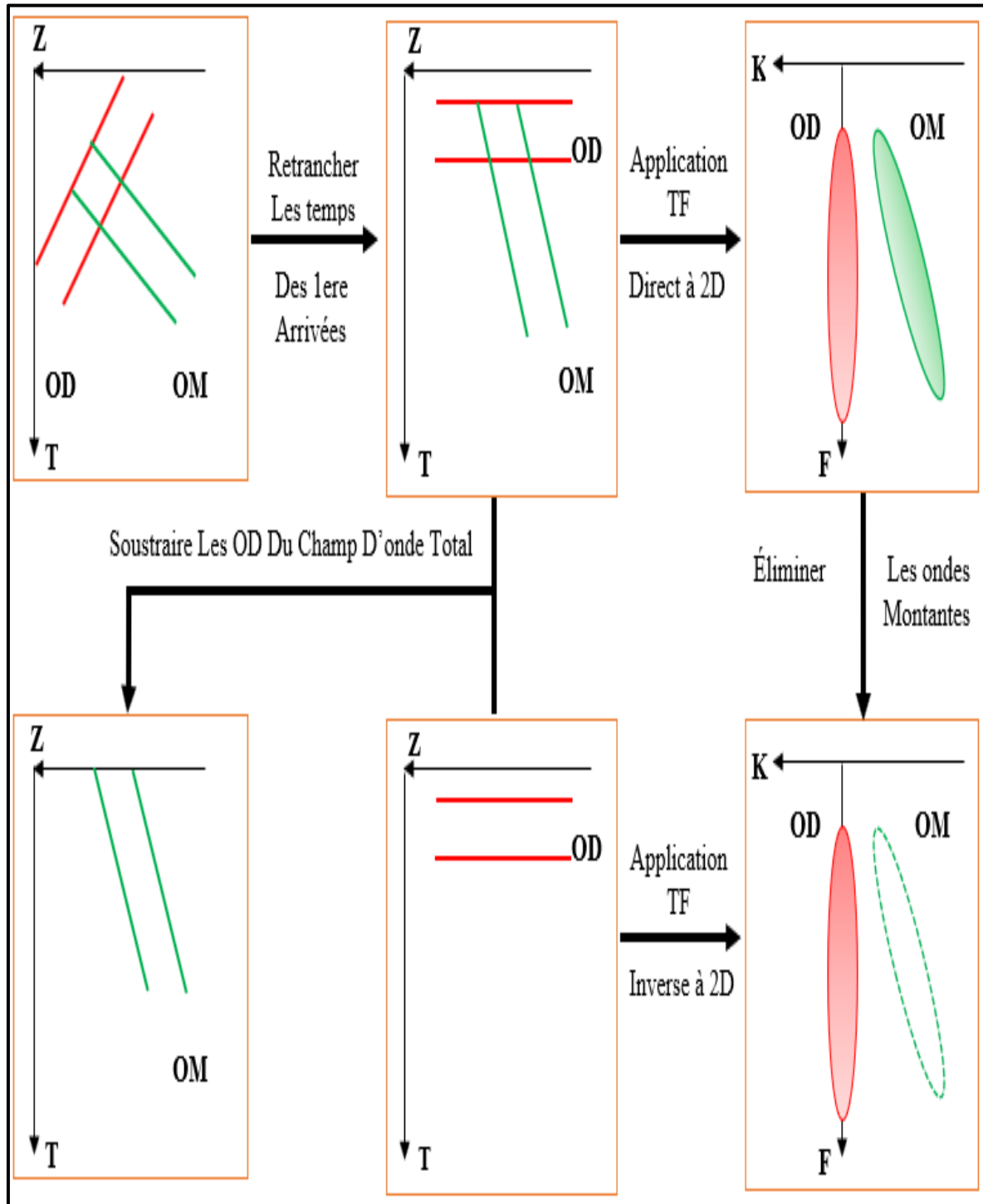


Figure II.6 : Le principe du filtre F-K.

C. Filtrage dans le domaine (τ, p) :

Le filtrage dans le domaine (τ, p) , également appelé filtrage par décomposition en ondes planes, repose sur la transformée de Radon [17]. Cette transformation permet de représenter un événement sismique en fonction de son intercepte (τ) et de sa pente (p) , facilitant ainsi la distinction entre différents types d'événements.

$$R[f(x, t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t) \delta[t - (\tau + px)] dt dx \dots \dots \dots (35)$$

Avec : $f(x, t) \delta[t - (\tau + px)] = f(x, \tau + px) \dots \dots \dots (36)$

D'où : $R[f(x, t)] = U(p, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, \tau + px) dx \dots \dots \dots (37)$

Dans le domaine (τ, p) :

- Une droite $t = x/V_0 + \tau_0$ est transformée en un point de coordonnées $\tau = \tau_0, p = \frac{1}{V_0}$.
- Une hyperbole devient une ellipse, ce qui permet de séparer plus facilement les événements superposés.

L'un des principaux avantages de cette méthode est la possibilité de séparer les ondes montantes et descendantes en exploitant leurs vitesses apparentes opposées.

- Les événements descendants apparaissent dans la zone des pentes positives.
- Les événements montants apparaissent dans la zone des pentes négatives.

Deux approches principales permettent cette séparation :

1. Élimination d'un demi-plan : en annulant les valeurs d'un demi-plan avant d'appliquer la transformée inverse [13] (figure II.7).

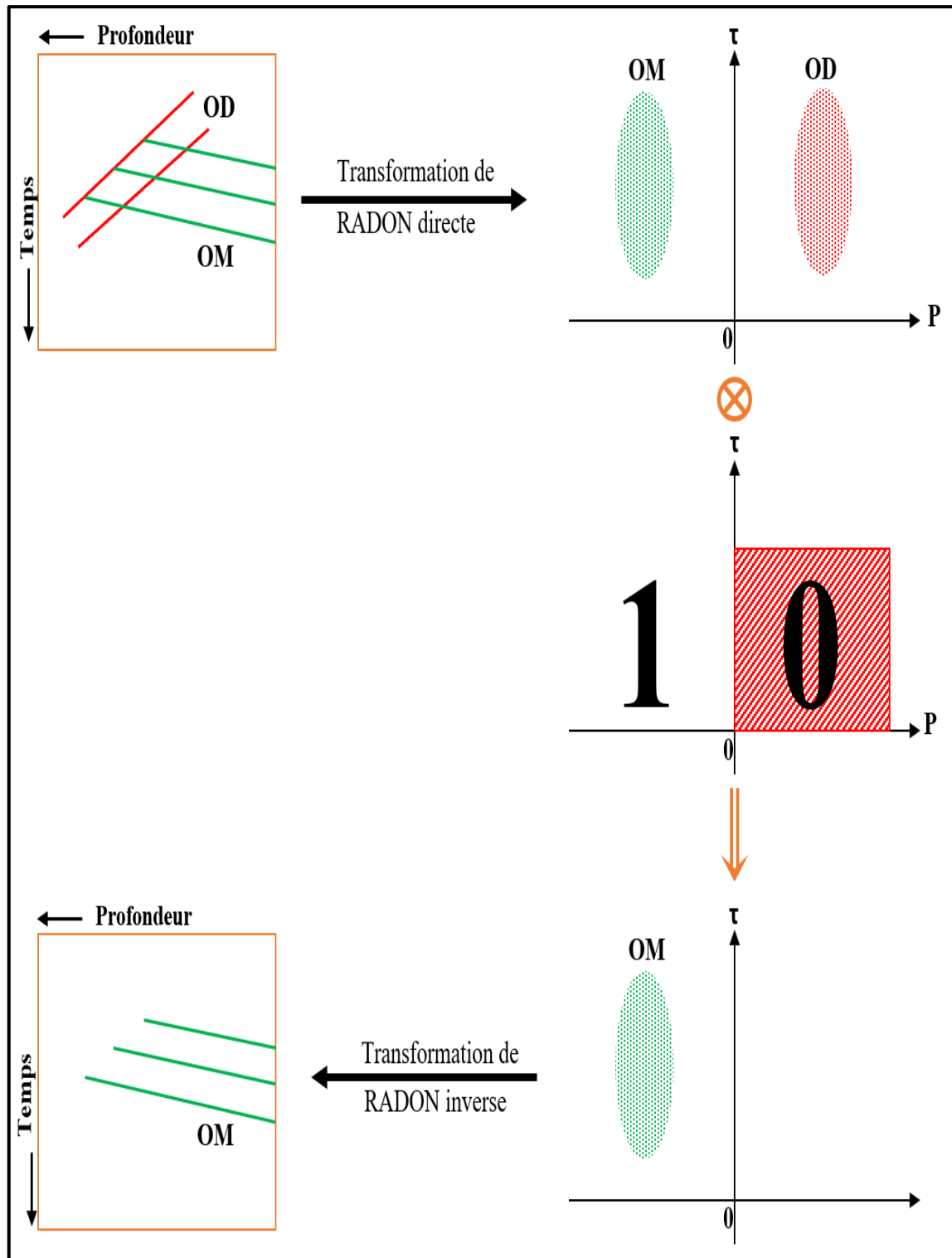


Figure II.7 : Filtrage dans le domaine (τ, p) [Élimination d'un demi-plan].

2. Alignement horizontal et fenêtrage : en recentrant l'événement autour de $p=0$, appliquant une fenêtre restreinte et supprimant les valeurs en dehors de celle-ci avant d'effectuer la transformée inverse (figure II.8).

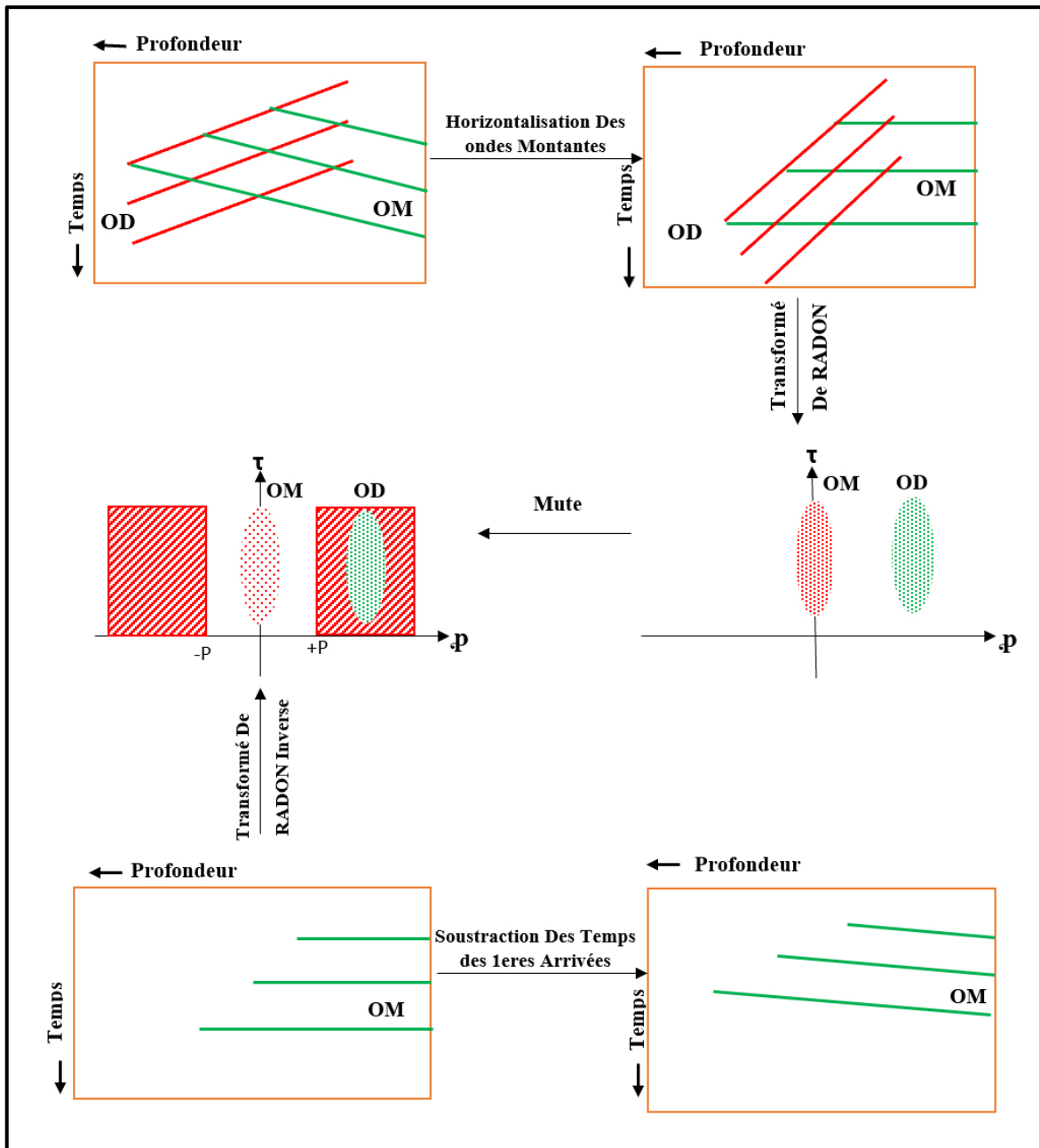


Figure II.8 : Filtrage dans le domaine (τ, p) [Alignement horizontal et fenêtrage].

D. Transformation de Karhunen-Loeve (KL) :

La transformation de Karhunen-Loève (KL) est une technique utilisée pour améliorer le rapport signal/bruit et séparer les ondes montantes et descendantes dans les données de sismique de puits [15]. Cette méthode repose sur l'analyse statistique des signaux enregistrés, permettant d'extraire les composantes principales et de filtrer le bruit.

L'application de la transformation KL nécessite :

- L'horizontalisation des ondes montantes.
- La détermination d'un axe optimal de projection pour séparer les ondes.

La reconstruction des traces après pondération avec les composantes du vecteur propre U permet d'extraire uniquement les ondes montantes et le bruit qui leur est colinéaire. Une approche similaire peut être appliquée aux ondes descendantes en modifiant l'étape d'horizontalisation.

L'un des principaux avantages de cette méthode est qu'elle ne repose sur aucune hypothèse concernant l'espacement entre les niveaux d'enregistrement, tolère de légères erreurs dans l'alignement des premières arrivées et garantit un signal temporel bien défini sans distorsion [2].

II.2.2. Traitement de l'imagerie sismique :

Le traitement des données sismiques, dont l'objectif est de positionner correctement les réflecteurs, est assimilable à une opération de migration avant sommation. Cette opération nécessite un modèle structural ainsi qu'une estimation précise du champ de vitesse [3].

Après la séparation des ondes, le traitement est appliqué exclusivement aux ondes montantes (composante Z ou R) déconvoluées. Il comprend généralement :

- Correction statique : elle permet d'obtenir le temps double de parcours.

A. Déconvolution :

Le processus de déconvolution consiste en une convolution avec un filtre inverse, visant à compacter les impulsions enregistrées ou à atténuer les multiples [9].

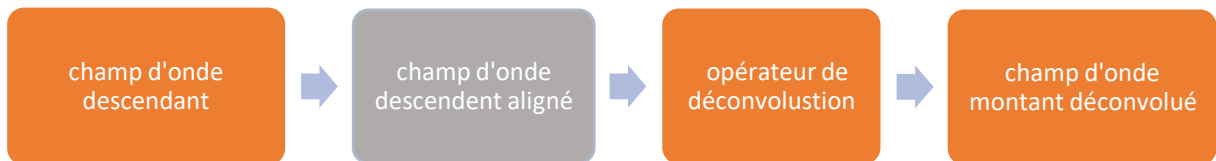
Dans le cas d'un PSV zéro offset, l'opérateur de déconvolution est calculé dans une fenêtre de temps délimitée sur les ondes descendantes horizontalisées. En raison des réverbérations induites par les couches superficielles, le signal réellement émis dans le sous-sol est une convolution de la signature de la source avec le système réverbérant. Ainsi, les ondes montantes résultent de la convolution de la série des coefficients de réflexion avec les ondes descendantes, plutôt qu'avec la signature initiale de la source (Figure II.9). Par conséquent, la déconvolution est réalisée en appliquant à chaque trace l'opérateur correspondant.

L'opération se fera la relation comme suit :

$$M(z, t) = D(z, t) * R_Z(t) \dots \dots \dots (38)$$

$$R_Z(t) = D^{-1}(z, t) * M(z, t) \dots \dots \dots (39)$$

- $M(z, t)$: Champ d'ondes montantes.
- $D(z, t)$: Champ d'ondes descendantes.
- $R_Z(t)$: Série des coefficients de réflexion.
- $D^{-1}(z, t)$: Opérateur de déconvolution.



Organigramme II.3 : Diagramme de déconvolution.

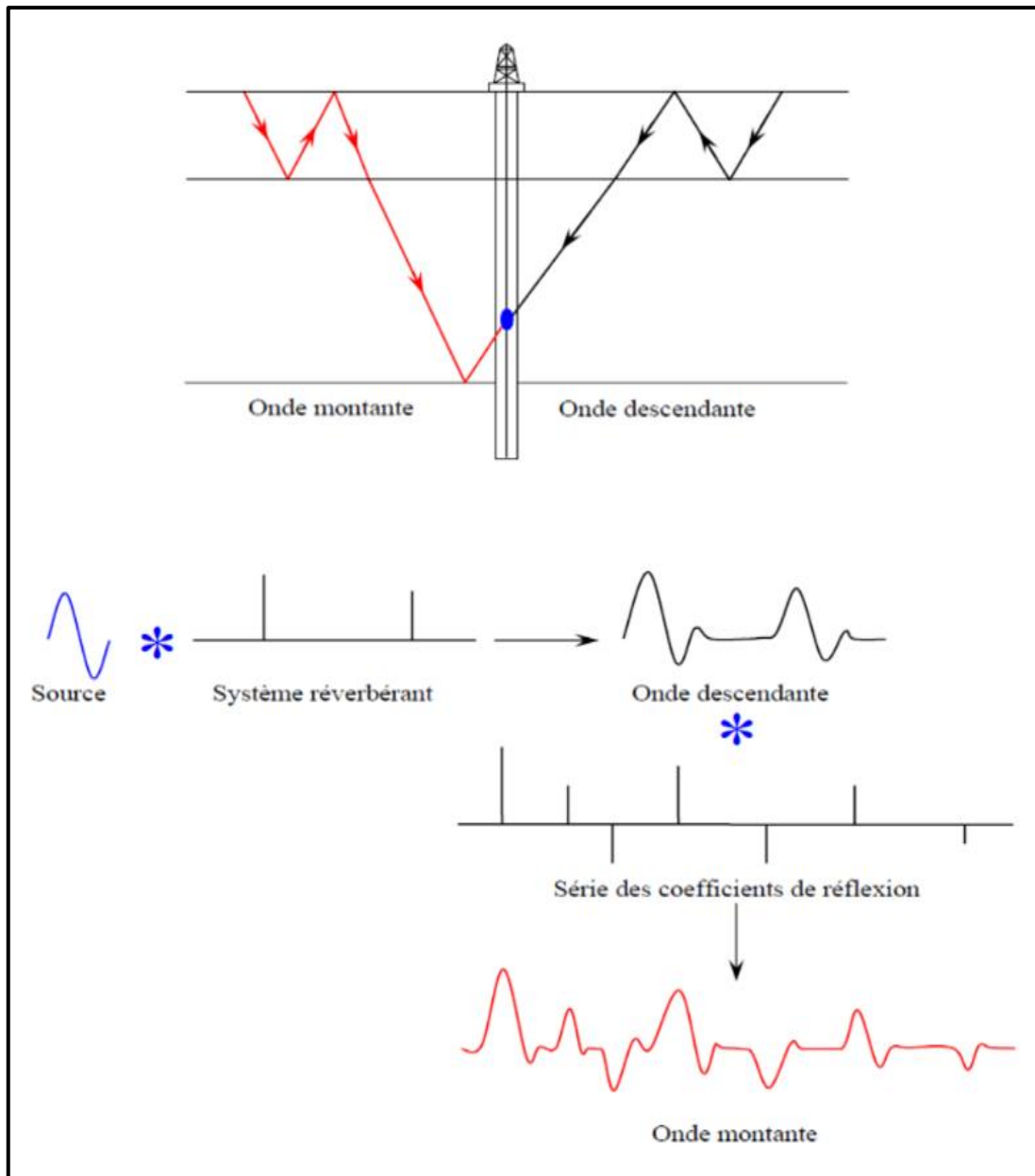


Figure II.9 : Modèle implicite des ondes montantes utilisé pour la déconvolution (documentation Sonatrach).

B. Correction statique :

Une correction statique est nécessaire pour ramener les données en surface. Cette correction compense l'effet du trajet vertical entre le récepteur et la surface, en appliquant un décalage temporel correspondant à Z/V , où Z est la profondeur du récepteur et V la vitesse du milieu. Une fois cette correction appliquée, les événements sismiques sont repositionnés en temps double, rendant l'enregistrement comparable à une sismique de surface [16].

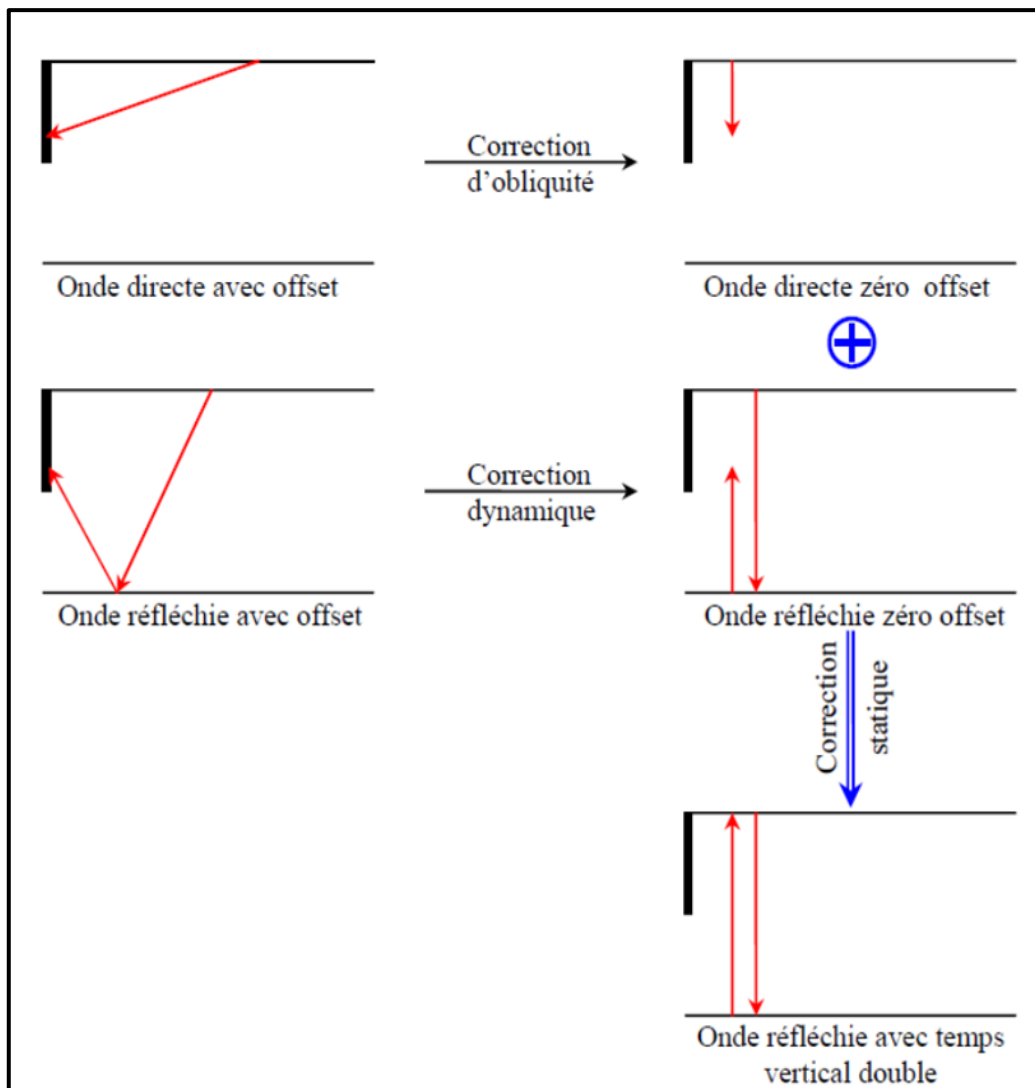


Figure II. 10 : Correction statique.

C. Le Mute :

Le MUTE (ou masquage temporel) consiste à éliminer sélectivement certaines portions des traces sismiques pour améliorer la qualité des résultats finaux.

Dans le cas du PSV on applique un top mute pour supprimer tous les bruits qui précèdent l'arrivée directe [15].

D. Le couloir de sommation (corridor stack) :

Afin de faciliter la comparaison de l'onde montante du PSV avec la section sismique, on peut sommer les traces selon l'axe des Z dans un couloir suivant immédiatement la première arrivée appelé le corridor stack.

La trace somme ainsi obtenue est comparable à la trace sismique de surface au voisinage du puits. On choisit un couloir de sommation étroit de façon à ne conserver que le signal réfléchi reçu immédiatement après la première arrivée. La trace somme est alors comparable à un film synthétique sans multiple [16].

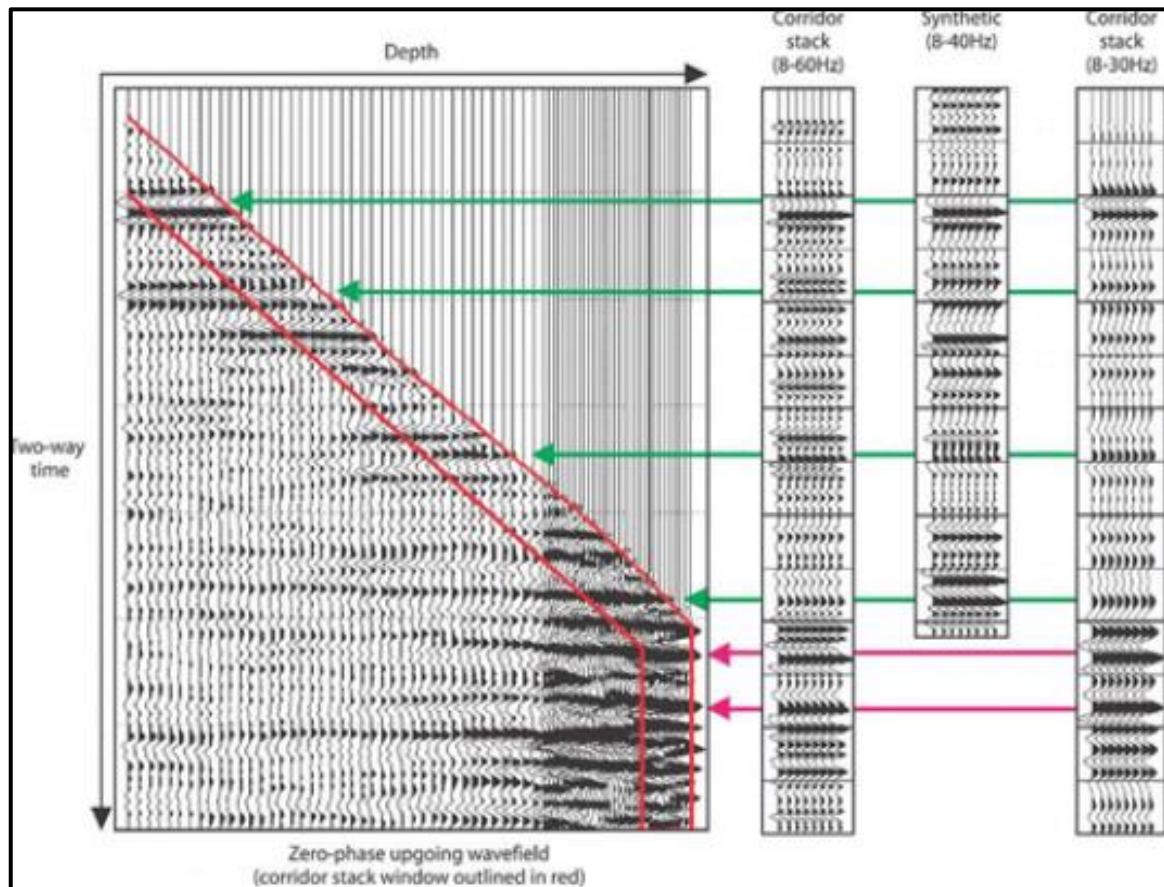


Figure II.11 : Exemple d'un corridor stack (SEG Library).

II.3. Le calage avec la sismique de surface :

Le rôle du calage **PSV** avec la sismique de surface est d'identifier les objectifs géologiques sur section sismique. Cette dernière est l'image du sous-sol dont les tops des formations géologiques sont en temps doubles, ce qui rend impossible leur identification. Pour se faire, le calage du **PSV** et de la section sismique passant par le puits (où est enregistré le **PSV**) de la façon suivante :

- On s'assure que les échelles de la section **PSV** et de la section sismique de surface sont les mêmes.
- On ramène au même niveau de référence la section **PSV** et la section sismique de surface.
- On fait coïncider le **PSV** sur la section sismique de surface.

- On suit les réflecteurs (objectifs) qui coïncident avec le **PSV**.

La **Figure IV.1** présente le calage d'une section sismique de surface passant par les puits **A** et **B**. La distance entre les deux puits est de 1600 m. Le calage est effectué en utilisant les ondes montantes déconvoluées des **PSV** enregistrés aux puits **A** et **B**.

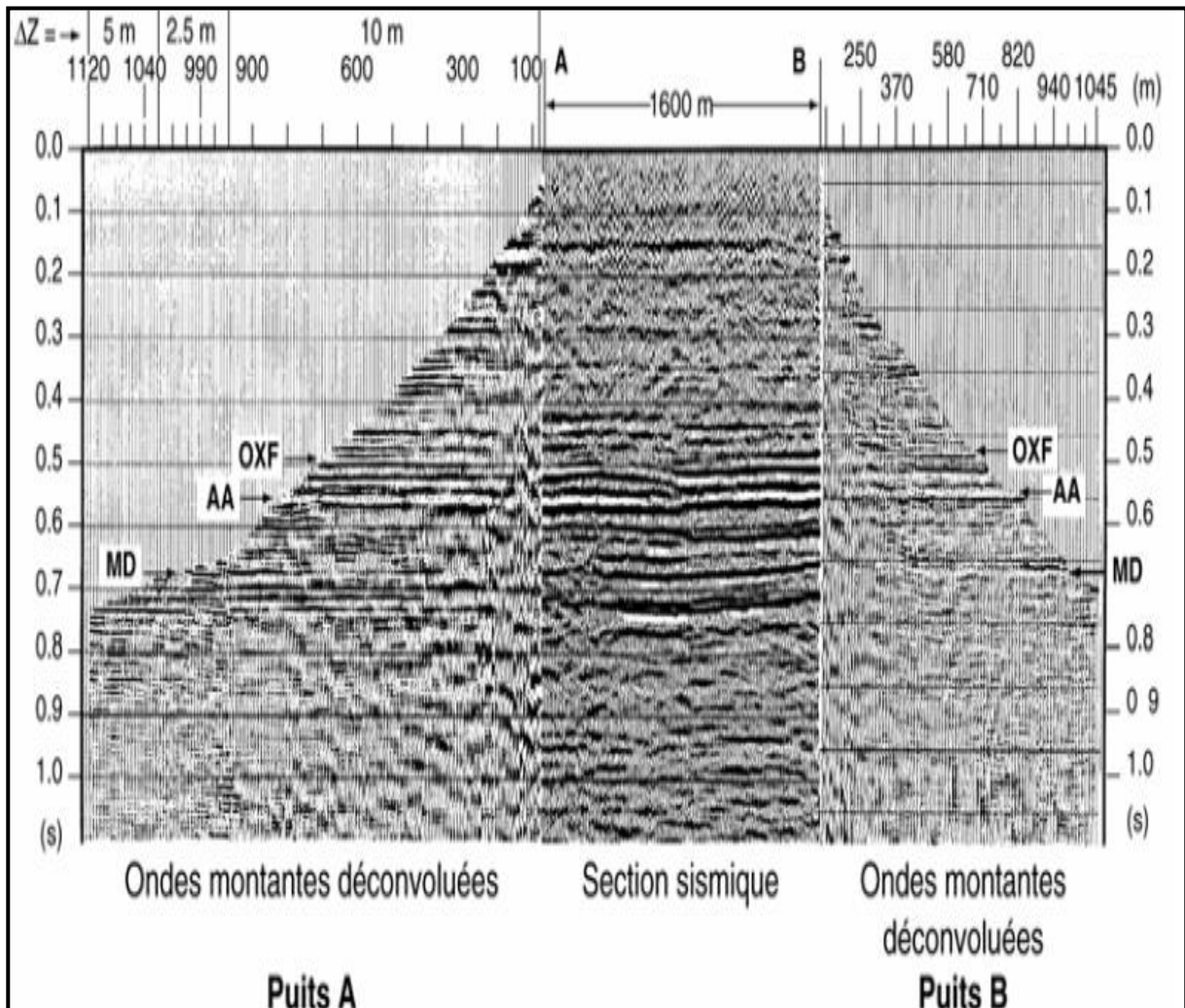


Figure II.12 : Calage d'une section sismique de surface passant par les puits A et B

- On remarque que les horizons **OXF**, **AA** et **MD** sont des grandes marqueurs et les plus visibles dans les puits **A**, **B** et celle de la section sismique de surface.
- On remarque aussi une bonne calibration avec la section sismique de surface.

II.4. Conclusion:

Le traitement du PSV à offset nul constitue une méthode fondamentale en sismique de puits, permettant d'obtenir une image précise des formations géologiques le long de l'axe vertical du puits. Cette approche se distingue par sa relative simplicité et son efficacité pour l'étalonnage des données sismiques.

La séparation des différents types d'ondes (P, S) s'effectue par l'application de filtres adaptés, dont les paramètres sont optimisés grâce à des tests itératifs. Dans certains cas, notamment lorsque les conditions le permettent, des techniques plus avancées comme le filtre Médian peuvent être employées pour améliorer la séparation des différents champs d'ondes.

Contrairement aux méthodes plus complexes comme le PSV oblique ou la migration, le PSV Zéro Offset produit en sortie une trace sommée unique. Cette simplicité de résultat présente l'avantage d'une interprétation plus directe, tout en permettant des comparaisons utiles avec les données de sismique de surface. Cependant, cette approche présente une limitation majeure : elle ne fournit que des informations strictement le long de l'axe du puits, sans possibilité d'imagerie latérale.

L'efficacité opérationnelle de cette méthode et ses limites pratiques seront démontrées dans le chapitre suivant, à travers une application sur des données réelles. Cette illustration concrète permettra d'apprécier à la fois la valeur et les contraintes de cette approche dans le contexte de l'exploration géophysique moderne.

Chapitre III :
Application sur des
données réelles.

III. Introduction:

Dans ce chapitre on va procéder au traitement des données réelles d'un enregistrement PSV zéro offset réalisé sur le puits AZ-1.

Les données de puits ont été enregistrées et traitées le décembre 2024 par l'Entreprise Nationale Algérienne de Géophysique (ENAGEO) en collaboration avec HESP pour le compte de SONATRACH Division Exploration.

En outre une petite comparaison entre les résultats obtenus par notre traitement réalisé sur le logiciel de traitement PROMAX et les résultats obtenus par société de service sur le logiciel VSPROWESS.

III.1. Généralités sur PROMAX :

PROMAX est un logiciel de traitement sismique développé par Landmark (Halliburton), utilisé pour le traitement des données 2D, 3D et 4D dans l'industrie pétrolière.

Il permet l'importation, la correction, le filtrage, l'analyse de vitesse, l'empilement, la migration et la visualisation des données sismiques.

Ses avantages incluent une interface intuitive et des possibilités d'automatisation, mais il exige une configuration matérielle élevée et une bonne maîtrise technique. Il est principalement utilisé pour l'exploration, le suivi de réservoirs et la sismique 4D.

III.2. Acquisition des données PSV :

III.2.1. Réalisation des travaux :

L'acquisition des données sismiques a été réalisée par l'Entreprise Nationale de Géophysique (ENAGEO), en collaboration avec HESP, pour le compte de la division Exploration de SONATRACH. L'opération a porté sur l'enregistrement d'un Profil Sismique Vertical (PSV) constitué de 250 niveaux, répartis entre 4220 m et 11 m de profondeur. Les tops des formations géologiques ont été correctement identifiés, avec une qualité d'enregistrement jugée satisfaisante.

Les acquisitions ont été effectuées à l'aide du laboratoire mobile Dual Analogue AS 60, et la source sismique utilisée est un vibreur sercel NOMAD-65, modèle P-Wave, positionné à 50 mètres de la tête de puits selon un azimuth de 154°, La dénivelée entre la position de la source et la position du puits est nulle ($Z_{sol} = Z_{source}$). L'enregistrement s'est déroulé lors de la remontée du dispositif (de bas en haut), à l'aide d'un système de réception Geowaves à trois composantes, constitué de trois outils sismiques espacés de 20 m. Chaque

enregistrement couvre une durée de 12 secondes, avec un pas d'échantillonnage de 2 ms. Les profondeurs des niveaux enregistrés sont mesurées à partir de la table de rotation, située à 131.77 m au-dessus du niveau moyen de la Mer (MSL).

Les différents paramètres du puits sont donnés sur le rapport suivant :

➤ **Situation du sondage :**

Le puits AZ-1 se situe dans le périmètre AMGUID MESSAOUD, GRAND TOUGGOUR.

Les coordonnées UTM du puits sont :

– Coordonnées UTM :

X = 318 042,002 m.

Y = 3 515112,002 m.

➤ **Paramètres d'acquisitions :**

• **Puits :**

– Profondeur totale (TD) : 4230 m.

• **Elévation :**

– L'élévation de référence (ZKB) : 131.77 m au-dessus de MSL.

– L'élévation du sol (ZGL) : 121.112 m au-dessus de MSL.

• **Système d'enregistrement:**

– Type : wave-lab (laboratoire mobile Dual Analogue AS 60).

– Pas d'échantillonnage : 2 ms.

– Temps d'enregistrement : 12 sec.

– Temps d'écoute : 5 sec ;

• **Source:**

– Type : P-wave Vibrator Sercel NOMAD-65.

– Offset : 50 m.

– Azimuth : 154°.

– Élévation de la source : 121.112 (= l'élévation du sol).

• **Sweep:**

– Durée du sweep : 12 s.

– Bande fréquentielle : 8-80Hz.

– Sweep Type : Up-sweep linear, zero phases.

– Taper : 300 ms.

- Drive : 80 %.
- **Géophone :**
 - Model : Geowaves (3 Components).
 - Configuration : Gimballed Geophones.
 - Niveau d'enregistrement minimal : 11 m MD/KB.
 - Niveau d'enregistrement maximal : 4220 m MD/KB.

On résume les paramètres utilisés lors de l'acquisition du PSV zéro offset dans le schéma suivant (figure III-1).

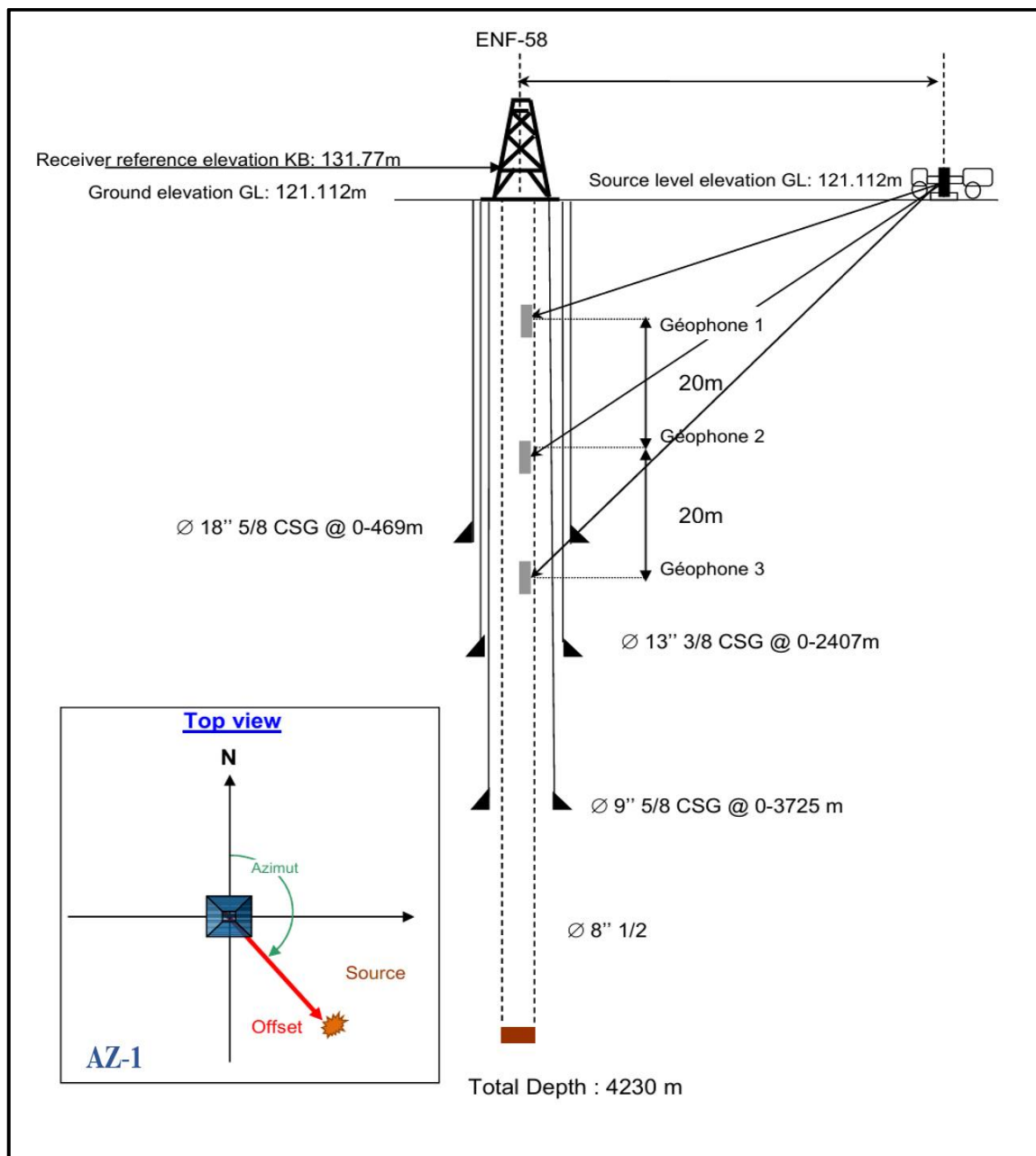


Figure III.1 : Schéma synoptique de la sonde et dispositif d'acquisition du PSV.

III.2.2. Formations traversées :

Les différentes formations traversées par le puits, avec leurs épaisseurs sont données sur le tableau suivant :

Dépôt		Formation	Toit (m)	Mur (m)	Epaisseur (m)	
Cénozoïque	Tertiaire (Surf-200)	Mio-Pliocène	Surface	200	200	
		Eocène	200	250	50	
Mésozoïque	Crétacé (200-1877)	Sénonien	250	769	519	
		Turonien	769	866	97	
		Cénomaniens	866	1081	215	
		Albien	1081	1293	212	
		Aptien	1293	1325	32	
		Barrémien	1325	1639	314	
		Néocomien	1639	1877	238	
	Jurassique (1877-3915)	Malm	1877	2145	268	
		Dogger	2145	2377	232	
		LIAS	2377	3515	1138	
		TRIAS	3515	3915	400	
	Paléozoïque	Silurien (3915-3999)	Silurien	3915	3997	82
		Ordovicien (3999-(± 4200))	Dalle de M'kratta	3997	3999	02
			Argiles Micro-conglomératiques	3999	4034	35
Grès d'Ouargla			4034	4150	116	
Quartzites de Hamra			4150	(± 4200)=TD	± 50	

Tableau III. 1 : Les différentes formations traversées par le puits.

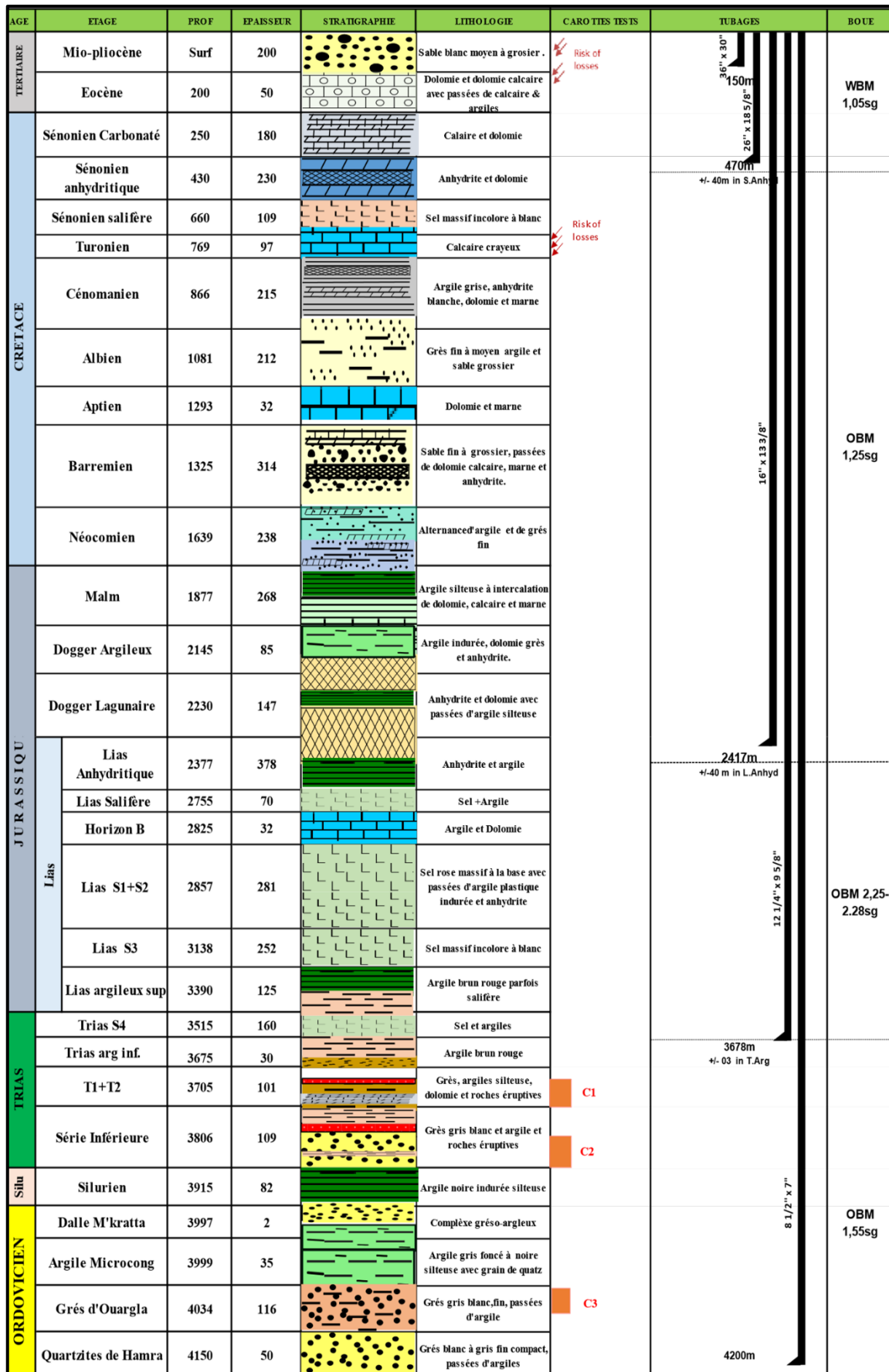


Figure III.2 : Fiche stratigraphique du puit AZ-1.

III.3. Objectif du sondage :

Le sondage AZ-1 a pour but d'exploration des Trias « Série inférieure » qui est le principal objectif dans la concession Amont Le Grand Touggourt et l'Ordovicien « Dalle de M'kratta, Grès d'Ouargla » et le Trias « T1 » sont considérés comme objectifs secondaires.

III.4. Séquence de Traitement du PSV zéro offset :

III.4.1. Prétraitement des données :

Les données sismiques, initialement enregistrées au format MIRF et stockées sur CD, ont été transférées sur ordinateur puis converties au format SEG Y afin d'être compatibles avec les logiciels de traitement sismique (Cette étape ce fait au niveau de Laboratoire).

III.5.2 Traitement du PSV à zéro offset :

A. Données brutes du PSV :

- ✚ **Planche 1** : présente l'enregistrement brut du PSV Zéro Offset, effectué au niveau du puits, incluant les trois composantes : une composante verticale (V_z) et deux composantes horizontales (H_x et H_y) et un Sweep de référence, et constituant de 250 CDP.
- ✚ **Planche 2** : représente l'enregistrement brut du PSV Précédent coupé à 182 CDP (without Free pipe), cela est fait afin d'éliminer les ondes de tube (Free Pipe) qui sont considéré comme bruit.
- ✚ **Planche (3.1-3.2)** : représente les composantes V_z, H_x, H_y et le sweep des références respectivement.

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel PROMAX au centre d'exploration Sonatrach sud, selon les étapes décrites ci-dessous.

NB : Le traitement porte uniquement sur la composante verticale (V_z).

B. Sélection de la composante verticale Z :

L'enregistrement brut du PSV contient à la fois des ondes P et S, montantes et descendantes. À ce stade, nous avons choisi de travailler uniquement avec la composante verticale Z, car le dispositif d'acquisition est à zéro offset, ce qui implique que les trajets d'ondes sont pratiquement verticaux. Cela réduit significativement la présence d'ondes S, qui se propagent préférentiellement selon des trajectoires obliques.

Par ailleurs, les composantes horizontales (Hx et Hy) sont fortement affectées par le bruit, ce qui justifie leur exclusion.

Planche 4 : illustre cette composante Z, qui sera utilisée pour l'ensemble des traitements ultérieurs.

C. Géométrie et habillage des traces :

Cette étape consiste à introduire la géométrie terrain dans le PROMAX dans le but de créer une base de données (Database file) nécessaire à l'habillage des traces sismique par la géométrie. Les informations de la base de données sont chargées dans les Header des traces.

Planche 5 : montre le Header de la trace 56 de la composante Z avant et après habillage.

D. Le pointé des temps des premières arrivées :

Le terme se référant à ce processus dans PROMAX est désigné par «FB_Pick». Nous avons réalisé le pointé par le suivi de la première arrivée très énergétique sur toutes les traces. Les valeurs de temps pointées sont sauvegardées dans la base de données, A partir du pointé des premières arrivées de la composante Vz du PSV zéro offset on calcule les différentes vitesses à savoir la vitesse moyenne, quadratique moyenne RMS et ainsi que la vitesse d'intervalle. Ce qui serve dans les traitements ultérieures : compensation des pertes d'énergie (TAR) et l'alignement des ondes montantes et descendantes.

Planche 6 : montre le pointé des premières arrivées.

E. Calcul des vitesses :

On a établi la Courbe temps – profondeur à partir du pointé des premières arrivées qui nous a permis de déduire les différentes vitesses que l'on pourra utiliser ultérieurement. Les Courbes Temps-Profondeur & Vitesses (Vave = Vitesse moyenne, VRMS = Vitesse RMS, Vint= vitesse d'intervalle).

Planche 7 : Représente la courbe Temps-Profondeur et les courbes des différentes vitesses calculées.

MD	TVDSD	Tpick	Tv	Vave	Vrms	Vint	TWT
m	m	s	s	m/s	m/s	m/s	s
1720.00	1711.50	0.598800	0.598545	2859	2859	2859	1.197089
1740.00	1731.50	0.604933	0.604681	2863	2864	3259	1.209362
1760.00	1751.50	0.611167	0.610918	2867	2867	3207	1.221836
1780.00	1771.50	0.617600	0.617354	2870	2870	3108	1.234708
1800.00	1791.50	0.623867	0.623624	2873	2873	3190	1.247248
1820.00	1811.50	0.630567	0.630327	2874	2875	2984	1.260654
1840.00	1831.50	0.636900	0.636663	2877	2878	3157	1.273326
1860.00	1851.50	0.642998	0.642764	2881	2882	3278	1.285527
1866.00	1857.50	0.645289	0.645055	2880	2881	2618	1.290111
1880.00	1871.50	0.650880	0.650648	2876	2878	2503	1.301296
1886.00	1877.50	0.652657	0.652426	2878	2879	3375	1.304851
1900.00	1891.50	0.654819	0.654590	2890	2898	6468	1.309181
1906.00	1897.50	0.656251	0.656023	2892	2902	4187	1.312047
1920.00	1911.50	0.661195	0.660969	2892	2901	2831	1.321938
1940.00	1931.50	0.667267	0.667044	2896	2905	3292	1.334087
1960.00	1951.50	0.672967	0.672746	2901	2911	3507	1.345492
1980.00	1971.50	0.677933	0.677715	2909	2920	4025	1.355430
2000.00	1991.50	0.683233	0.683018	2916	2928	3772	1.366036
2020.00	2011.50	0.688633	0.688420	2922	2935	3702	1.376841
2040.00	2031.50	0.693767	0.693557	2929	2943	3894	1.387114
2060.00	2051.50	0.698967	0.698759	2936	2951	3844	1.397519
2080.00	2071.50	0.703900	0.703695	2944	2960	4052	1.407390
2100.00	2091.50	0.709400	0.709197	2949	2966	3635	1.418395
2120.00	2111.50	0.714486	0.714286	2956	2974	3931	1.428572
2143.00	2134.50	0.719965	0.719768	2966	2985	4196	1.439535
2160.00	2151.50	0.723853	0.723658	2973	2994	4370	1.447315
2163.00	2154.50	0.724647	0.724452	2974	2995	3777	1.448904
2180.00	2171.50	0.729635	0.729442	2977	2998	3407	1.458883
2183.00	2174.50	0.730615	0.730422	2977	2998	3060	1.460844
2200.00	2191.50	0.735857	0.735666	2979	3000	3242	1.471331
2220.00	2211.50	0.741714	0.741525	2982	3004	3414	1.483049
2230.00	2221.50	0.744033	0.743845	2987	3009	4310	1.487689
2240.00	2231.50	0.746833	0.746646	2989	3011	3570	1.493291
2250.00	2241.50	0.749600	0.749414	2991	3013	3613	1.498827
2260.00	2251.50	0.752400	0.752215	2993	3016	3570	1.504429
2270.00	2261.50	0.754400	0.754216	2998	3023	4997	1.508431
2280.00	2271.50	0.756479	0.756296	3003	3029	4807	1.512592
2300.00	2291.50	0.761000	0.760819	3012	3039	4422	1.521638
2320.00	2311.50	0.765633	0.765454	3020	3048	4315	1.530908
2340.00	2331.50	0.769800	0.769623	3029	3061	4797	1.539246
2360.00	2351.50	0.773900	0.773725	3039	3073	4876	1.547450
2380.00	2371.50	0.777821	0.777648	3050	3087	5098	1.555296
2382.00	2373.50	0.778236	0.778063	3051	3088	4817	1.556127

2400.00	2391.50	0.781577	0.781406	3061	3101	5385	1.562812
2402.00	2393.50	0.781923	0.781752	3062	3103	5777	1.563505
2420.00	2411.50	0.785121	0.784952	3072	3117	5625	1.569905
2422.00	2413.50	0.785479	0.785310	3073	3119	5583	1.570621
2440.00	2431.50	0.788651	0.788484	3084	3133	5671	1.576969
2460.00	2451.50	0.792267	0.792102	3095	3148	5528	1.584205
2480.00	2471.50	0.795633	0.795470	3107	3165	5938	1.590940
2500.00	2491.50	0.799100	0.798939	3119	3181	5766	1.597878
2520.00	2511.50	0.802500	0.802341	3130	3198	5879	1.604682
2540.00	2531.50	0.805967	0.805810	3142	3213	5766	1.611620
2560.00	2551.50	0.809567	0.809412	3152	3227	5553	1.618823
2580.00	2571.50	0.812933	0.812779	3164	3243	5939	1.625559
2600.00	2591.50	0.816300	0.816148	3175	3259	5937	1.632296
2620.00	2611.50	0.819733	0.819583	3186	3274	5823	1.639166
2640.00	2631.50	0.823167	0.823018	3197	3288	5821	1.646037
2660.00	2651.50	0.826633	0.826486	3208	3303	5768	1.652972
2680.00	2671.50	0.829767	0.829622	3220	3320	6378	1.659243
2700.00	2691.50	0.833033	0.832889	3232	3335	6121	1.665779
2720.00	2711.50	0.837367	0.837225	3239	3343	4613	1.674449
2740.00	2731.50	0.841167	0.841026	3248	3354	5261	1.682052
2760.00	2751.50	0.845045	0.844906	3257	3365	5155	1.689811
2774.00	2765.50	0.847624	0.847485	3263	3373	5426	1.694971
2780.00	2771.50	0.848938	0.848800	3265	3375	4565	1.697600
2794.00	2785.50	0.852252	0.852115	3269	3379	4223	1.704229
2800.00	2791.50	0.853505	0.853368	3271	3381	4787	1.706736
2814.00	2805.50	0.857581	0.857445	3272	3382	3434	1.714890
2820.00	2811.50	0.859284	0.859148	3272	3382	3523	1.718296
2830.00	2821.50	0.861967	0.861832	3274	3383	3726	1.723663
2840.00	2831.50	0.863433	0.863298	3280	3392	6818	1.726597
2850.00	2841.50	0.864967	0.864833	3286	3400	6516	1.729666
2860.00	2851.50	0.867320	0.867187	3288	3402	4249	1.734373
2867.00	2858.50	0.869194	0.869061	3289	3403	3735	1.738122
2870.00	2861.50	0.869935	0.869802	3290	3404	4048	1.739604
2880.00	2871.50	0.872200	0.872068	3293	3407	4414	1.744136
2887.00	2878.50	0.873532	0.873400	3296	3410	5254	1.746800
2900.00	2891.50	0.876052	0.875921	3301	3417	5157	1.751842
2907.00	2898.50	0.877461	0.877330	3304	3420	4967	1.754661
2920.00	2911.50	0.880039	0.879909	3309	3426	5041	1.759819
2940.00	2931.50	0.884000	0.883871	3317	3435	5048	1.767743
2960.00	2951.50	0.887800	0.887673	3325	3445	5262	1.775345
2980.00	2971.50	0.891833	0.891707	3332	3453	4958	1.783414
3000.00	2991.50	0.895600	0.895475	3341	3463	5308	1.790950
3020.00	3011.50	0.899967	0.899843	3347	3469	4579	1.799686
3040.00	3031.50	0.904567	0.904444	3352	3474	4347	1.808888
3060.00	3051.50	0.909867	0.909745	3354	3476	3773	1.819490
3080.00	3071.50	0.914567	0.914446	3359	3480	4254	1.828892
3100.00	3091.50	0.919533	0.919413	3362	3484	4027	1.838826

3120.00	3111.50	0.923933	0.923814	3368	3489	4544	1.847627
3140.00	3131.50	0.928516	0.928398	3373	3494	4363	1.856795
3152.00	3143.50	0.931250	0.931132	3376	3497	4388	1.862264
3160.00	3151.50	0.933050	0.932933	3378	3499	4444	1.865865
3172.00	3163.50	0.935971	0.935854	3380	3501	4107	1.871708
3180.00	3171.50	0.937834	0.937717	3382	3503	4293	1.875435
3192.00	3183.50	0.940668	0.940552	3385	3505	4234	1.881104
3200.00	3191.50	0.942562	0.942446	3386	3507	4223	1.884893
3220.00	3211.50	0.947200	0.947085	3391	3511	4311	1.894170
3240.00	3231.50	0.951800	0.951686	3396	3516	4347	1.903372
3260.00	3251.50	0.956500	0.956387	3400	3520	4255	1.912774
3280.00	3271.50	0.961100	0.960988	3404	3524	4347	1.921976
3300.00	3291.50	0.965733	0.965622	3409	3529	4316	1.931243
3320.00	3311.50	0.970267	0.970156	3413	3533	4410	1.940313
3340.00	3331.50	0.975033	0.974923	3417	3537	4196	1.949846
3360.00	3351.50	0.979733	0.979624	3421	3541	4255	1.959248
3380.00	3371.50	0.984568	0.984460	3425	3544	4136	1.968919
3388.00	3379.50	0.986687	0.986579	3425	3544	3775	1.973158
3400.00	3391.50	0.990018	0.989910	3426	3544	3602	1.979821
3408.00	3399.50	0.992413	0.992306	3426	3544	3340	1.984611
3420.00	3411.50	0.995942	0.995835	3426	3543	3400	1.991670
3428.00	3419.50	0.998658	0.998551	3424	3542	2945	1.997103
3440.00	3431.50	1.002529	1.002423	3423	3540	3100	2.004845
3460.00	3451.50	1.009167	1.009061	3421	3537	3013	2.018122
3480.00	3471.50	1.015933	1.015828	3417	3534	2956	2.031655
3500.00	3491.50	1.023400	1.023295	3412	3528	2678	2.046590
3520.00	3511.50	1.030800	1.030696	3407	3523	2703	2.061391
3540.00	3531.50	1.038419	1.038315	3401	3517	2625	2.076630
3554.00	3545.50	1.043061	1.042957	3399	3515	3016	2.085915
3560.00	3551.50	1.045168	1.045064	3398	3514	2847	2.090129
3574.00	3565.50	1.049608	1.049505	3397	3512	3153	2.099010
3580.00	3571.50	1.051332	1.051229	3397	3512	3480	2.102458
3594.00	3585.50	1.054592	1.054489	3400	3515	4294	2.108979
3600.00	3591.50	1.056102	1.056000	3401	3516	3973	2.111999
3620.00	3611.50	1.061400	1.061298	3403	3517	3775	2.122597
3640.00	3631.50	1.066800	1.066699	3404	3518	3703	2.133398
3660.00	3651.50	1.071867	1.071767	3407	3520	3947	2.143533
3680.00	3671.50	1.077100	1.077000	3409	3522	3821	2.154000
3700.00	3691.50	1.082348	1.082249	3411	3523	3811	2.164497
3724.00	3715.50	1.088082	1.087983	3415	3527	4185	2.175967
3740.00	3731.50	1.092006	1.091908	3417	3529	4077	2.183816
3744.00	3735.50	1.093044	1.092946	3418	3529	3853	2.185892
3760.00	3751.50	1.097421	1.097324	3419	3530	3655	2.194647
3761.00	3752.50	1.097687	1.097590	3419	3530	3759	2.195179
3764.00	3755.50	1.098485	1.098388	3419	3530	3759	2.196775
3780.00	3771.50	1.102040	1.101943	3423	3534	4500	2.203886
3781.00	3772.50	1.102248	1.102151	3423	3534	4807	2.204302

3800.00	3791.50	1.106456	1.106360	3427	3538	4515	2.212720
3801.00	3792.50	1.106694	1.106598	3427	3538	4201	2.213196
3820.00	3811.50	1.111485	1.111389	3429	3540	3965	2.222779
3840.00	3831.50	1.116267	1.116172	3433	3543	4182	2.232344
3860.00	3851.50	1.121304	1.121210	3435	3545	3970	2.242419
3873.00	3864.50	1.123999	1.123905	3438	3549	4823	2.247810
3880.00	3871.50	1.125274	1.125180	3441	3552	5489	2.250360
3893.00	3884.50	1.128135	1.128042	3444	3555	4543	2.256083
3900.00	3891.50	1.129882	1.129789	3444	3555	4006	2.259577
3913.00	3904.50	1.133466	1.133373	3445	3556	3627	2.266746
3920.00	3911.50	1.135007	1.134914	3447	3557	4542	2.269829
3940.00	3931.50	1.139433	1.139341	3451	3561	4518	2.278682
3960.00	3951.50	1.143967	1.143875	3454	3565	4411	2.287751
3980.00	3971.50	1.148717	1.148626	3458	3568	4210	2.297252
3982.00	3973.50	1.149150	1.149059	3458	3569	4618	2.298118
4000.00	3991.50	1.153393	1.153303	3461	3571	4242	2.306605
4002.00	3993.50	1.153907	1.153817	3461	3571	3891	2.307633
4020.00	4011.50	1.159026	1.158936	3461	3571	3516	2.317872
4021.00	4012.50	1.159230	1.159140	3462	3571	4901	2.318280
4022.00	4013.50	1.159512	1.159422	3462	3571	3546	2.318844
4025.00	4016.50	1.160357	1.160267	3462	3571	3550	2.320534
4026.00	4017.50	1.160677	1.160587	3462	3571	3125	2.321174
4040.00	4031.50	1.164001	1.163911	3464	3573	4211	2.327823
4041.00	4032.50	1.164231	1.164142	3464	3573	4347	2.328283
4045.00	4036.50	1.165140	1.165051	3465	3574	4400	2.330101
4046.00	4037.50	1.165373	1.165284	3465	3574	4291	2.330567
4054.00	4045.50	1.167023	1.166934	3467	3576	4848	2.333868
4060.00	4051.50	1.168452	1.168363	3468	3577	4198	2.336726
4061.00	4052.50	1.168653	1.168564	3468	3578	4974	2.337128
4065.00	4056.50	1.169470	1.169381	3469	3579	4895	2.338762
4066.00	4057.50	1.169678	1.169589	3469	3579	4807	2.339178
4074.00	4065.50	1.171288	1.171199	3471	3581	4968	2.342399
4080.00	4071.50	1.172342	1.172254	3473	3584	5692	2.344507
4094.00	4085.50	1.174858	1.174770	3478	3589	5563	2.349540
4100.00	4091.50	1.176051	1.175963	3479	3591	5029	2.351926
4120.00	4111.50	1.180467	1.180380	3483	3595	4528	2.360759
4140.00	4131.50	1.184767	1.184680	3487	3599	4651	2.369360
4160.00	4151.50	1.188928	1.188842	3492	3604	4806	2.377684
4173.00	4164.50	1.191360	1.191274	3496	3609	5345	2.382548
4180.00	4171.50	1.192604	1.192518	3498	3611	5626	2.385037
4193.00	4184.50	1.194691	1.194606	3503	3617	6228	2.389211
4200.00	4191.50	1.196181	1.196096	3504	3619	4697	2.392192
4213.00	4204.50	1.199724	1.199639	3505	3619	3669	2.399278
4220.00	4211.50	1.202000	1.201915	3504	3618	3075	2.403831

Tableau III.1 : représente les valeurs temps-profondeur, Les vitesses moyennes, RMS, vitesses d'intervalles des ondes P.

F. Récupération des amplitudes réelles (TAR) :

L'opération **TAR** est appliqué pour récupérer les amplitudes réelles avec la compensation des pertes d'énergie due à la divergence sphérique ($1/\text{dist}$). Après une série de tests on a choisi le paramètre ($\text{db/s} = 2$)

Planches (8.1 – 8.2) : représentent le test des paramètres de TAR.

Planches 8.3 : représente Récupération des amplitudes réelles $\text{TAR} = 2 \text{ db/s}$.

G. Séparation des champ d'ondes :

Pour la séparation des ondes montantes et descendantes nous avons appliqué le filtre médian et le filtre K-L.

Pour appliquer ces deux filtres, il faut d'abord passer de l'alignement des ondes descendantes.

G.1 Horizontalisation des ondes descendantes :

Pour faire la séparation on a horizontalisé les ondes descendantes avec une correction statique négative (soustraction) déduite du pointé des premières arrivées. On a fait ensuite une correction statique de +100 ms à toutes les traces de façon à centrer les premières arrivées sur 100 ms.

Nous avons obtenus un champ d'ondes total après alignement.

Planche 9 : Montre le champ d'ondes total après horizontalisation.

G.2 Application du Filtre Médian :

Nous avons appliqué le filtre médian pour séparer le champ des ondes descendantes et celui des ondes montantes par la soustraction des ondes descendantes du champ d'ondes total aligné.

Après une série de test des paramètres du filtre médian, nous avons choisi le paramètre ($\text{NT Filt} = 15 \text{ trc}$) où nous avons obtenu le champ d'onde montant. Ce paramètre offre une meilleure continuité des évènements et une bonne séparation des ondes.

L'application de ce filtre est suivi d'un filtre passe bande [8-12-70-80] pour pallier les effets de discontinuité qui peuvent être créés par ce dernier.

Planche (10.1 – 10.2) : représente le test des paramètres du filtre médian.

Planche 10.3 : représente le résultat de la soustraction des ondes descendante filtre Médian=15 trc.

G.3 Application de transformation K-L :

De la même manière que le filtre median, la transformation K-L est appliquée, soit pour avoir le champ d'onde montant en retranchant le champ d'onde descendant du champ d'onde total horizontaliser, soit en gardant le résultat du filtre qui est le champ d'onde descendant.

Test de plusieurs paramètres a été réalisé pour l'obtention du champ d'onde montant, on a opté une longueur de fenêtre égale à 19 traces, Ce paramètre offre une bonne continuité des évènements et séparation des ondes.

Planche (11.1 – 11.2) : représente le test des paramètres de la transformation K-L.

Planche 11.3: représente le résultat de la soustraction des ondes descendante transformation KL=19 trc.

N.B : La comparaison des évènements montants obtenue par le filtre médian et la transformation K-L montre que la meilleure séparation est celle du filtre médian.

Planche 12.1 : Comparaison des montantes entre les filtres Médian et KL.

Planche 12.2 : Choix de filtre après comparaison (Filtre Médian).

H. Déconvolution :

L'objectif principal de la déconvolution est de compacter le signal émis et de réduire l'impact des réflexions multiples.

- ✚ Pour ce faire, l'opérateur de déconvolution est d'abord calculé à partir des ondes descendantes, puis appliqué aux ondes montantes horizontalisées (TWT : Temps Double).
- ✚ Avant d'appliquer l'opérateur, une fenêtre de 500 ms centrée autour de l'onde directe est définie sur les ondes descendantes horizontalisées. À l'aide de cette fenêtre, le filtre inverse est estimé pour chaque niveau d'enregistrement à partir des ondes descendantes alignées.

- ✚ Une fois l'opérateur de déconvolution obtenu, il est appliqué aux ondes montantes. Cela permet d'obtenir des ondelettes de phase nulle, centrées au niveau des différents réflecteurs.

Planche 13 : représente le champ d'onde montante horizontalisé en temps double (TWT).

Planche 14 : représente les ondes montantes horizontalisées avant et après déconvolution.

I. Corridor stack :

Les ondes montantes déconvoluées et alignées sont sommées dans un couloir. Une fenêtre de sommation est choisie restreinte (100 ms) afin de ne garder que les réflexions primaires qui s'interceptent avec les arrivées directes. Un mute est appliqué en dehors de cette fenêtre.

Planche 15.1 : représente la fenêtre du corridor.

Après la sommation de cette fenêtre on obtient une trace sommée qui sera dupliquée 10 fois.

Planche 15.2 : représente corridor stack.

J. Calage du corridor stack avec la section sismique :

L'objectif principal de la techniques VSP zéro offset est d'avoir le corridor stack et le caler avec la section sismique de surface pour confirmer les objectifs repérés par l'interprétation sur la section représentée en temps double.

Pour réaliser un bon calage il faut bien s'assurer que les échelles sont les mêmes (corridor stack, section sismique).

Dans notre calage on a appliqué un shift de +70 ms sur la section sismique pour avoir une meilleur cohérence.

Planche 16 : montre le résultat du calage du corridor stack du PSV zéro offset avec la section sismique en inline.

Planche 17 : représente le résultat du calage de la société ENAGEO.

K. Comparaison entre les deux résultats :

Dans le cadre de notre stage de fin d'études, nous avons réalisé un calage du corridor stack VSP zéro offset sur la section sismique en temps double à l'aide du logiciel Promax. en

appliquant un shift de +70 ms pour assurer une bonne correspondance entre les événements. Un calage similaire a été fourni par ENAGEO, réalisé via le logiciel Vsprowess avec un shift de +71 ms.

La comparaison entre les deux résultats montre une cohérence globale satisfaisante, les deux approches permettant un alignement correct du corridor avec les réflecteurs principaux interprétés Sur la section sismique.

Toutefois, bien que les shifts appliqués soient identiques, l'approche suivie sous Promax nous a permis de mieux comprendre et maîtriser les étapes du calage sismique.

III.6. Conclusion:

Les procédures de traitement d'un PSV Zéro Offset nécessitent une série de tests sur les modules appliqués aux données, afin d'obtenir des résultats optimaux comparables à ceux de la section issue de la sismique de surface.

La séparation des champs d'ondes est l'étape principale dans le traitement du PSV, dans notre travail le filtre médian avec une fenêtre de 15 traces a donné le meilleur résultat, également la transformation Karhunen-Loeve (KL) est un très bon operateur de séparation des champs d'ondes mais il exige un pas d'échantillonnage en distance constant ce qui consèquent perte d'information lors de la réduction de dimension.

Plusieurs horizons sont clairement identifiés dont Trias série inferieure (objectif principal) et la dalle de m'kratta, grès d'Ouargla et le Trias T1 (objectif secondaire).

Même si les résultats obtenus par notre traitement approchent et paraient satisfaisants mais il est bien clair que les résultats présentés par le prestataire sont meilleurs et cela peut être à cause d'absence des profondeurs exactes des niveaux enregistrés ainsi que les correction statiques appliquées dans notre traitement diffèrent à celles appliqué sur section sismique.

Conclusion Générales

Conclusion Générale :

La sismique de puits est aujourd'hui devenue une étape presque systématique dans l'exploration et le développement pétrolier. Parmi ses variantes, le PSV zéro offset occupe une place essentielle grâce à sa capacité à fournir des mesures précises et fiables, en complément des données de sismique de surface.

Le PSV zéro offset consiste à placer la source sismique verticalement au-dessus du puits, ce qui permet d'obtenir un chemin de propagation vertical. Ce positionnement géométrique offre une mesure directe et plus précise des vitesses sismiques des ondes P et S le long du puits. Ces vitesses sont fondamentales pour le calibrage des modèles de vitesse, l'amélioration des traitements sismiques et l'interprétation géologique.

L'une des applications principales du PSV zéro offset est d'établir un lien fiable entre les données sismiques de surface et les mesures de puits (logs), en améliorant la correspondance temps-profondeur et en facilitant l'identification des réflecteurs clés. Il sert également de base au traitement des enregistrements obtenus par PSV déporté, en fournissant un cadre de référence en vitesse et en profondeur.

Cependant, pour garantir des résultats de haute qualité, la réussite de l'acquisition du PSV zéro offset dépend fortement de plusieurs facteurs :

1. Le positionnement précis de la source, idéalement contrôlé par levé GPS, afin d'éviter tout écart latéral qui compromettrait la verticalité du trajet d'onde.
2. L'assistance sur site par un superviseur expérimenté, disposant des résultats de logs pour s'assurer de la qualité du couplage et éviter les zones de cavités ou de cimentation défailante.
3. La vérification rigoureuse des données et rapports fournis par le prestataire, afin de s'assurer de leur fiabilité avant d'entamer le traitement.

En conclusion, le PSV zéro offset, bien que simple dans sa géométrie, est un outil puissant pour la caractérisation des réservoirs, à condition que son acquisition soit réalisée avec rigueur. Lorsqu'il est correctement exécuté, il permet d'obtenir des résultats sismiques de haute résolution, facilitant ainsi une interprétation plus précise des formations traversées par le puits.

Références

Références :

- [1] **Ahmed, N.** (1984). Porosity prediction from VSP data. *Journal of Petroleum Technology*.
- [2] **Andersen, P., & Kak, A. C.** (1984). Eigenvalues and Eigenvectors in Seismic Signal Processing. *IEEE Transactions on Signal Processing*.
- [3] **Dillon, P. B., & Thomson, D. J.** (1984). Offset VSP Processing Techniques. *Geophysics*, 49(8), 1239–1251.
- [4] **Domenico, S. N.** (1984). Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity. *Geophysics*.
- [5] **Hardage, B. A.** (2000). *Vertical Seismic Profiling: Principles*. Pergamon Press.
- [6] **Hinds, R. C., Anderson, N. L., & Kuzmiski, R. D.** (1996). *VSP Interpretive Processing: Theory and Practice*. Society of Exploration Geophysicists.
- [7] **Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I.** (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
- [8] **Pickett, G. R.** (1963). Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum Technology*.
- [9] **Sheriff, R. E., & Geldart, L. P.** (1995). *Exploration Seismology*. Cambridge University Press.
- [10] **Sinha, B. K. & Gaiser, J. E.** (2012). *Geomechanical Applications of VSP, SEG Abstracts*.
- [11] **Stewart, R. R., Kaufman, P. B., & others.** (1984). Seismic studies in the Antrim Shale. *Geophysics*.
- [12] **Tanenbaum, A. S.** (2021). *Réseaux*. Pearson.
- [13] **Tatham, R. H., & McCormack, M. D.** (1991). *Multicomponent Seismology in Petroleum Exploration*. SEG.
- [14] **Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E.** (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- [15] **Toksöz, M. N., & Johnston, D. H.** (1981). *Seismic Wave Attenuation*. SEG.
- [16] **Wyatt, K. D., & Wyatt, S. B.** (1981). *VSP Mapping: Principles and Applications*. SEG.
- [17] **Yilmaz, Ö.** (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists.

Annexes

Listes des planches :

Planche 1 : L'enregistrement brut du PSV Zéro Offset.

Planche 2 : L'enregistrement brut du PSV Précédent coupé à 182 CDP (without Free pipe).

Planche 3.1 : Les composantes Vz, Hx etHy du PSV Zéro Offset.

Planche 3.2 : Auto corrélation de sweep de référence.

Planche 4 : Composante Vz utilisé.

Planche 5 : Header de la trace 56 de la composante Z avant et après habillage.

Planche 6 : Pointés des premières arrivées.

Planche 7 : Courbe Temps-Profondeur et les courbes des différentes vitesses calculées.

Planche (8.1-8.2) : Test des paramètres de TAR.

Planche 8.3 : Récupération des amplitudes réelles TAR =2 db/s.

Planche 9 : Champ d'onde total après horizontalisation.

Planche (10.1-10.2) : Test des paramètres de Filtre Médian.

Planche 10.3 : Résultat de la soustraction des ondes descendante Filtre Médian=15 trc.

Planche (11.1-11.2) : Test des paramètres du Transformation KL.

Planche 11.3 : résultat de la soustraction des ondes descendante Transformation KL=19 trc

Planche 12.1 : Comparaison des ondes montantes entre les filtres Médian et KL.

Planche 13 : le champ d'onde montante horizontalisé en temps double (TWT).

Planche 14 : les ondes montantes horizontalisées avant et après déconvolution.

Planche 15.1 : La fenêtre du corridor.

Planche 15.2 : Corridor Stack.

Planche 16 : le résultat du calage du corridor stack du PSV zéro offset avec le section sismique en Inline.

Planche 17 : le résultat du calage de la société ENAGEO.

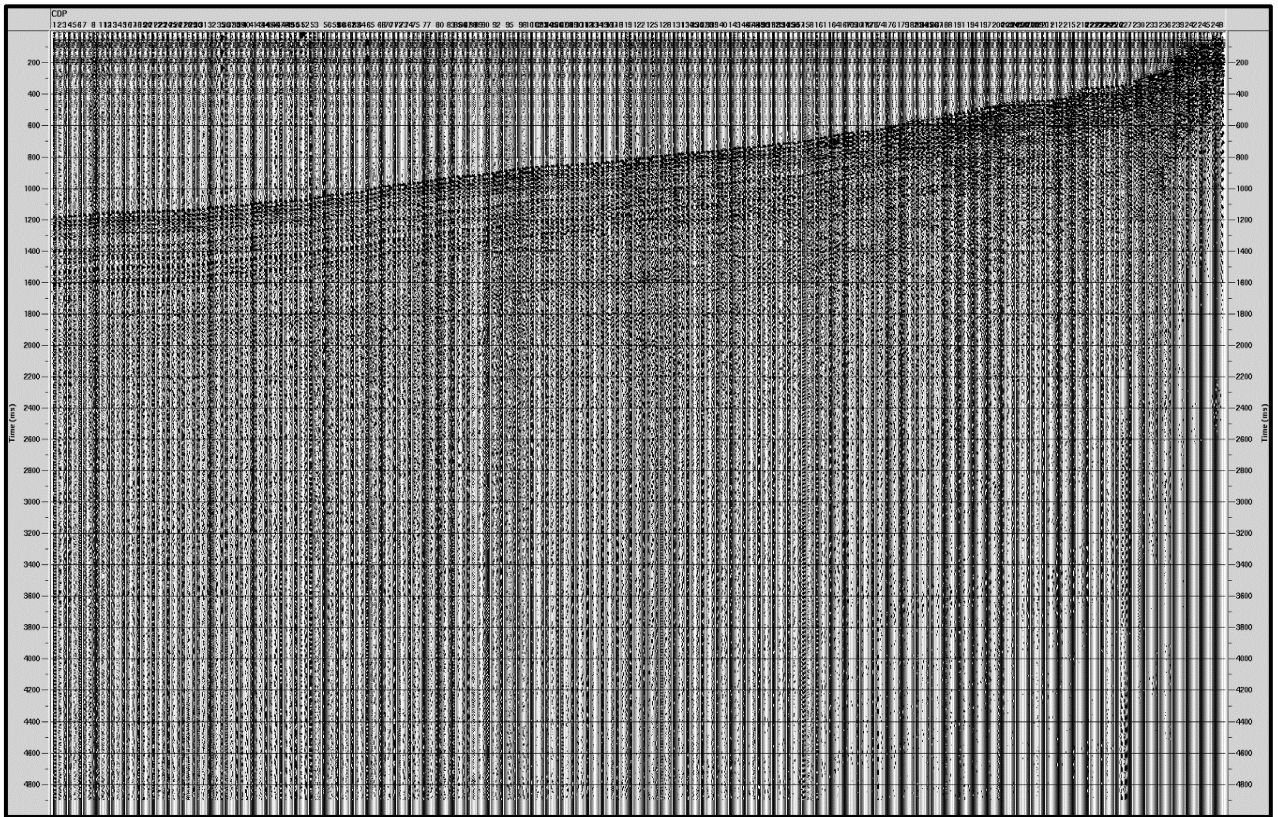


Planche 1 : L'enregistrement brut du PSV Zéro Offset.

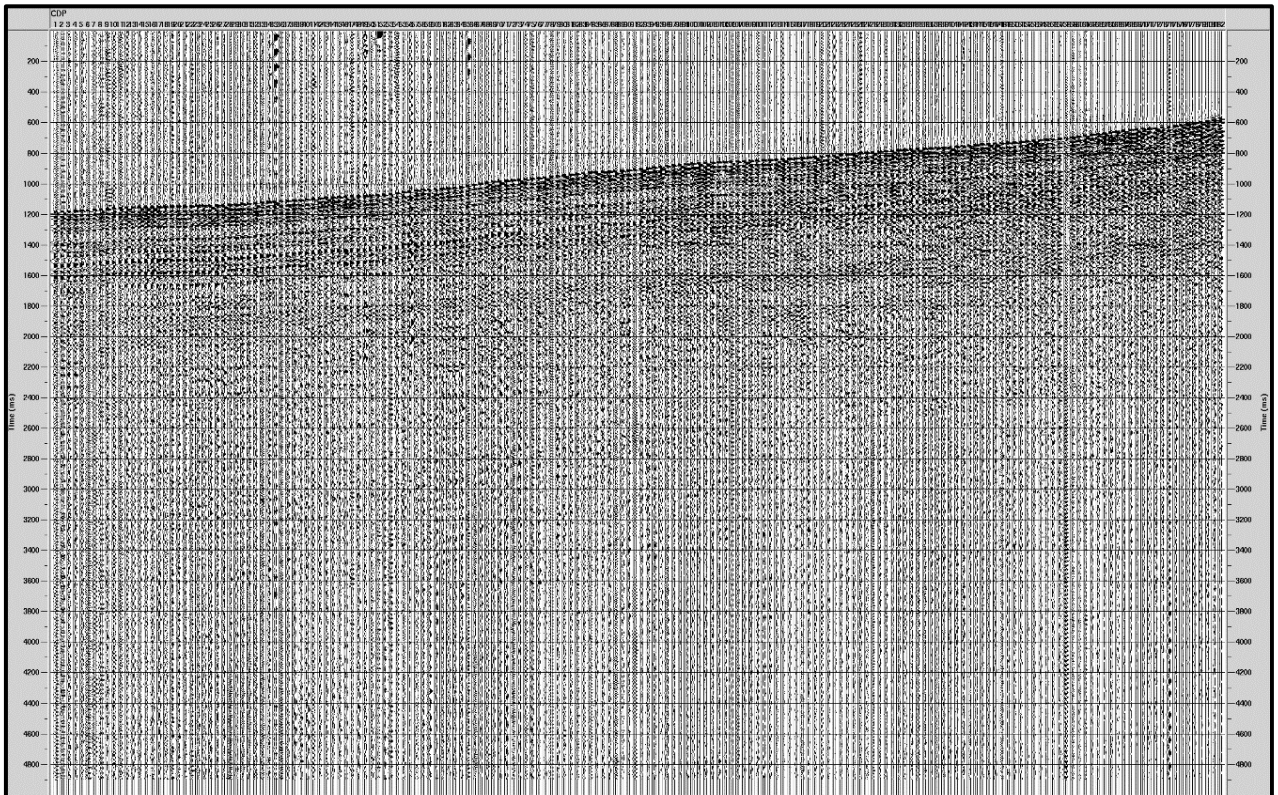


Planche 2 : L'enregistrement brut du PSV Précédent coupé à 182 CDP (without Free pipe).

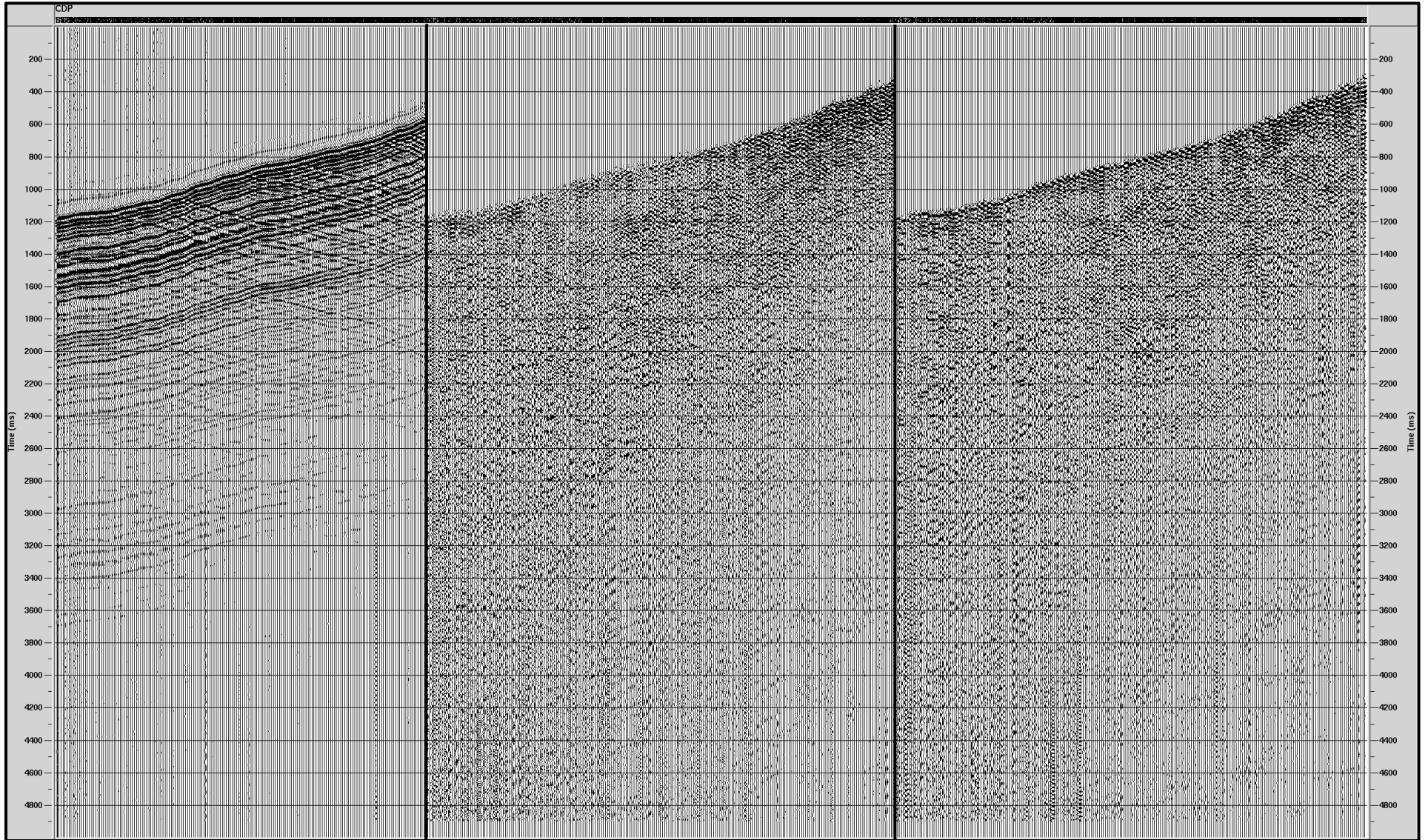


Planche 3.1 : Les composantes V_z , H_x et H_y du PSV Zéro Offset.

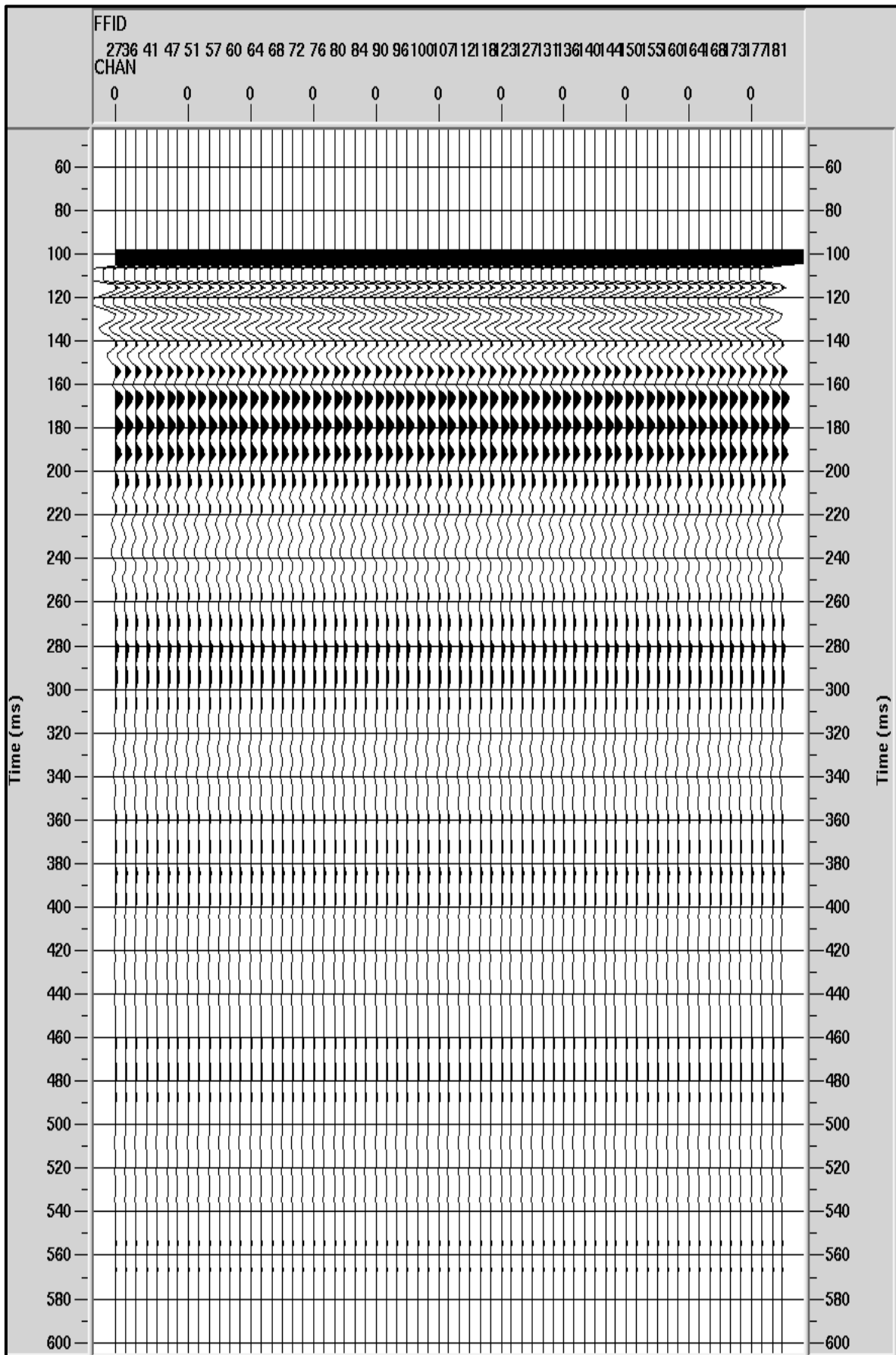


Planche 3.2 : Auto corrélation de sweep de référence.

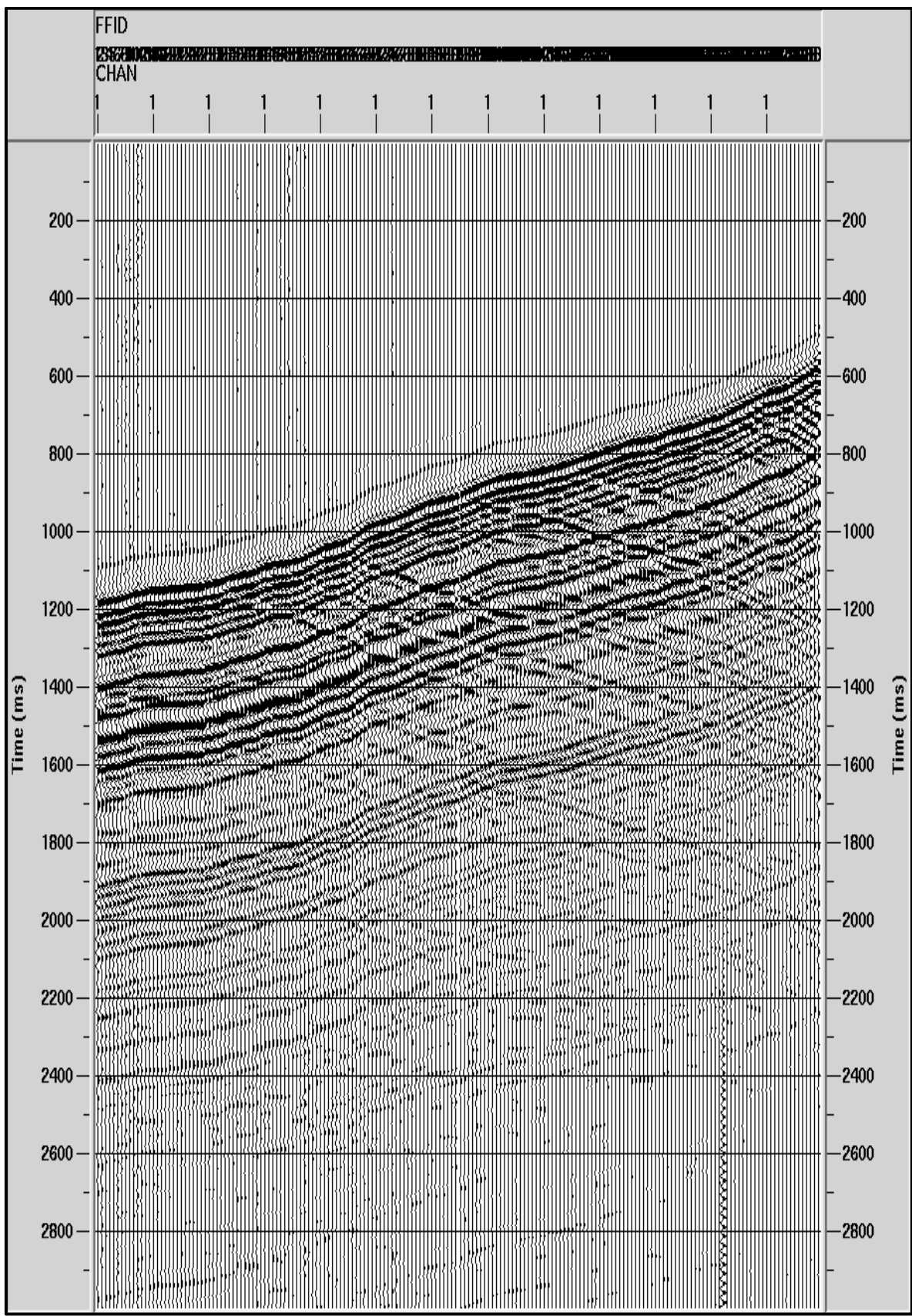


Planche 4 : Composante Vz utilisé.

Trace Header	
FFID	= 56 (Field file ID number)
CHAN	= 11 (Recording channel number)
AMP_NORM	= 1.0 (Amplitude normalization factor)
AOFFSET	= 0.0 (Absolute value of offset)
CDP	= 56 (CDP bin number)
CDP_SLOC	= 0 (External CDP location number)
CDP_X	= 3640.0 (X coordinate of CDP)
CDP_XD	= 3640.0 (X coordinate of CDP (double))
CDP_Y	= 132.2 (Y coordinate of CDP)
CDP_YD	= 132.2 (Y coordinate of CDP (double))
DEPTH	= 0.0 (Source depth)
END_ENS	= 0 (End-of-ensemble flag*)
EOJ	= 0 (End of job flag*)
FILE_NO	= 1 (Sequential File Number)
GEO_COMP	= 1 (Geophone component (x,y,z))
IF_END	= 0 (Flow tool end-of-ensemble flag)
IF_FLAG	= 0 (IF flag for flow control)
ILINE_NO	= 1215 (3D inline number)
LEN_SURG	= 0.0 (Length of surgical mute taper)
LINE_NO	= 1182 (Line number (hashed line name)*)
LSEG_END	= 0 (Line segment end*)
LSEG_SEQ	= 1 (Line segment sequence number*)
NA_STAT	= 0.0 (Portion of static not applied*)
OFFSET	= 0.0 (Signed source-receiver offset)
REC_ELEV	= 0.0 (Receiver elevation)
REC_H200	= 0.0 (Water depth at receiver)
REC_STAT	= 0.0 (Total static for receiver)
REC_X	= 0.0 (Receiver X coordinate)
REC_XD	= 0.0 (Receiver X coordinate (double))
REC_Y	= 0.0 (Receiver Y coordinate)
REC_YD	= 0.0 (Receiver Y coordinate (double))
SEQNO	= 1 (Sequence number in ensemble)
SIN	= null (Source index number (internal)*)
SKEWSTAT	= 0.0 (Multiplex skew static)
SOURCE	= 1 (Live source number (usr-defined)))
SOU_ELEV	= 0.0 (Source elevation)
SOU_H200	= 0.0 (Water depth at source)
SOU_STAT	= 0.0 (Total static for source)
SOU_X	= 21.9 (Source X coordinate)
SOU_XD	= 21.9 (Source X coordinate (double))
SOU_Y	= -44.9 (Source Y coordinate)
SOU_YD	= -44.9000000000001 (Source Y coordinate (double)))
TAPE_TO	= 0.0 (Original first sample time (ns))
TFULL_E	= 5000.0 (End time of full samples)
TFULL_S	= 0.0 (Start time of full samples)
TLIVE_E	= 5000.0 (End time of live samples)
TLIVE_S	= 0.0 (Start time of live samples)
TOT_STAT	= 0.0 (Total static for this trace*)
TRACENO	= 56 (Trace number in seismic line*)
TRC_TYPE	= 1 (Trace type (data, aux, etc.))
TR_FOLD	= 0.0 (Actual trace fold)
UPHOLE	= 0.0 (Source uphole time)
XLINENO	= 0 (3D crossline number)

Trace Header	
FFID	= 56 (Field file ID number)
CHAN	= 1 (Recording channel number)
AMP_NORM	= 1.0 (Amplitude normalization factor)
AOFFSET	= 50.0 (Absolute value of offset)
CDP	= 3641 (CDP bin number)
CDP_NFLD	= 1 (Number of traces in CDP bin)
CDP_SLOC	= null (External CDP location number)
CDP_X	= 0.0 (X coordinate of CDP)
CDP_XD	= 0.0 (X coordinate of CDP (double))
CDP_Y	= 0.0 (Y coordinate of CDP)
CDP_YD	= 0.0 (Y coordinate of CDP (double))
DOICYCLE	= 0 (DOI Interrupt cycle counter)
DEPTH	= 0.0 (Source depth)
DISKITER	= 1 (Disk Data Input iteration*)
DS_SEQNO	= 1 (Input dataset sequence number*)
END_ENS	= 1 (End-of-ensemble flag*)
EOJ	= 0 (End of job flag*)
FILE_NO	= 1 (Sequential File Number)
GEO_COMP	= 1 (Geophone component (x,y,z))
IF_END	= 0 (Flow tool end-of-ensemble flag)
IF_FLAG	= 0 (IF flag for flow control)
ILINE_NO	= 0 (3D inline number)
LEN_SURG	= 0.0 (Length of surgical mute taper)
LINE_NO	= 1435551 (Line number (hashed line name)*)
LSEG_END	= 0 (Line segment end*)
LSEG_SEQ	= 1 (Line segment sequence number*)
NA_STAT	= 0.0 (Portion of static not applied*)
NCHANS	= 1 (Number of channels of source)
OFB_CNTR	= 100.0 (Offset bin center)
OFB_NO	= 1 (Offset bin number)
OFFSET	= 50.0 (Signed source-receiver offset)
REC_ELEV	= -3640.0 (Receiver elevation)
REC_H200	= 0.0 (Water depth at receiver)
REC_NFLD	= 1 (Receiver fold)
REC_SLOC	= 3641 (Receiver index number)
REC_STAT	= 0.0 (Total static for receiver)
REC_X	= 0.0 (Receiver X coordinate)
REC_XD	= 0.0 (Receiver X coordinate (double))
REC_Y	= 0.0 (Receiver Y coordinate)
REC_YD	= 0.0 (Receiver Y coordinate (double))
SEQNO	= 1 (Sequence number in ensemble)
SEQ_DISK	= 56 (Trace sequence number from disk)
SIN	= 56 (Source index number (internal)*)
SKEWSTAT	= 0.0 (Multiplex skew static)
SOURCE	= 56 (Live source number (usr-defined)))
SOU_ELEV	= 0.0 (Source elevation)
SOU_H200	= 0.0 (Water depth at source)
SOU_SLOC	= 1 (External source location number)
SOU_STAT	= 0.0 (Total static for source)
SOU_X	= 50.0 (Source X coordinate)
SOU_XD	= 50.0 (Source X coordinate (double))
SOU_Y	= 0.0 (Source Y coordinate)
SOU_YD	= 0.0 (Source Y coordinate (double))
SRF_SLOC	= 3641 (External receiver location no.)
TAPE_TO	= 0.0 (Original first sample time (ns))
TFULL_E	= 5000.0 (End time of full samples)
TFULL_S	= 0.0 (Start time of full samples)
TLIVE_E	= 5000.0 (End time of live samples)
TLIVE_S	= 0.0 (Start time of live samples)
TOT_STAT	= 0.0 (Total static for this trace*)
TRACENO	= 56 (Trace number in seismic line*)
TRC_TYPE	= 1 (Trace type (data, aux, etc.))
TR_FOLD	= 0.0 (Actual trace fold)
UPHOLE	= 0.0 (Source uphole time)
XLINENO	= 0 (3D crossline number)

Planche 5 : Header de la trace 56 de la composante Z avant et après habillage.

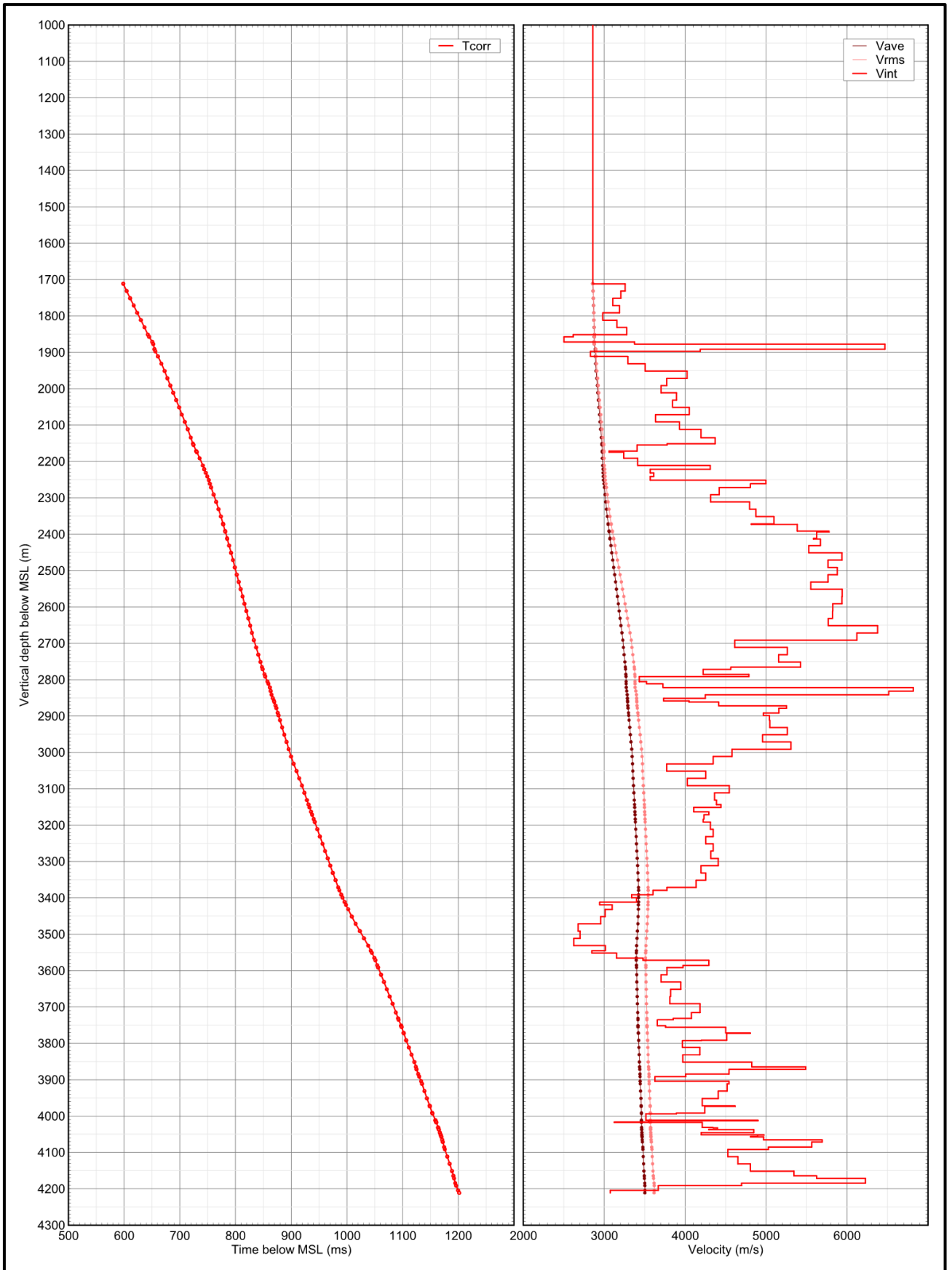


Planche 7 : Courbe Temps-Profondeur et les courbes des différentes vitesses calculées.

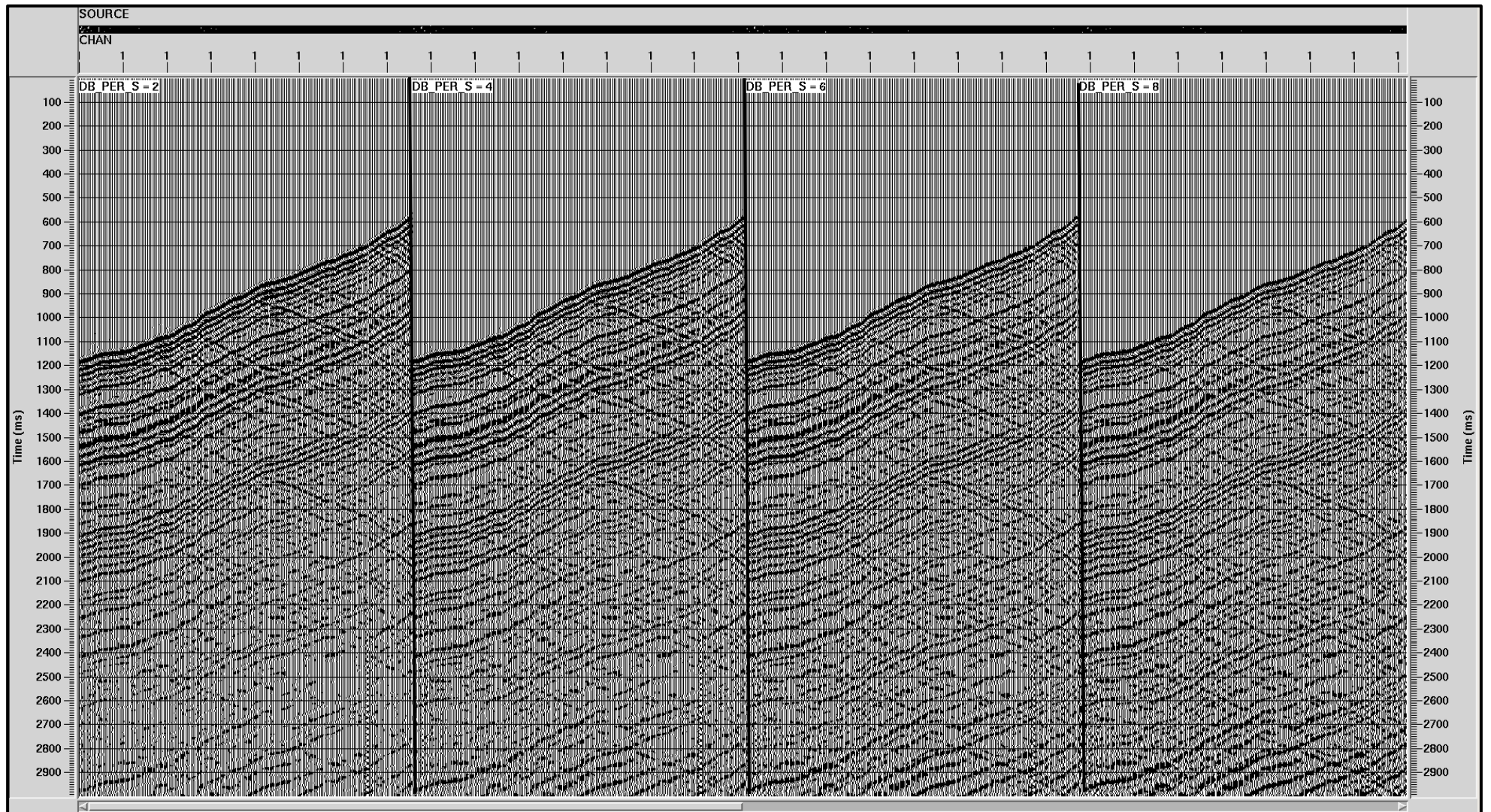


Planche 8.1 : Test des paramètres de TAR.

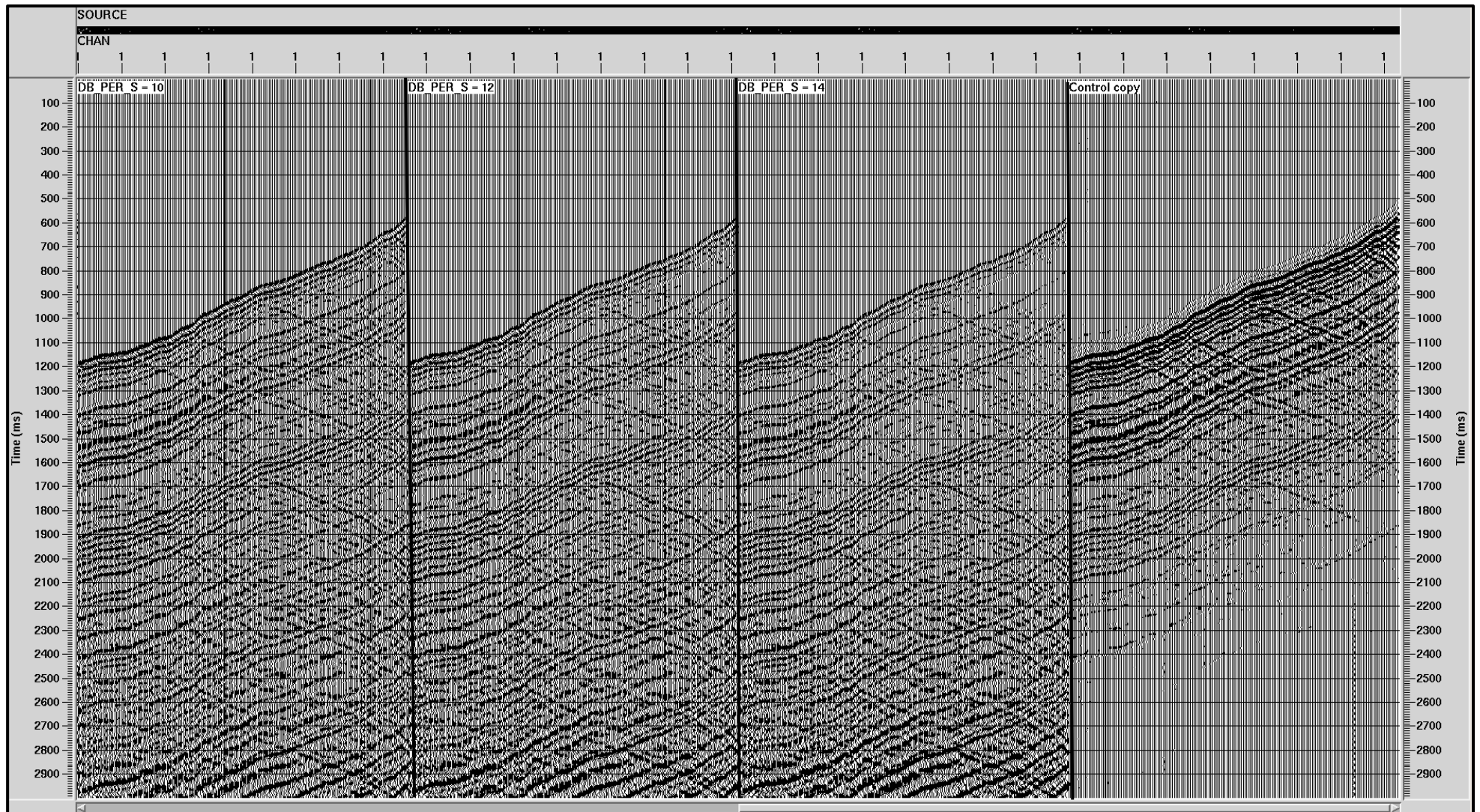


Planche 8.2 : Test des paramètres de TAR.

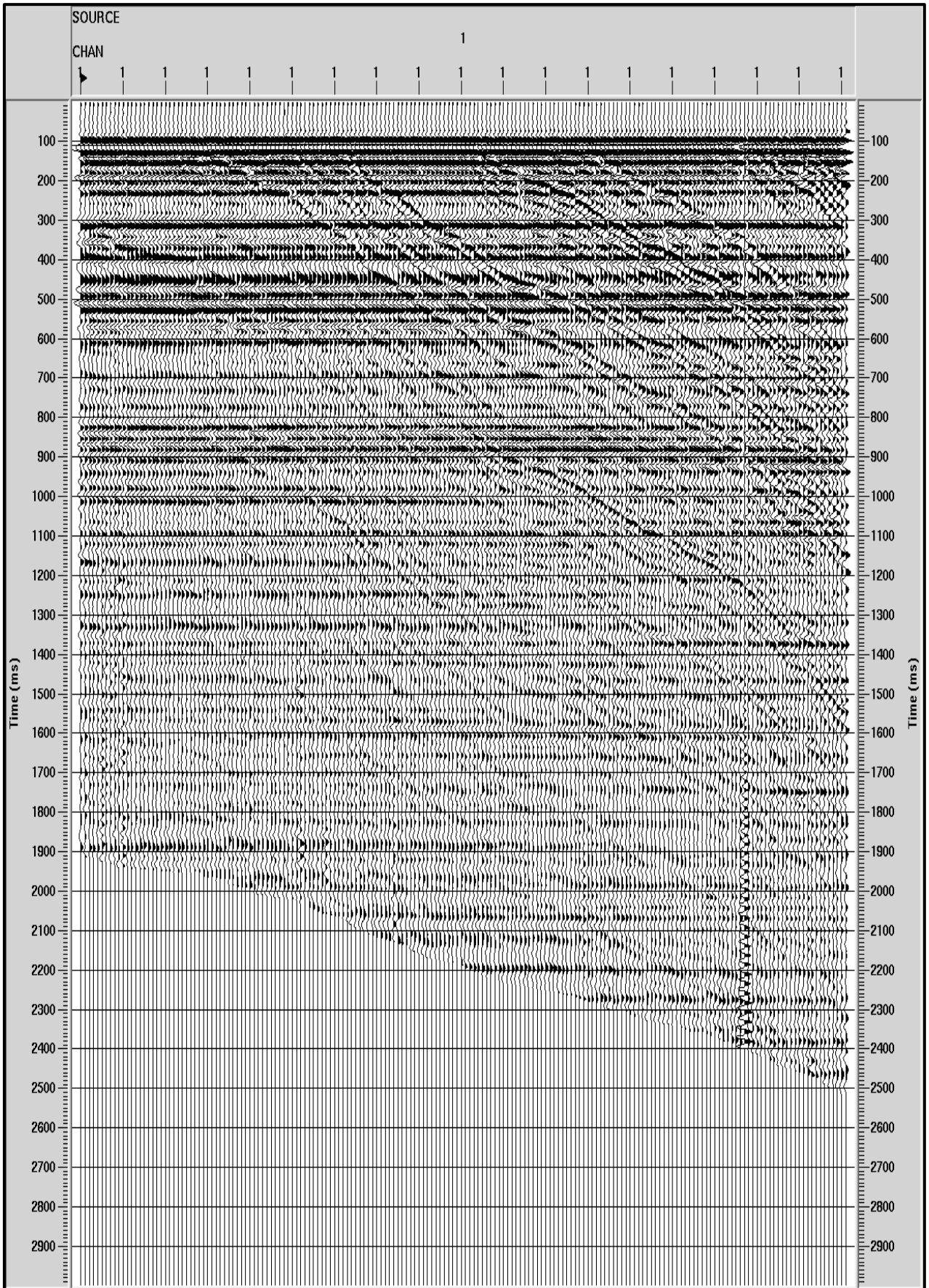


Planche 9 : Champ d'onde total après horizontalisation.

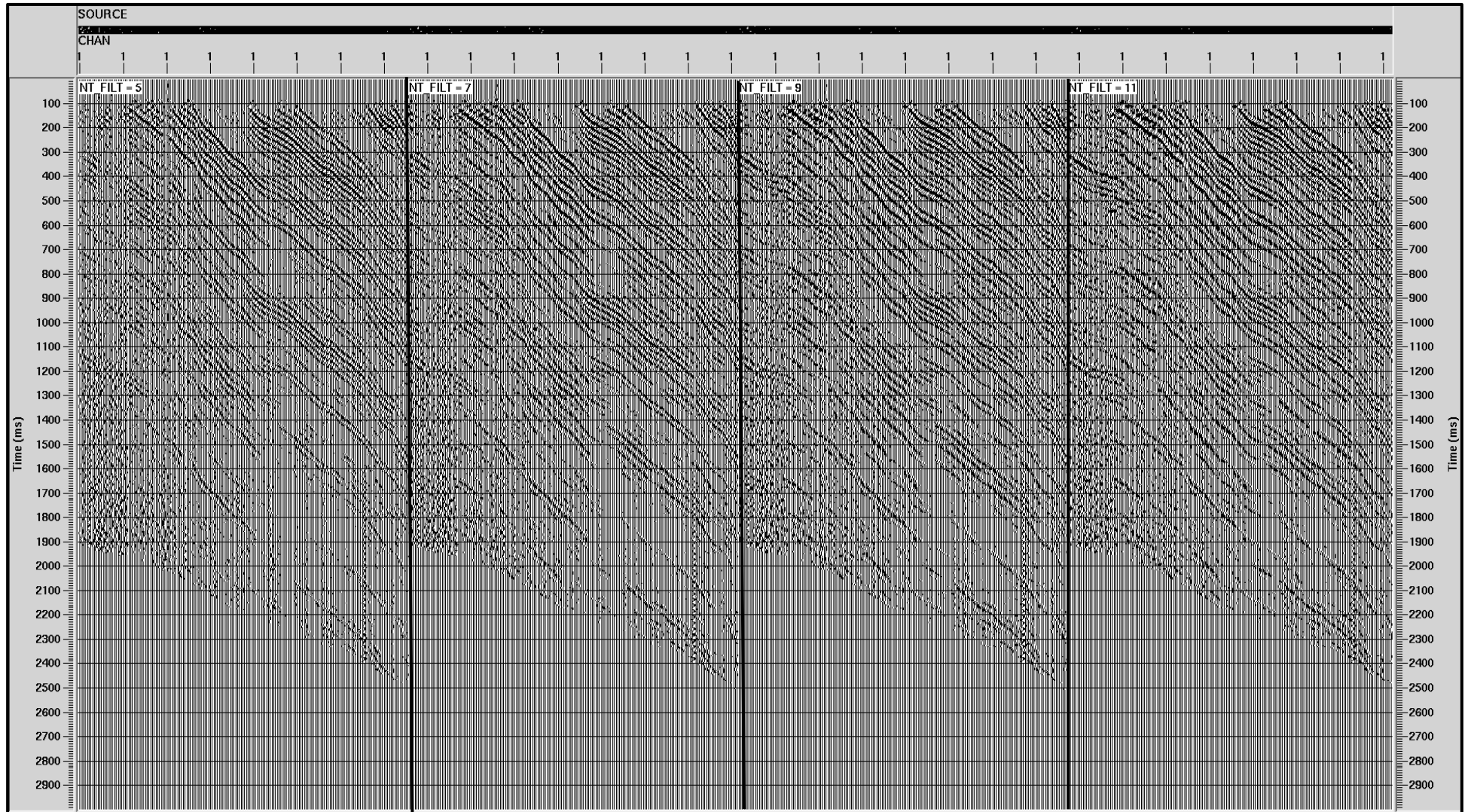


Planche 10.1 : Test des paramètres de Filtre Médian.

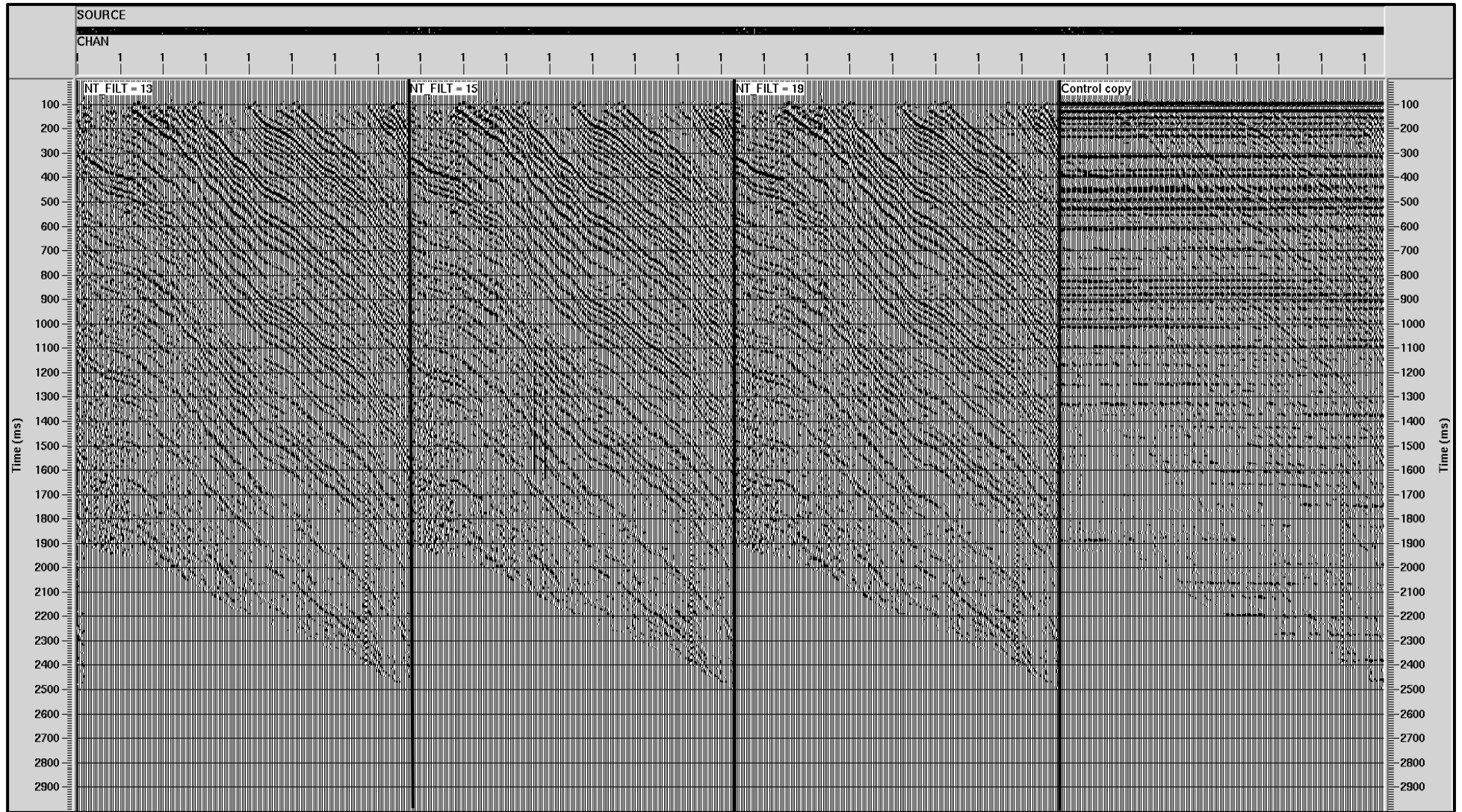


Planche 10.2 : Test des paramètres de Filtre Médian.

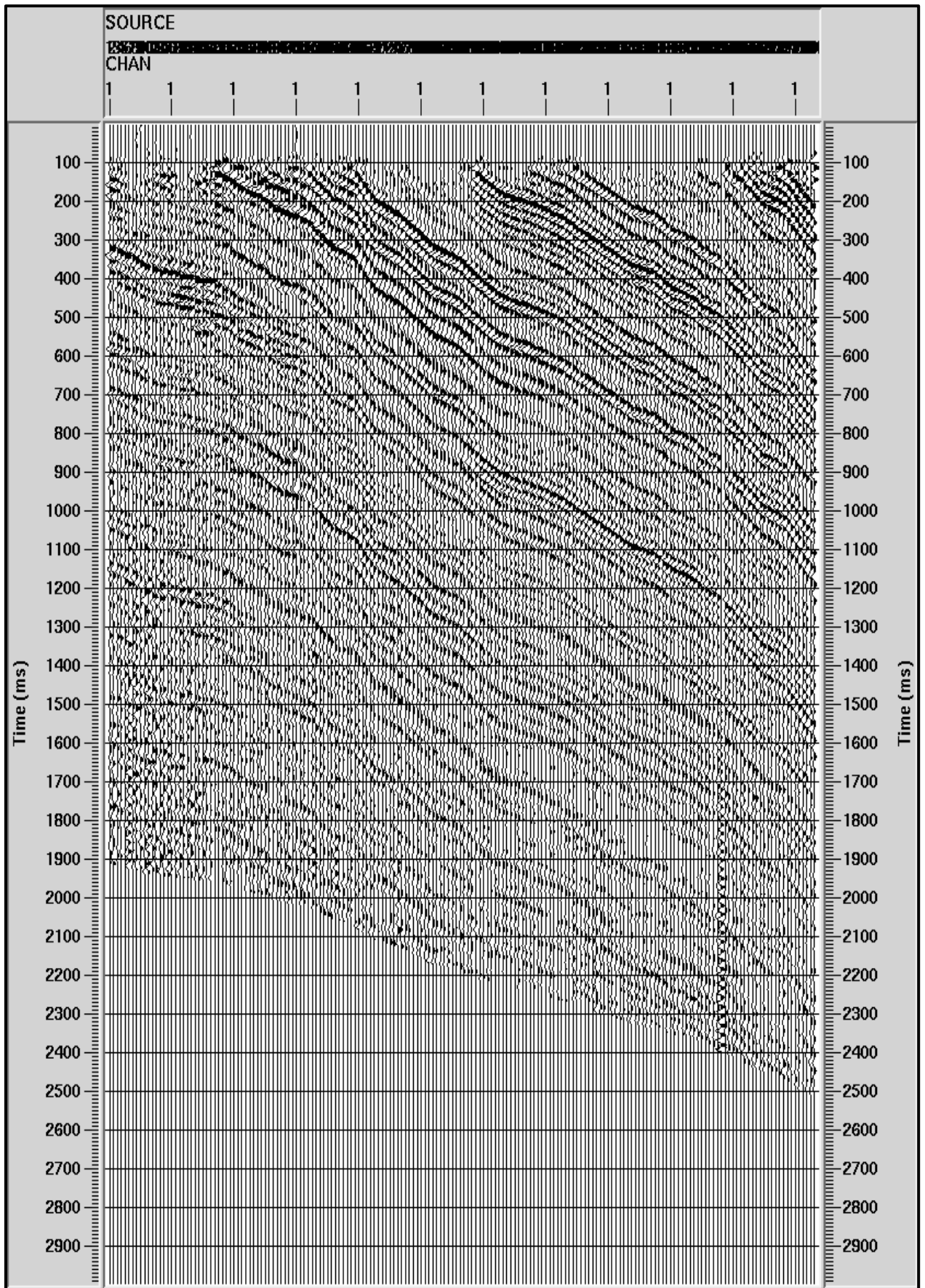


Planche 10.3 : Résultat de la soustraction des ondes descendante Filtre Médian=15 trc.

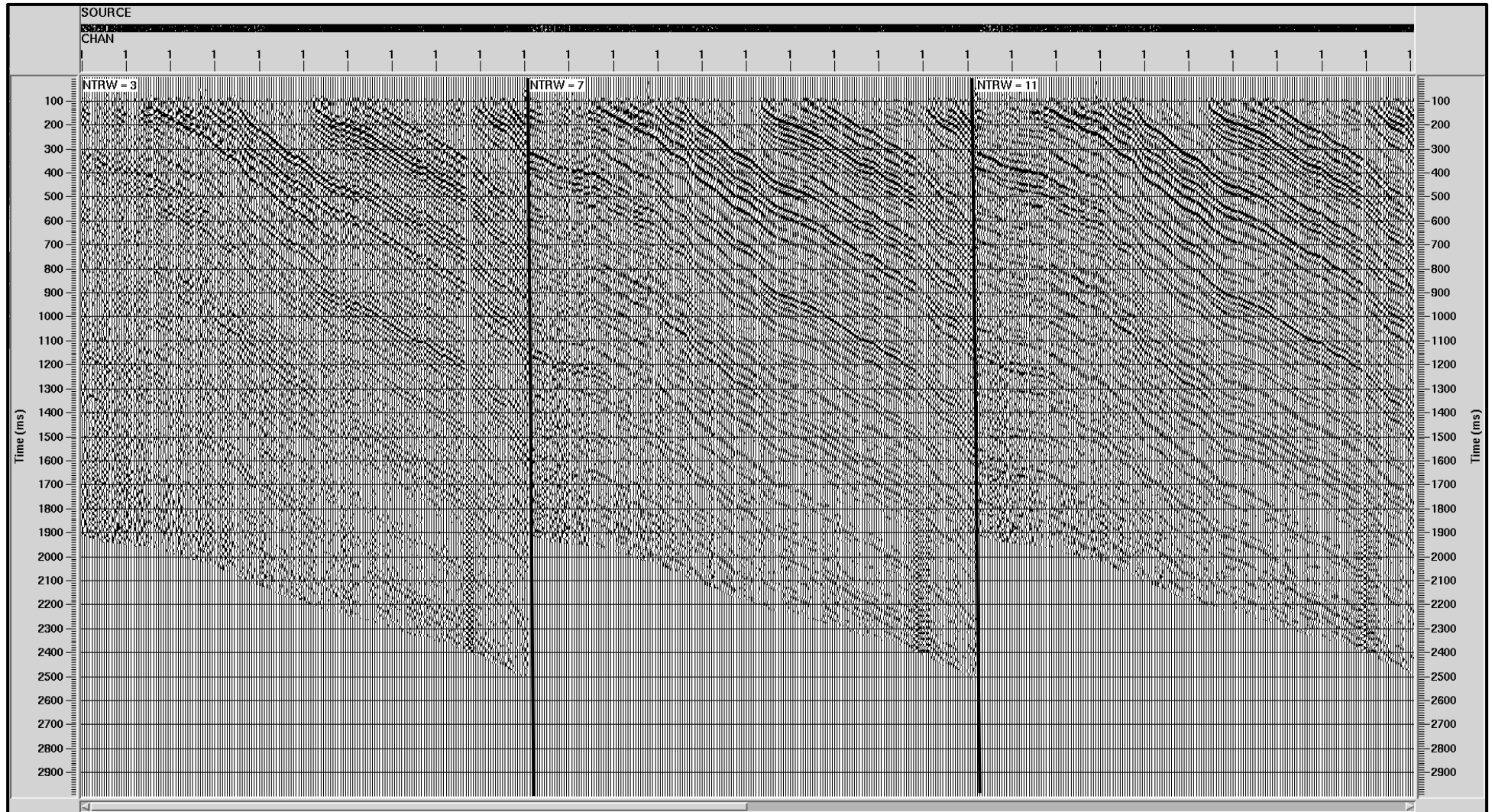


Planche 11.1 : Test des paramètres du Transformation KL.

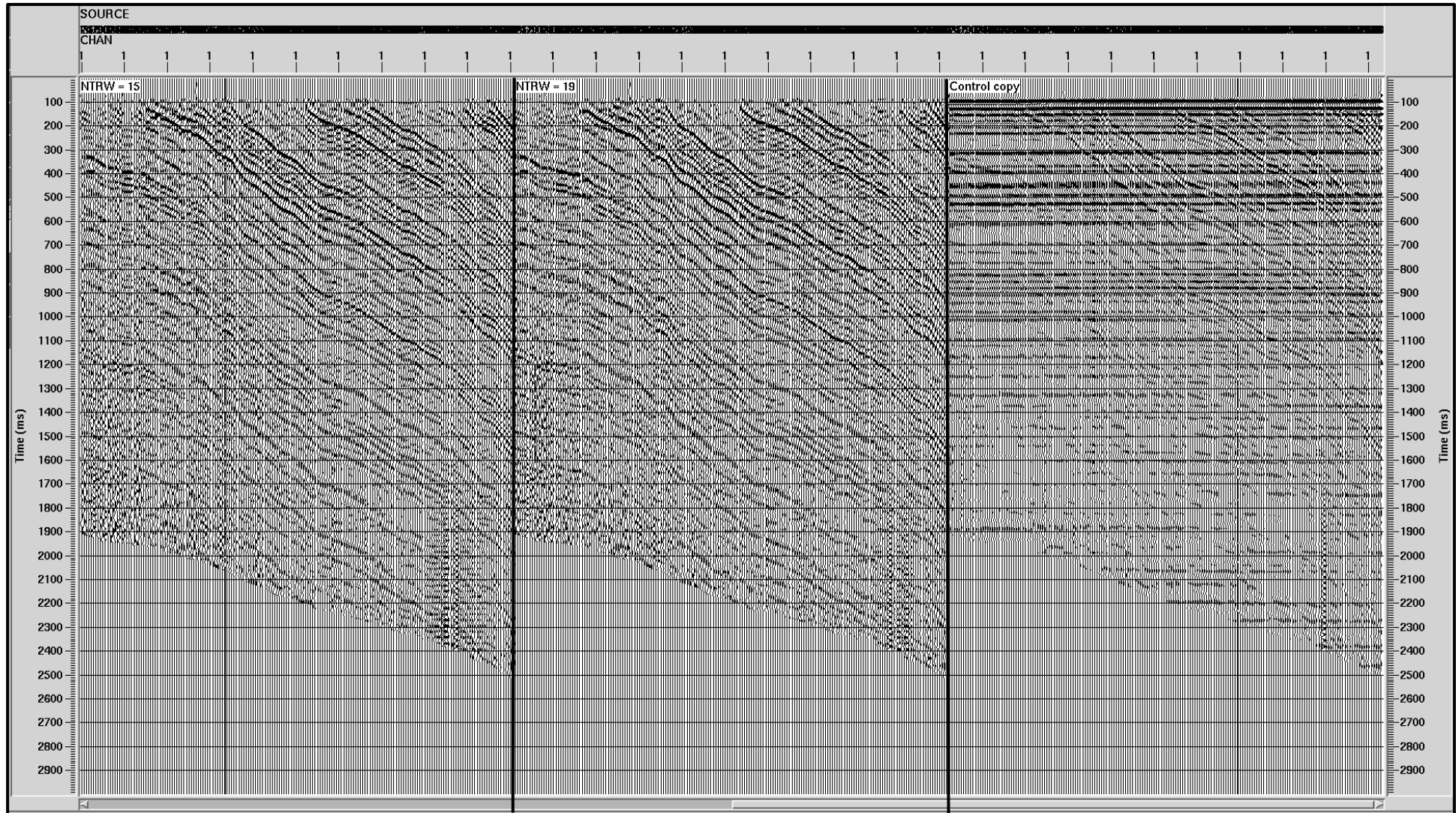


Planche 11.2 : Test des paramètres du Transformation KL.

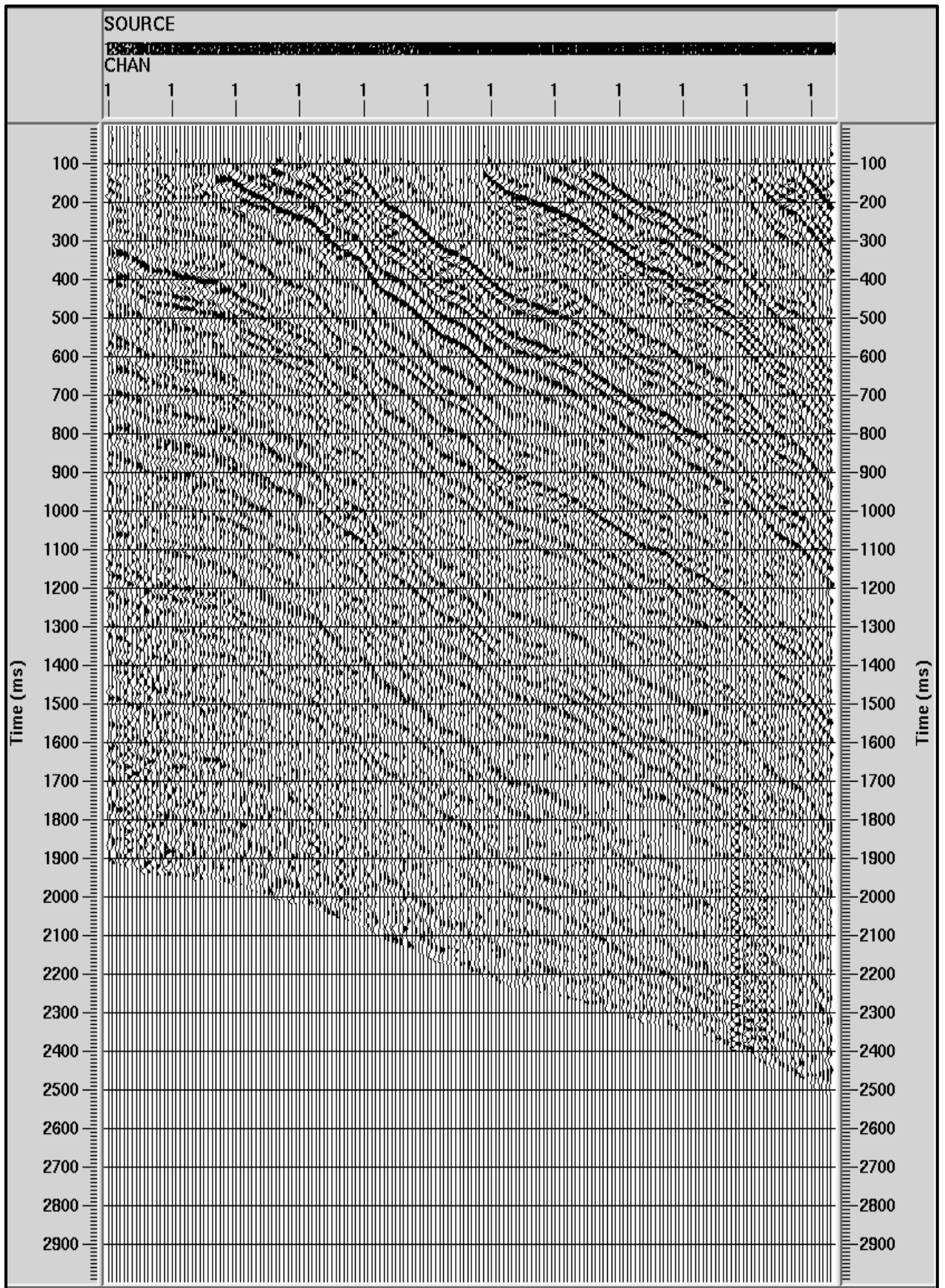


Planche 11.3 : résultat de la soustraction des ondes descendante Transformation KL=19

trc.

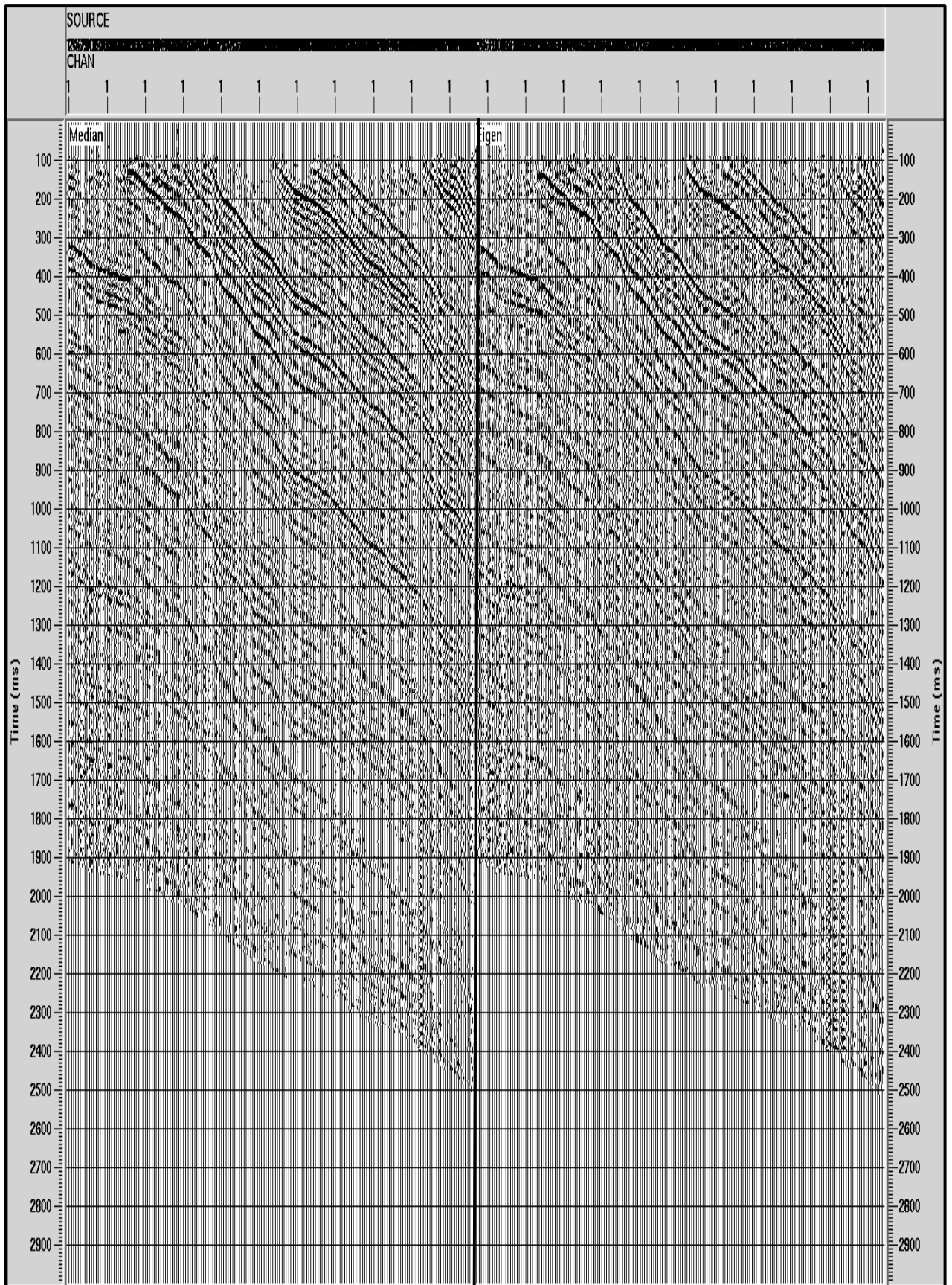


Planche 12.1 : Comparaison des ondes montantes entre les filtres Médian et KL.

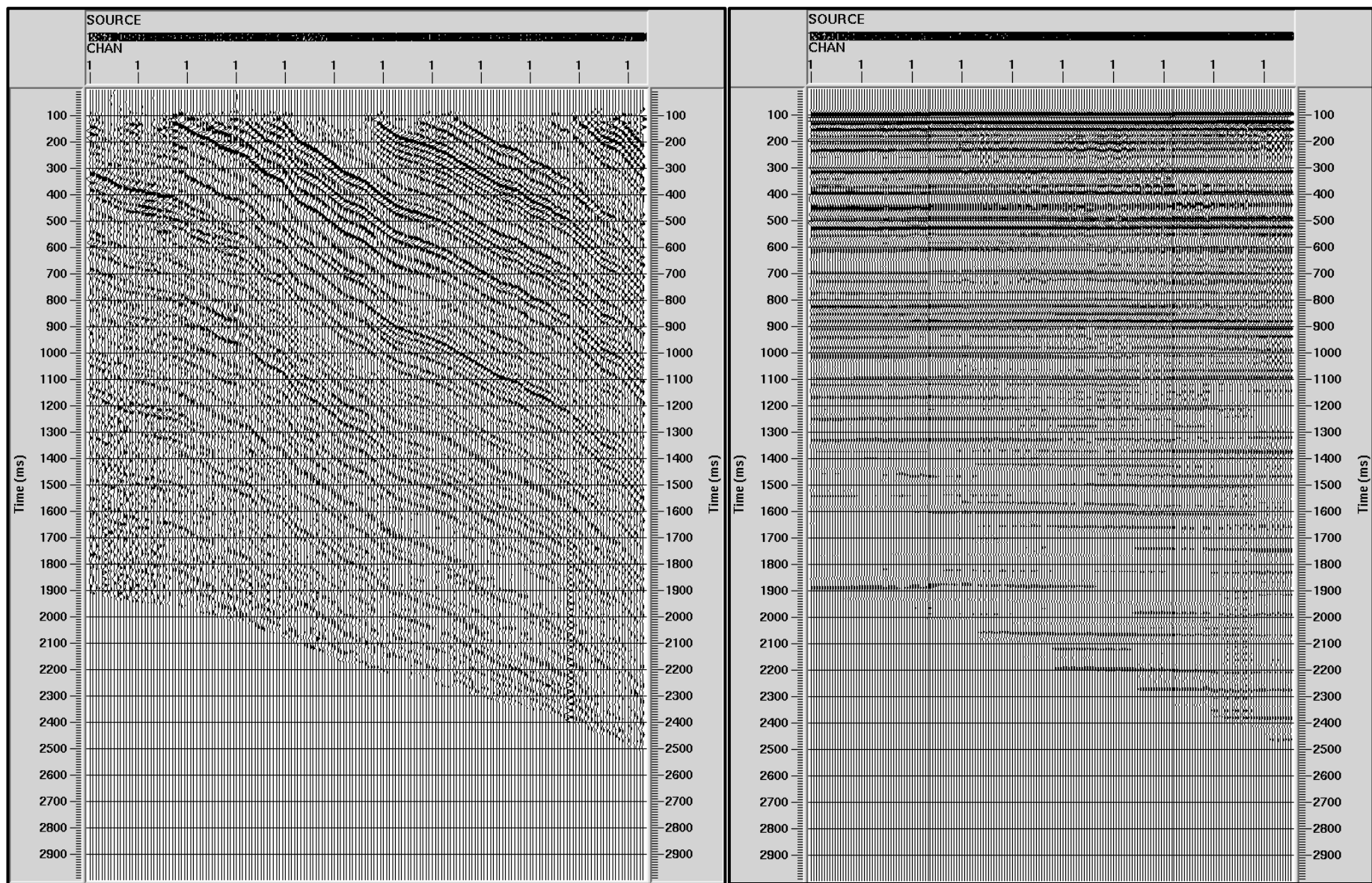


Planche 12.2 : Choix de Filtre après la comparaison (filtre Médian).

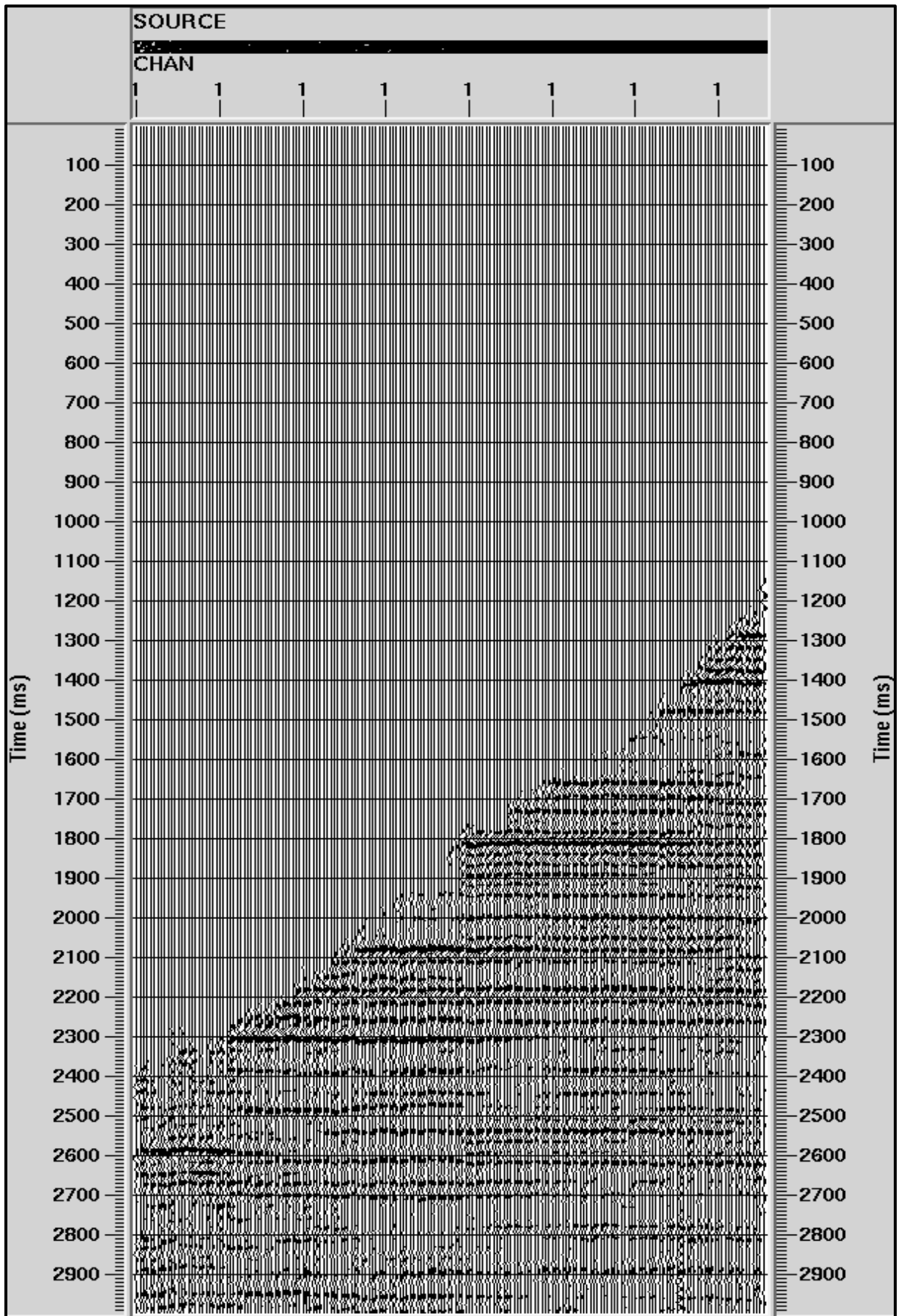


Planche 13 : le champ d'onde montante horizontalisé en temps double (TWT).

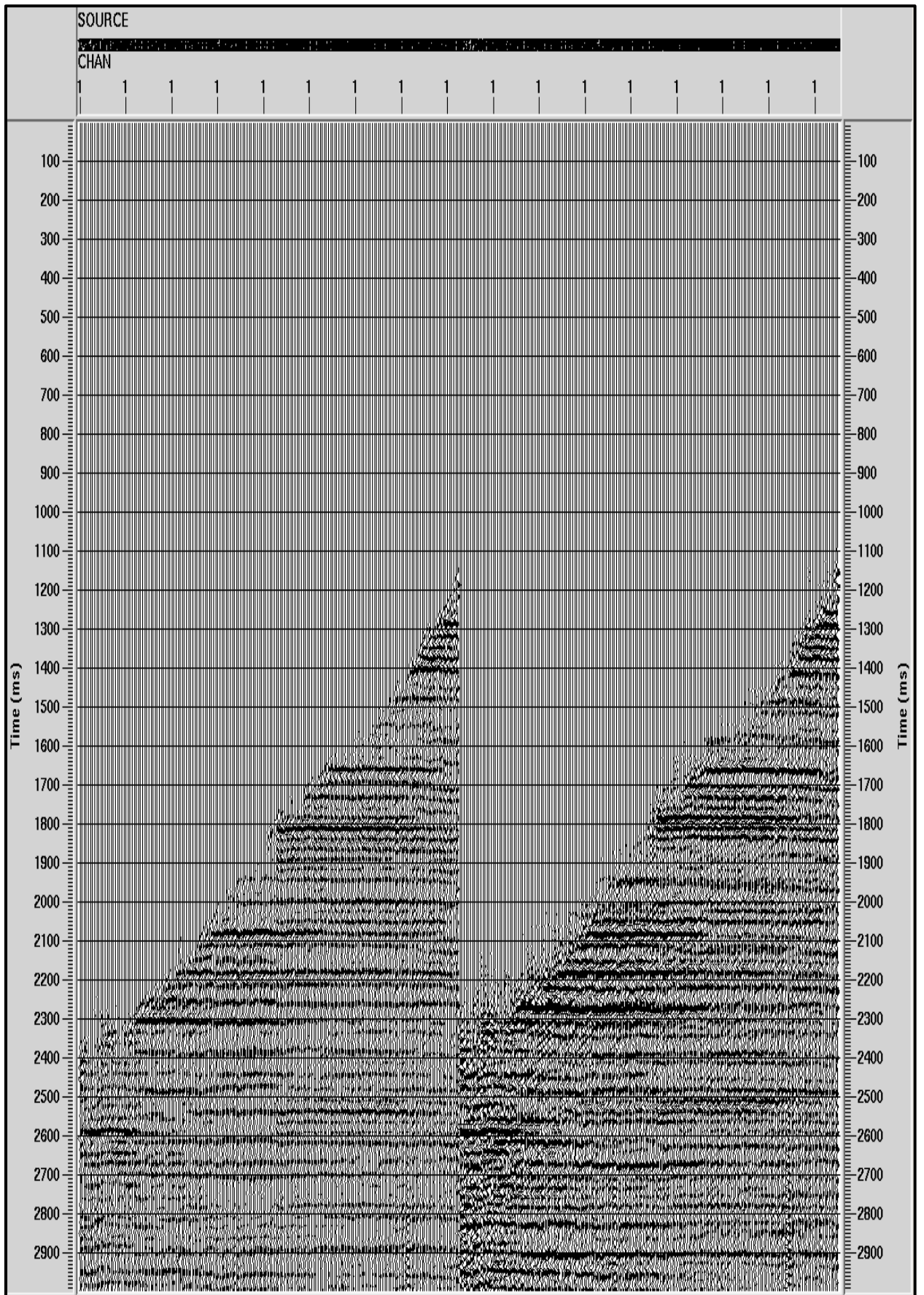


Planche 14 : les ondes montantes horizontalisées avant et après déconvolution.

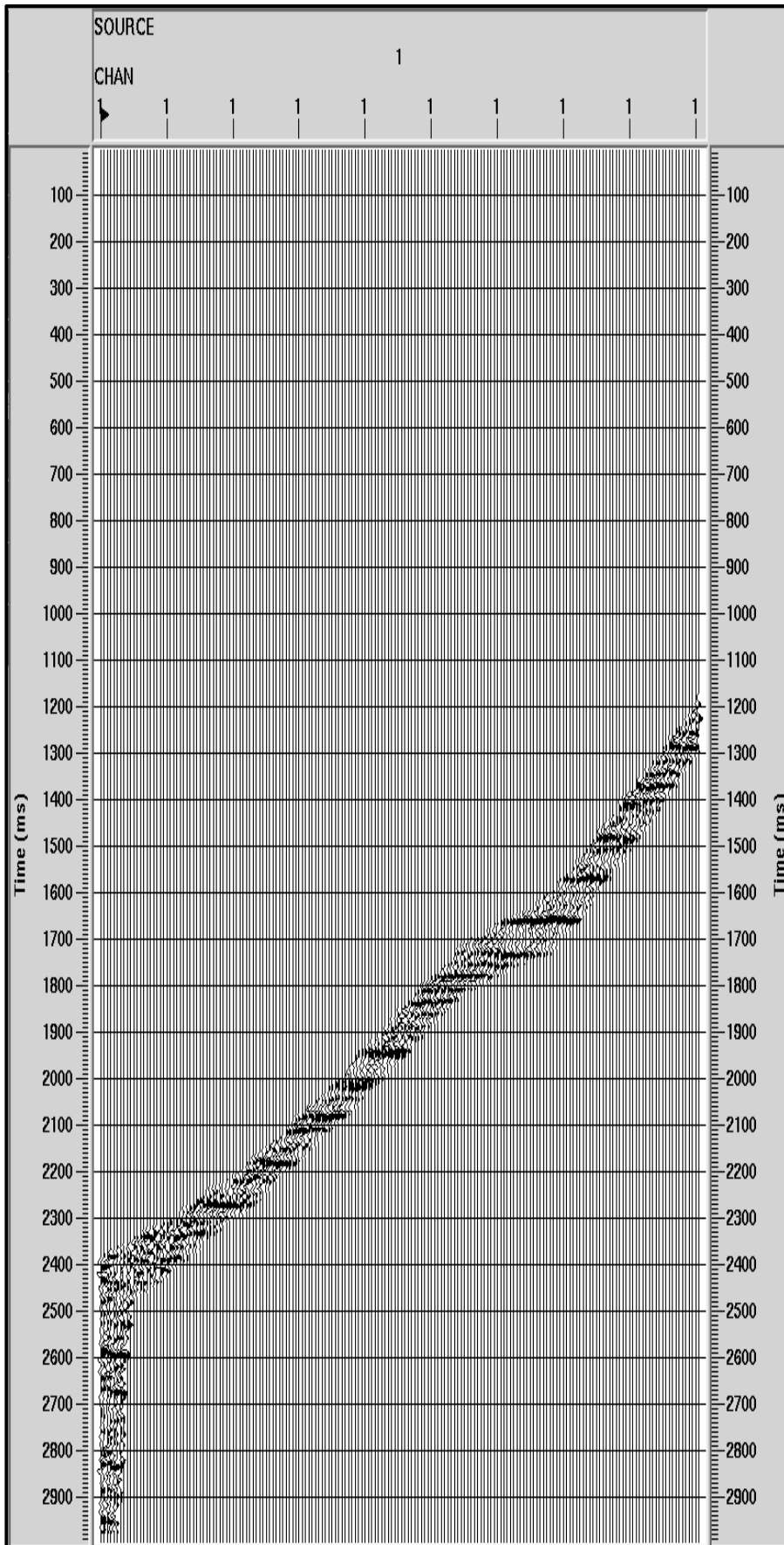


Planche 15.1 : La fenêtre du corridor.

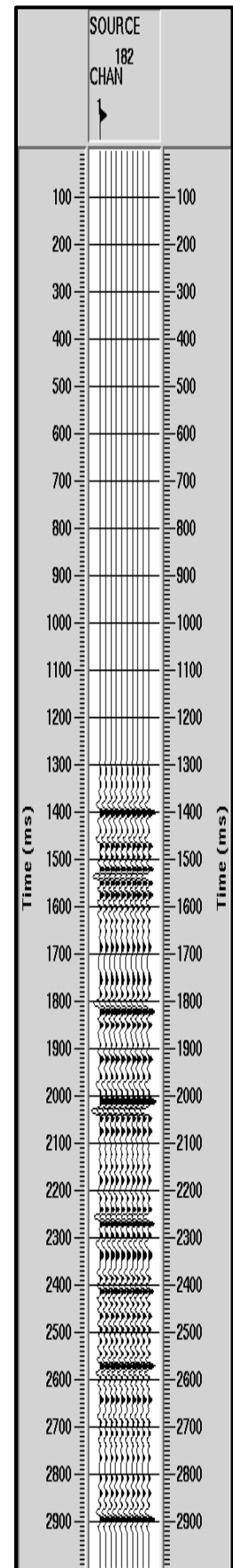


Planche 15.2 : Corridor Stack.

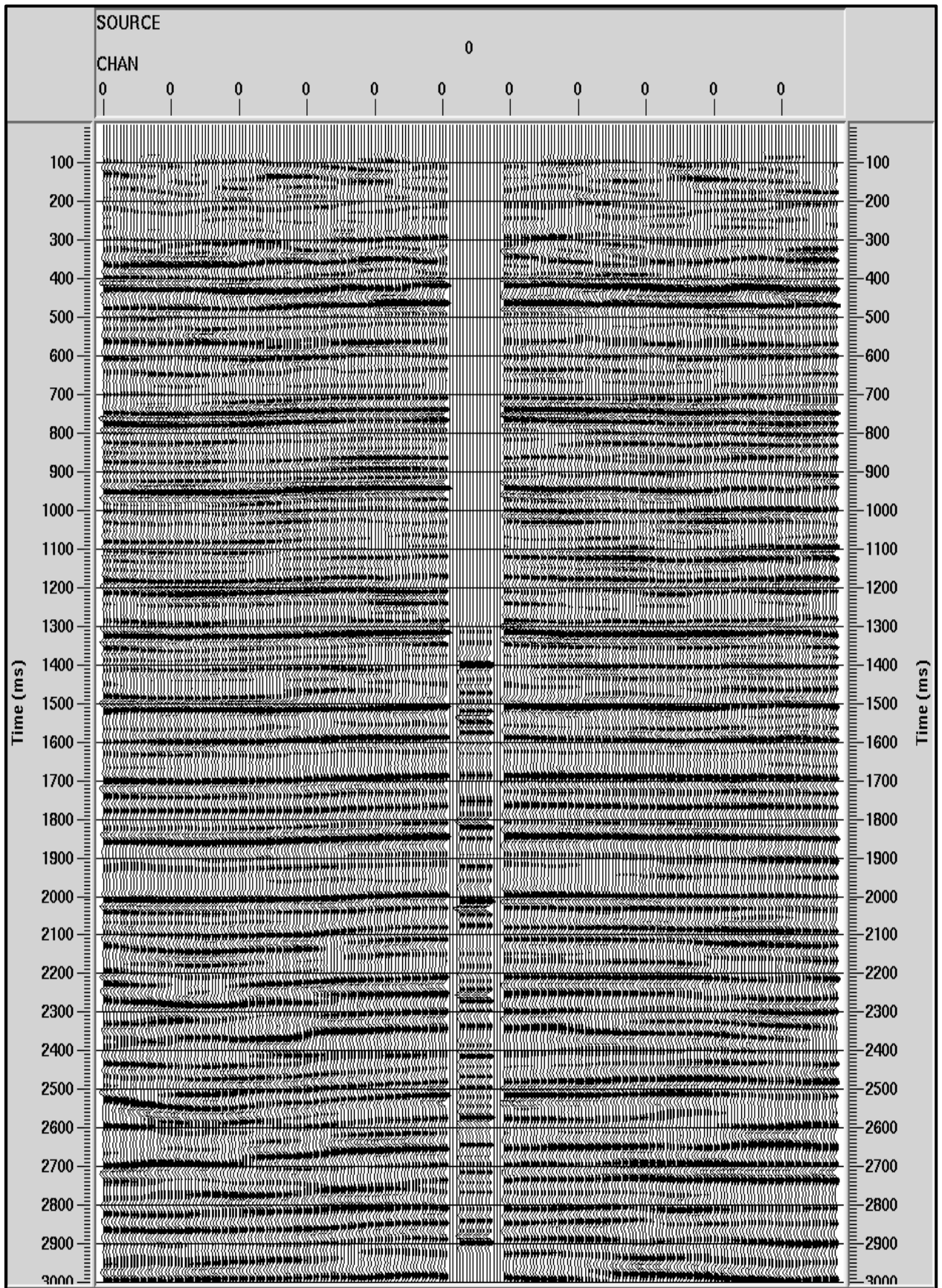


Planche 16 : le résultat du calage du corridor stack du PSV zéro offset avec le section sismique en Inline.

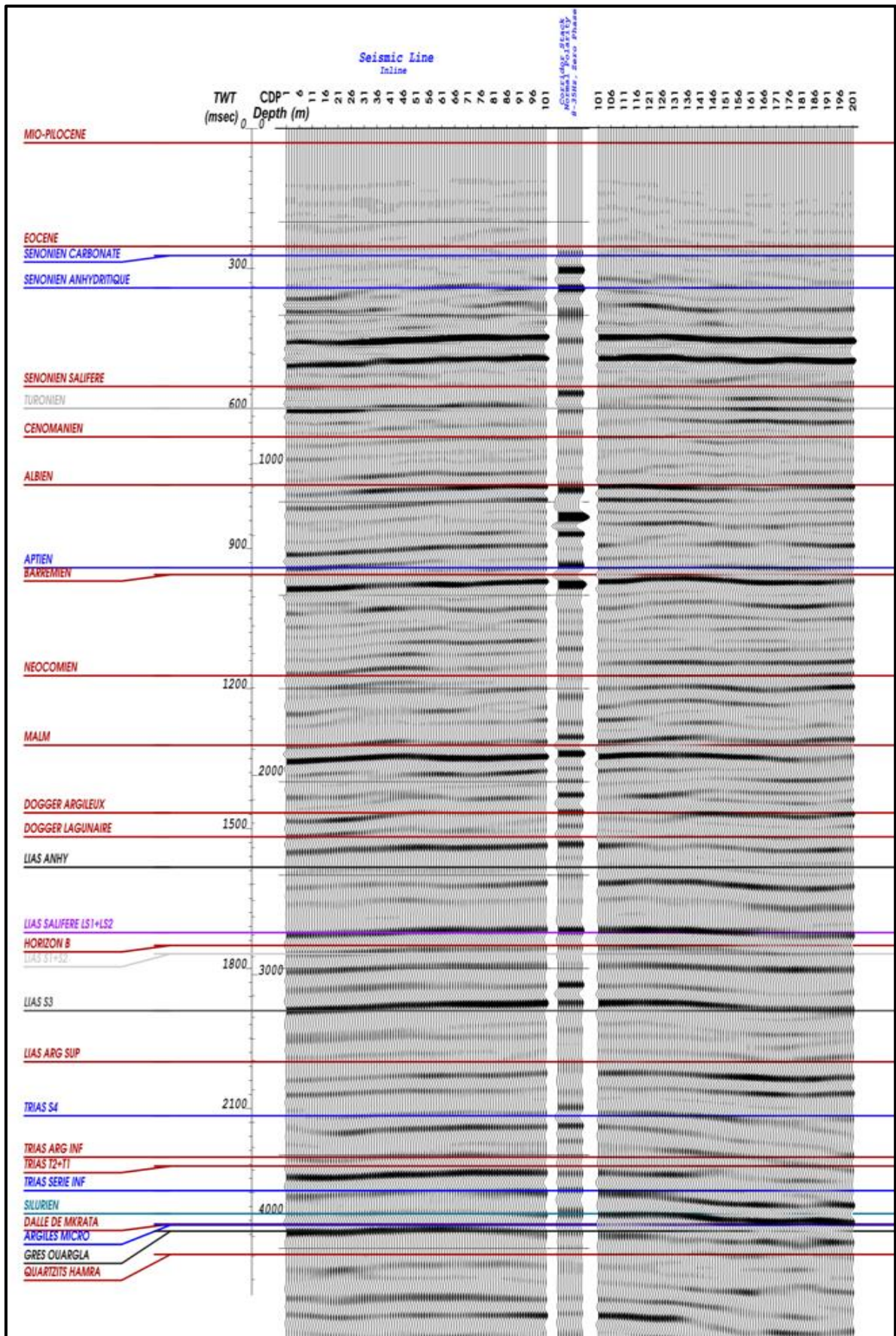


Planche 17 : le résultat du calage de la société ENAGEO.