

Sismique de puits

J.-L. Mari, C. Vergniault, F. Coppens

2.1 Introduction

La sismique de puits, dont la mise en œuvre la plus couramment utilisée est celle du profil sismique vertical (PSV, Hardage 1985, 1992 ; Mari *et al.* 1998, 2000), est une opération sismique pour laquelle un signal émis à la surface du sol est enregistré par un capteur sismique situé successivement à différentes profondeurs dans le puits. La plus ancienne mesure de sismique de puits est le sismo-sondage, réalisé pour mesurer les temps de propagation entre la surface et différentes cotes d'un puits.

Le PSV est une opération de sismique de puits pour laquelle la source et le capteur sont considérés comme étant sur la même verticale. Le PSV a une résolution verticale métrique à décimétrique et une investigation latérale de quelques dizaines de mètres (zone de Fresnel).

Le PSV repose sur l'analyse des différents trains d'onde enregistrés par le capteur de puits. La mesure du temps d'arrivée des premières ondes descendantes se propageant à incidence proche de la normale est utilisée pour fournir une distribution

Ce chapitre de l'ouvrage *Sismique en forage et diagraphies acoustiques* est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

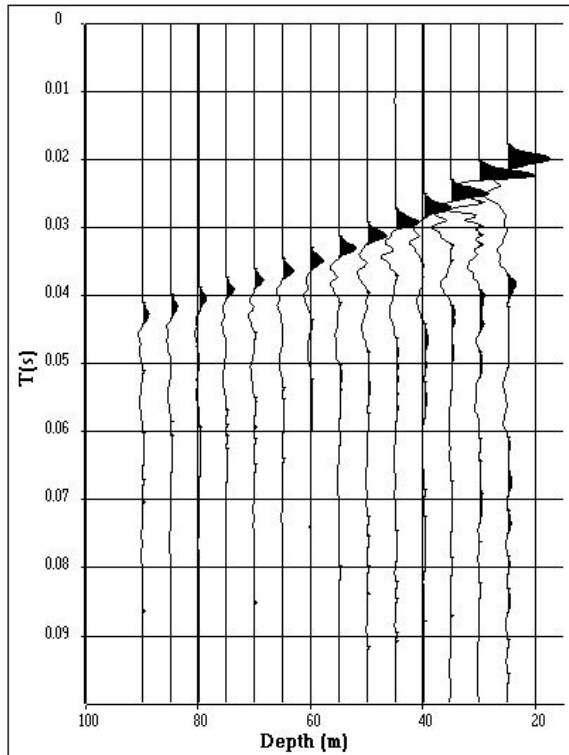
© EDP Sciences, 2018

DOI: 10.1051/978-2-7598-2262-1.c004

de vitesse dans le sous-sol. Après traitement, le PSV fournit une trace sismique sans multiples directement comparable à la section sismique de surface passant au voisinage du puits. Contrainte par les données diagraphiques (sonique et densité), la trace PSV fournit au puits et sous le fond du puits un log d'impédance acoustique.

Le puits peut être un trou ouvert, un trou tubé (acier et/ou PVC), un trou tubé cimenté. Dans ce dernier cas, il est recommandé de faire un contrôle de cimentation (diagraphie acoustique).

La figure 2.1 montre un enregistrement de PSV non traité, enregistré dans un puits vertical, tubé acier. Dans cette représentation, l'axe horizontal représente les différentes profondeurs du géophone de puits, l'axe vertical représente le temps d'écoute. Dans cet exemple, la profondeur du capteur varie entre 25 et 90 m, la source de surface est faiblement déportée (5 m) par rapport à la tête de puits. La distance entre deux positions successives du géophone dans le puits est de 5 m. Le pas d'échantillonnage en temps est de 0,25 ms pour une durée d'écoute de 250 ms. Sur la figure, la durée d'écoute a été limitée à 100 ms.



VSP : Raw data (vertical component)

document IFP School , J.L.M., 2015.

Figure 2.1 Exemple de PSV enregistré dans un puits vertical dans l'intervalle de profondeur 25-90 m.

Une façon d'augmenter l'investigation latérale du PSV consiste à déporter la source par rapport au puits. Cette mise en œuvre est appelée « Profil sismique vertical déporté » (Offset VSP : OVSP). L'image obtenue après traitement est alors une section sismique en couverture simple.

Une ballade sismique (ou *Walkaway*) est un ensemble de PSV déportés, la source occupant successivement plusieurs positions correspondant à des déports croissants par rapport à la gueule de trou. L'image obtenue après traitement est une section en couverture multiple de faible degré. Dans cette mise en œuvre, le nombre de positions du géophone de puits est généralement limité. La figure 2.2 illustre la mise en œuvre d'une ballade sismique et montre un exemple d'imagerie obtenue dans l'industrie pétrolière. L'axe horizontal représente la distance du point miroir par rapport au puits.

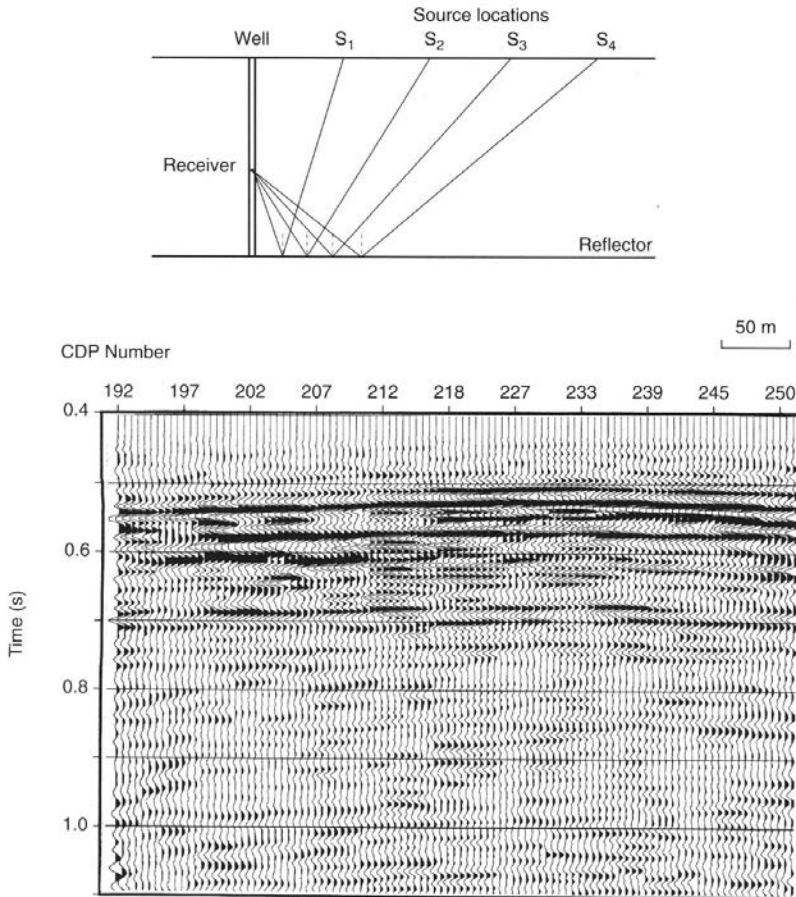


Figure 2.2 Exemple d'imagerie par ballade sismique (document : ENGIE - IFPEN).

L'investigation latérale d'une ballade sismique est cependant limitée (de quelques centaines de mètres au kilomètre) par rapport à celle d'un profil classique de sismique réflexion. Ceci souligne le caractère d'étude locale du réservoir par sismique de puits.

Les mises en œuvre de type PSV, OVSP et ballade sismique permettent d'obtenir une image des formations géologiques en dessous du puits. En cours de forage, on peut utiliser comme source de puits l'outil de forage lui-même, ce qui permet d'obtenir au fur et à mesure de l'avancement une image des formations non encore forées (prédiction sous le puits).

L'utilisation de source de puits permet de faire de la sismique de puits en transposé (émission en fond et réception en surface) et de la sismique de puits à puits. Cet aspect a été développé au chapitre 1 consacré à la mesure des vitesses de cisaillement des formations. La sismique de puits à puits peut fournir des images des formations entre les puits sous forme de sections en sismique réflexion donnant les contrastes d'impédance acoustique (figure 2.3, gauche) ou de modèles de vitesses obtenus par inversion des temps de première arrivée (tomographie par transmission, figure 2.3, droite).

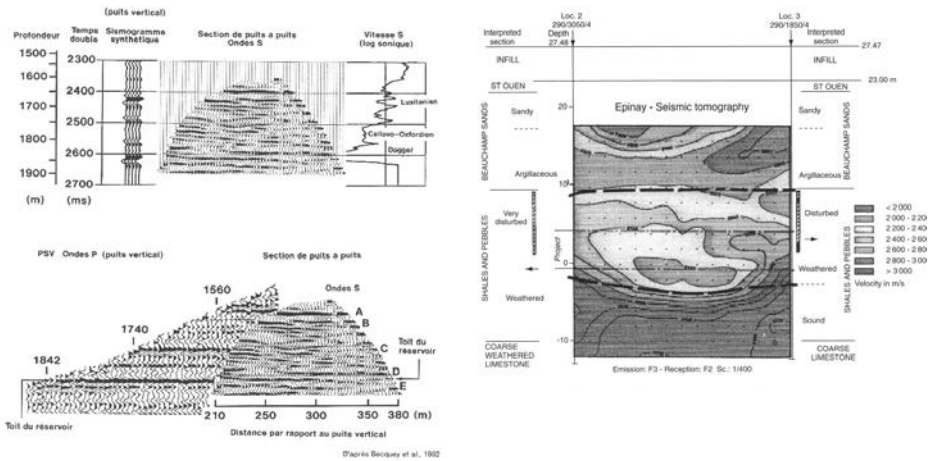


Figure 2.3 Exemples de sismique de puits à puits. À gauche : exemple de sismique de puits à puits en réflexion en ondes S entre un puits vertical et un puits dévié (d'après Becquey et al., 1992). À droite : exemple de tomographie par transmission en génie civil (document : F. Lantier, consultant).

L'ensemble des différentes mises en œuvre de sismique de puits peut être regroupé sous le terme général de profil sismique de puits.

2.2 Acquisition des données de sismique de puits

Classiquement, un profil sismique de puits s'exécute au moyen d'émissions sismiques en surface et d'une écoute faite dans le puits. Dans ce paragraphe, nous présentons successivement :

- les moyens nécessaires à l'acquisition des données ;
- la mise en œuvre sur le terrain.

2.2.1 Moyens nécessaires à l'acquisition des données

Les moyens concernent : les équipements, les véhicules et le personnel.

Équipements

1. Une unité de diagraphie comprenant : un système de réception composé d'un ou plusieurs capteurs de puits (géophones ou/et hydrophones), un treuil sur lequel s'enroule un câble de plusieurs centaines de mètres auquel est connecté le capteur de puits, une unité d'enregistrement et de numérisation (la numérisation pouvant être faite au niveau des capteurs), un système de visualisation et d'impression des enregistrements terrain, un système de mesure de la cote profondeur.
2. Un ou plusieurs capteurs de surface pour calibration de la source.
3. Une source sismique (explosif, marteau, chute de poids).
4. Un système de levage avec poulies pour la descente du système de réception.
5. Les équipements sont vérifiés (maintenance, étalonnage) périodiquement.

Véhicules

1. Soit : 1 ou 2 véhicules (de préférence tout-terrain/tout-chemin), permettant le transport du personnel et des équipements.
2. Soit : une unité de logging et un véhicule permettant le transport du personnel et de la source.

Personnel et compétences

1. Deux opérateurs qualifiés pour la mise en œuvre (source, treuil, acquisition).
2. Un géophysicien (chef de mission) qualifié pour le contrôle qualité des données à l'acquisition et qui peut être aussi opérateur.

2.2.2 Mise en œuvre sur le terrain

Dans cette partie, nous décrivons successivement :

2.2.2.1 Déroulement d'une opération de PSV classique en puits vertical

Le capteur de puits ou sonde est descendu à une cote profondeur. La source est positionnée à la surface du sol, à une faible distance (< 5 m) de la tête de puits.

Un géophone de référence est planté près de la tête de puits. Plusieurs tirs sismiques sont réalisés pour vérifier le bon fonctionnement du système complet d'acquisition (enregistreur, sonde, géophone de référence, source) et la bonne répétitivité des données. La sonde est remontée en surface.

Après avoir effectué le calage du zéro (référence sonde) à un plan de référence (radier, table de rotation...) ou au sol, la sonde est descendue en fond de puits et ancrée à la paroi du puits. Au préalable, il faut vérifier que l'ancrage de la sonde est suffisant pour faire des mesures avec le câble relâché.

L'opération de PSV à une cote donnée consiste à :

1. Contrôler la profondeur à laquelle se trouve le capteur de puits ou sonde.
2. Ancrer la sonde (si le type de sonde permet une ouverture et une fermeture des bras d'ancrage).
3. Donner du mou au câble.
4. Faire les mesures sismiques et les contrôler à l'aide du système de visualisation.
5. Vérifier la bonne répétitivité de la source sur la voie sismique dédiée au géophone de référence.
6. Tendrer le câble.
7. Désancrer la sonde (si le type de sonde permet une ouverture et une fermeture des bras d'ancrage).
8. Positionner la sonde à la cote suivante.

Cette opération peut être faite plusieurs fois à la même cote de façon à évaluer les variations de couplage et le rapport signal sur bruit.

Les opérations de sismique de puits peuvent être réalisées en puits verticaux, déviés ou horizontaux, en trou ouvert ou tubé.

2.2.2.2 Sondes de puits

- Dans le domaine pétrolier, la plupart des systèmes de réception sont des sondes multi-capteurs dans le but de réduire le temps d'acquisition de la sismique de puits et donc le coût d'immobilisation des puits. Ces systèmes sont des sondes multiples regroupant un outil maître et des outils satellites. Elles permettent l'enregistrement simultané sur plusieurs cotes et sont particulièrement utiles lors d'enregistrements de type ballade sismique. L'outil maître comprend le système téléométrique qui permet la transmission de l'information du fond vers la surface. Chacun des outils comprend un système d'ancrage et un module sismique. En géotechnique, la sonde de forage est généralement une sonde mono-capteur.
- Le capteur peut être un géophone à 1 composante (géophone vertical) ou un géophone à 3 composantes (1 composante verticale et 2 composantes horizontales orthogonales). Le capteur peut aussi être un hydrophone, voire à 4 composantes : géophone 3 composantes et hydrophone. En géotechnique, on utilise classiquement une sonde mono-capteur de type géophone à 1 ou 3 composantes. Le système d'ancrage peut être hydraulique ou mécanique avec possibilité ou non d'ouverture

et de fermeture des bras d'ancrage. En géotechnique, on utilise également un hydrophone unique ou une flûte d'hydrophones (12 niveaux par exemple).

- Si le système d'ancrage permet l'ouverture et la fermeture des bras d'ancrage, il est recommandé de faire des mesures sismiques à quelques cotes à la descente et de reprendre les mêmes cotes à la remontée pour contrôler le calage en profondeur.
- L'acquisition du PSV est réalisée du fond de puits vers la surface pour des raisons de commodité d'acquisition.

La figure 2.4 montre des exemples de sondes de puits : géophone 3 composantes, hydrophone unique, flûte d'hydrophones. La figure montre également un exemple de PSV obtenu avec un hydrophone.

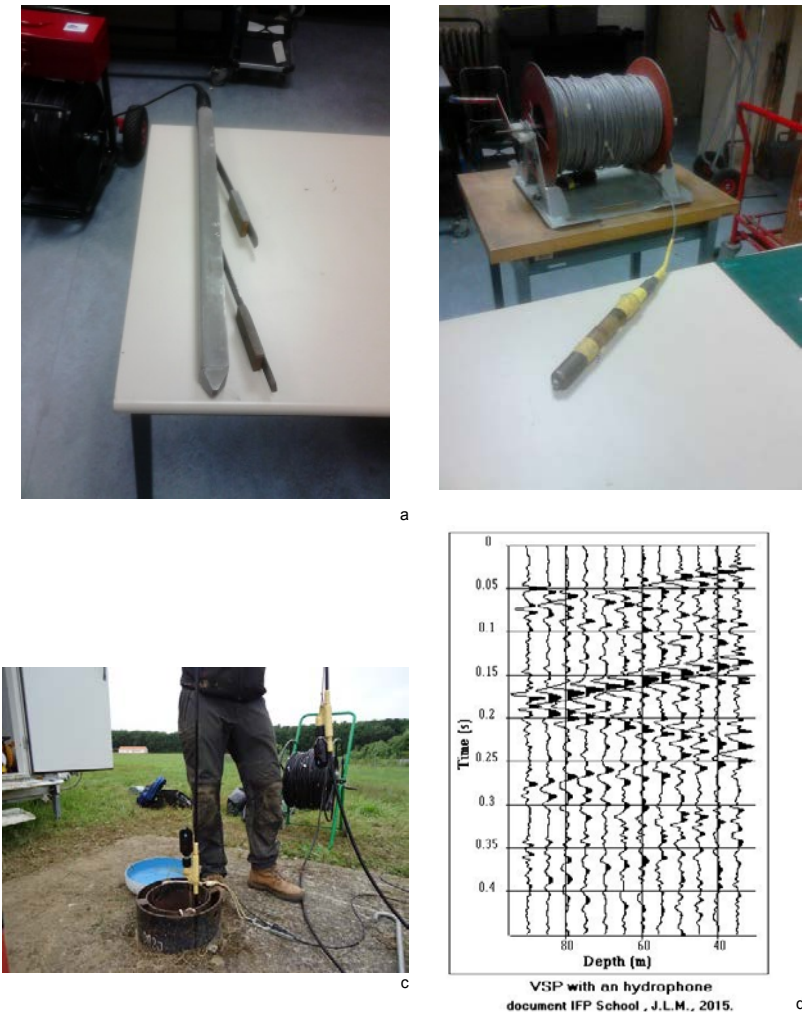


Figure 2.4 Exemples de sondes de puits. a : géophone 3C. b : hydrophone. c : flûte d'hydrophones. d : exemple de PSV enregistré avec un hydrophone.

2.2.2.3 Source sismique

La source sismique doit être dimensionnée pour un rapport Signal/Bruit optimal sur la hauteur de puits investiguée et pour un contenu fréquentiel adapté. L'explosif (forte énergie mais nuisances et autorisations contraignantes), le fusil (cartouche), le marteau (pratique mais de faible énergie) et la chute de poids (bon compromis énergie/encombrement) sont les sources les plus utilisées. Ces sources émettent principalement des ondes de volume de type ondes de compression. On peut également utiliser un mini-vibrateur. Les pétroliers utilisent, en général, la source sismique mise en œuvre pour l'acquisition des données de sismique de surface (vibrateur). En marine, on utilise le plus souvent un canon à air. Pour émettre des ondes S, on peut utiliser un marteau avec frappes latérales sur une cible ancrée au sol. Ce point est développé au chapitre 1.

La figure 2.5 montre des exemples de source sismique utilisée en génie civil.



Source : fusil



Source : chute de poids (document APEC)

Figure 2.5 Sources sismiques utilisées en génie civil.

2.2.2.4 Paramètres d'acquisition

L'enregistrement PSV est un enregistrement à deux dimensions (temps : axe vertical ; profondeur ou longueur filée : axe horizontal). Le pas d'échantillonnage en temps est de 0,25 ms, 0,5 ms ou 1 ms. La durée d'écoute est de quelques centaines de ms à quelques secondes. La distance verticale Δz entre deux points de mesure (échantillonnage suivant la profondeur, soit l'axe horizontal) doit être choisie inférieure à la plus petite demi-longueur d'onde rencontrée pour éviter le phénomène d'aliasing spatial. Δz est calculée à partir de la plus petite vitesse V_{\min} de propagation des ondes sismiques et de la fréquence F_{\max} la plus haute susceptible d'être enregistrée : $\Delta z \leq V_{\min}/2F_{\max}$. Si $V_{\min} = 1\,500$ m/s et $F_{\max} = 150$ Hz, on choisira $\Delta z \leq 5$ m.

En pratique, les distances verticales sont choisies entre 2 m et 5 m en géotechnique. Pour une acquisition de type ballade sismique, le déport D de la source par rapport à la tête de puits dépend de la profondeur H de l'objectif. Pour une imagerie par réflexion, les angles d'incidence ne doivent pas dépasser 30 degrés. Une règle pratique donne $D < \frac{3}{4} H$.

2.2.2.5 Sécurité

La sécurité du chantier doit être assurée par le chef de mission, en accord avec le Système Qualité du prestataire. Les accès à la zone de mesures seront sécurisés. L'usage d'explosif doit être réservé aux boufeux professionnels.

2.2.2.6 Contrôle Qualité

Après chaque cote, l'opérateur contrôle la qualité des enregistrements (capteur de puits et de surface, le niveau de bruit, le bon couplage du capteur de puits...).

2.2.2.7 Production

En moyenne, pour un PSV standard : 5 minutes/cote.

2.3 Ondes sismiques

L'enregistrement PSV est composé d'ondes de volume de type P et/ou S, descendantes et montantes, ainsi que des modes guidés d'interface liés à la présence du puits et du fluide de puits. Les modes guidés sont des ondes de type Stoneley, plus communément appelées ondes de tube.

Les ondes de volume descendantes sont les ondes directes, créées par la source, et les multiples créés par les marqueurs situés au-dessus du capteur de puits. Les ondes de volume montantes sont des ondes réfléchies, primaires ou multiples.

Les ondes descendantes ont des vitesses apparentes positives, les ondes montantes des vitesses apparentes négatives.

Les ondes de tube sont créées lorsqu'il y a mise en mouvement des particules de la colonne de boue qui remplit le puits. Les ondes de surface sont la source principale des ondes de tube, qui sont considérées comme des bruits organisés qui perturbent les enregistrements PSV et qui gênent l'interprétation. Il existe cependant des ondes de tube qui peuvent être utiles au géophysicien. Ce sont les ondes de tube créées in situ dans les zones à forte perméabilité par l'intermédiaire des ondes de compression qui traversent la zone perméable et donnent naissance à deux ondes de tube, l'une montante, l'autre descendante comme le montre la figure 2.6. L'amplitude de ces

deux ondes de tube est directement proportionnelle à la perméabilité de la zone où elles ont été créées et la valeur de la perméabilité ainsi trouvée est significative par rapport au puits sur une distance égale à la demi-longueur dominante de l'onde de compression incidente (Huang et Hunter, 1981). Un exemple réel d'analyse d'onde de tube dans une zone réservoir est présenté par J.L. Mari (1989).

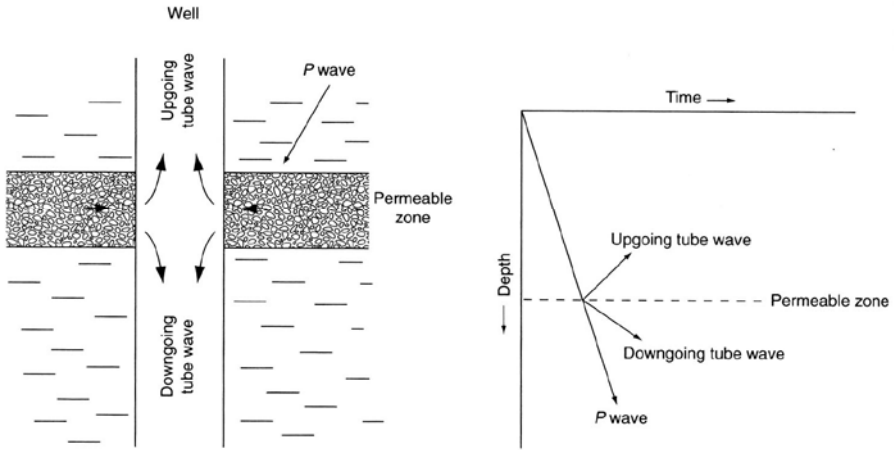


Figure 2.6 Création d'ondes de tube par les ondes de compression traversant une zone perméable, et représentation schématique de ces ondes sur l'enregistrement PSV (d'après Hardage, 1985).

La figure 2.7 montre un PSV avec un fort niveau d'ondes de tube notées TW1 à TW6. On peut identifier l'onde descendante directe (première arrivée), un ensemble d'arrivées réfléchies montantes coupant l'arrivée directe et des ondes de tube descendantes et montantes. Les ondes de surface générées par la source créent un champ d'ondes de tube (TW3) qui se réfléchit en fond de puits (TW4), et au toit d'une zone poreuse et perméable située à 440 m de profondeur (TW5). TW5 se réfléchit de nouveau à la surface au contact fluide-air (TW6). L'onde P descendante pénétrant la zone perméable à 440 m donne naissance à une onde de tube (TW1) qui se réfléchit en fond de puits (TW2). On peut noter également des ondes de tube secondaires à vitesse apparente lente dues à l'outil. On peut aussi utiliser les ondes de Stoneley pour obtenir des renseignements concernant la vitesse des ondes de cisaillement de la formation, détecter les zones de fractures et karsts. Un exemple d'utilisation des ondes de tube pour détecter les niveaux karstiques d'un réservoir carbonaté proche de la surface sera présenté au chapitre 5. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un hydrophone, comme capteur sismique.

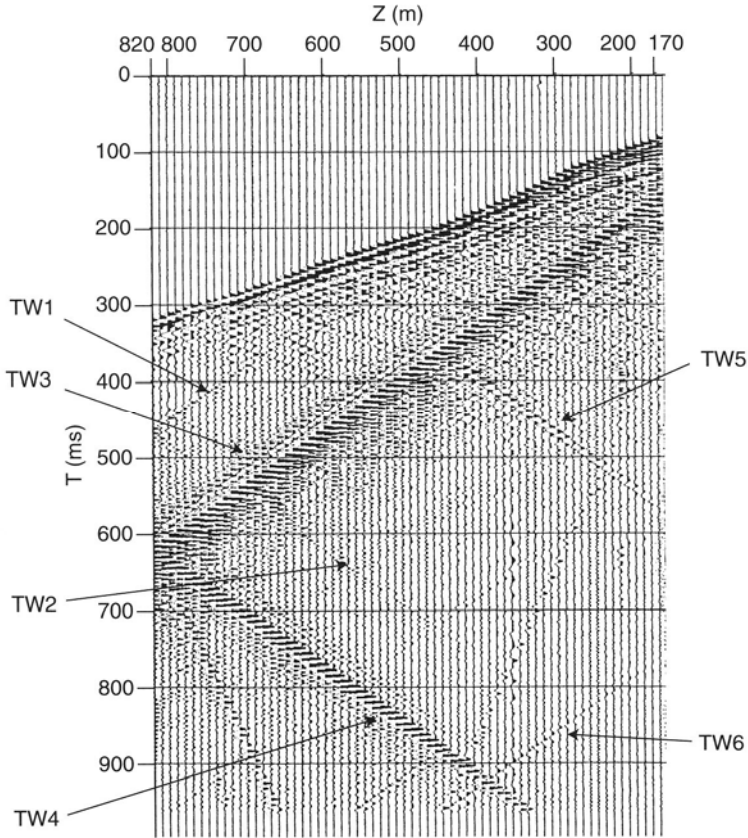


Figure 2.7 Exemple de PSV avec ondes de tube (document : ENGIE – IFPEN).

Lorsque la source est déportée, on observe des phénomènes de conversion. Pour bien comprendre la propagation des ondes, il est nécessaire d'enregistrer les données sur des capteurs multi-composantes. La figure 2.8 montre un PSV déporté enregistré avec un géophone de puits à deux composantes, verticale Z et horizontale H.

Sur les deux composantes, la première arrivée est l'onde directe P. On observe une onde descendante S de vitesse apparente faible, mais plus marquée sur la composante horizontale. Les ondes montantes sont visibles sur les deux composantes, la vitesse apparente des ondes S étant plus faible que celle des ondes P.

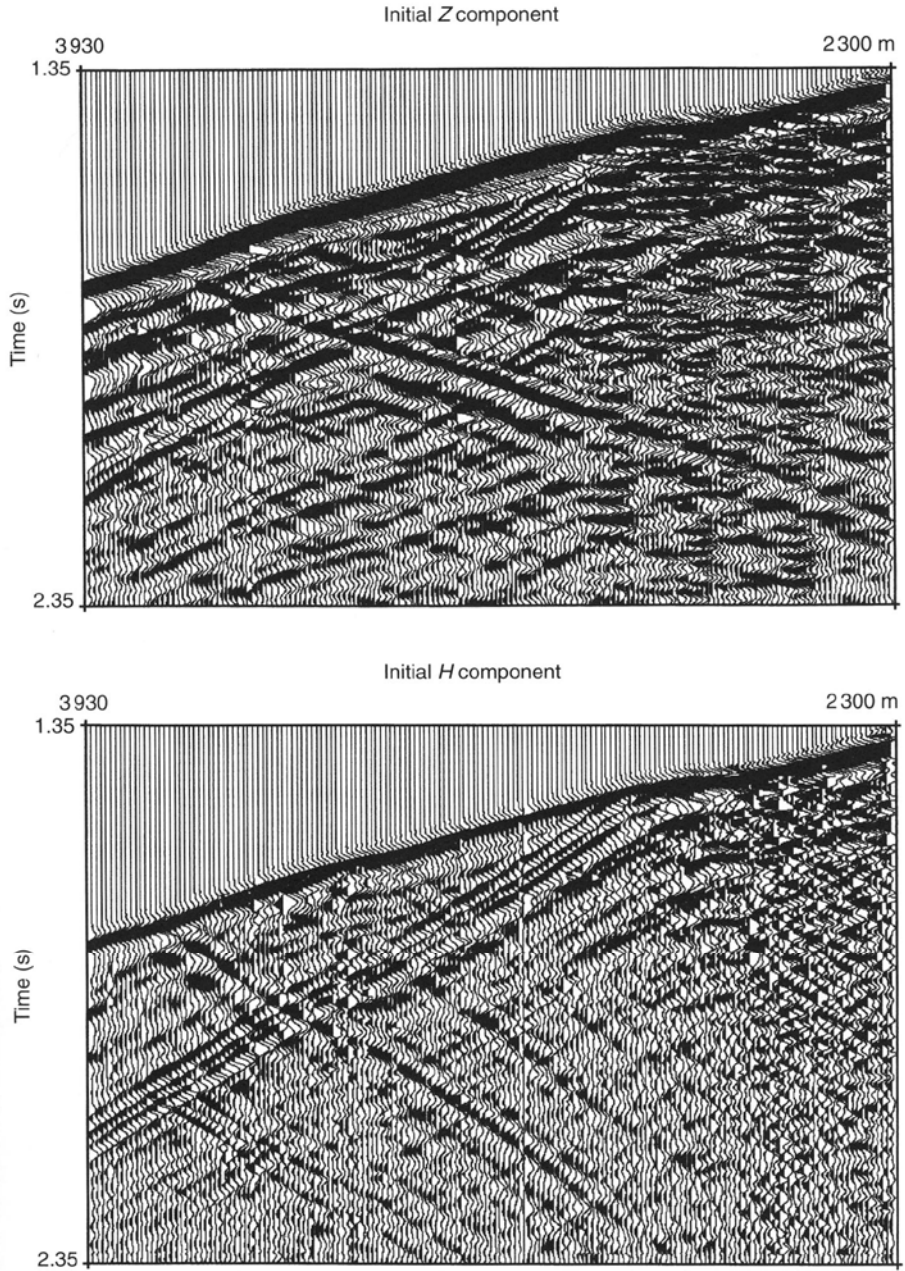


Figure 2.8 Exemple de PSV déporté enregistré avec un géophone de puits à deux composantes Z et H (d'après J. Mars et al., 1999).

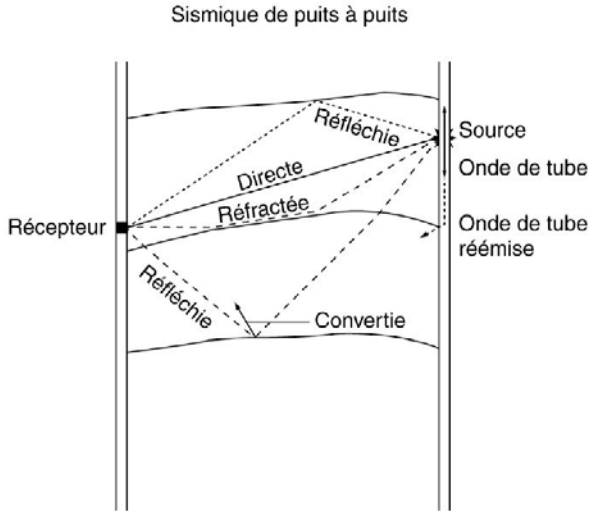


Figure 2.9 *Trajet des ondes en sismique de puits à puits.*

Dans le cas de la sismique de puits à puits (figure 2.9), le champ d'onde observé est complexe.

D'une manière générale, on observe :

- l'onde directe ;
- les ondes réfléchies et/ou réfractées sur des marqueurs situés au-dessus ou en dessous de la position du récepteur, avec et sans phénomène de conversion ;
- des ondes de conversion créées par les ondes de tube générées par la source. Ces phénomènes de conversion, ondes de tube-ondes de volume, se produisent aux limites des couches associées à de fort contraste d'impédance acoustique et en fond de puits.

Lorsque l'on dispose de deux ou plusieurs puits, une étude tomographique peut être effectuée pour décrire finement la zone située entre les deux puits. Plusieurs mises en œuvre sont possibles :

- tomographie par transmission ;
- tomographie par réflexion ;
- tomographie par diffraction.

La figure 2.3 (droite) est un exemple de tomographie par transmission en génie civil, réalisée dans des puits verticaux à l'avant d'un tunnelier servant à la pose d'un égout de gros diamètre. Elle montre une altération importante de la roche dans la zone du projet.

Il est aussi possible de faire de l'imagerie par réflexion entre puits en traitant les données comme celles qui sont obtenues en PSV déporté (figure 2.3, gauche). L'un des puits sert d'émetteur et l'autre de récepteur. Dans l'exemple présenté, la source est une chute de poids générant des ondes S. Après traitement, la section obtenue est une section en onde S qui a une meilleure résolution verticale que celle obtenue avec un PSV en onde P acquis dans le puits récepteur. En génie civil, la sismique de puits à puits est couramment utilisée pour déterminer les vitesses S des formations. Un exemple est présenté au chapitre 1.

2.4 Séquence de traitement

Le traitement classique d'un PSV permet d'obtenir la relation temps-profondeur et les logs de vitesse au puits ainsi que la trace somme PSV comparable à une trace sismique très haute résolution, sans multiples. On fait ici l'hypothèse que émetteur et récepteur sont situés sur une même normale aux couches.

La séquence de traitement comprend :

1. Édition (élimination des enregistrements de mauvaise qualité).
2. Corrélacion par le « *sweep* » d'émission si la source est vibratoire et si ce traitement n'a pas été fait à l'acquisition.
3. Correction des fluctuations de signature (temps et amplitude) à l'aide du géophone de référence.
4. Sommation des enregistrements obtenus à la même cote.
5. Tri en composantes, si le capteur de puits est multi-composante.
6. Pointé des temps de première arrivée et calcul de la relation temps-profondeur, puis des logs de vitesse (vitesse d'intervalle, vitesse moyenne et vitesse RMS).
7. Séparation (par filtre de vitesse apparente) des ondes de volume et des ondes guidées, des ondes montantes et des ondes descendantes.
8. Mise à l'horizontal des ondes de volume (P ou S) montantes et descendantes.
9. Déconvolution des ondes montantes de volume par les ondes descendantes.
10. Obtention de la trace somme PSV. Les ondes montantes mises à l'horizontal et déconvoluées sont sommées dans un couloir de sommation (*corridor stack*) suivant immédiatement les temps de première arrivée.
11. En option, analyse des amplitudes des ondes descendantes de volume et calcul de log d'atténuation.
12. En option, analyse des amplitudes des ondes guidées (PSV avec hydrophone).

La séparation des ondes montantes et descendantes est basée de façon explicite ou implicite dans les différentes méthodes de séparation, sur le fait que les deux

types d'ondes ont des vitesses apparentes de signe opposé. Ces méthodes de séparation d'ondes peuvent être divisées en deux catégories (Mari et Coppens, 2000 ; Mari, 2015) :

- les méthodes qui nécessitent que la section sismique de puits soit horizontalisée sur le temps de l'arrivée directe avant que l'algorithme de séparation ne soit appliqué ;
- les méthodes qui ne nécessitent pas d'horizontalisation (mise à plat de l'onde).

Parmi les méthodes ou filtres appartenant à la première catégorie, on peut citer :

- le filtre par somme et différence ;
- le filtre médian ;
- le filtre de Wiener ;
- le filtre en vitesse apparente si la distance entre cotes n'est pas régulière ;
- le filtre par décomposition en valeurs principales (SVD).

Les filtres appartenant à la deuxième catégorie sont :

- les filtres basés sur la matrice spectrale (SMF) ;
- les méthodes paramétriques ;
- le filtre en vitesse apparente (tel que le filtre f - k , fréquence-nombre d'ondes) si la distance entre cotes est régulière.

Il existe des méthodes de séparation non basées sur le critère de vitesse apparente, notamment les filtres de polarisation pour l'extraction des ondes P et des ondes S.

Il est souvent nécessaire de combiner plusieurs méthodes pour obtenir une séparation d'ondes optimale. En PSV déporté, par exemple, on utilisera un filtre en vitesse apparente (filtre f - k , par exemple) pour séparer les ondes montantes et descendantes, suivi d'un filtre de polarisation pour séparer ondes P et ondes S. Un exemple de séparation d'ondes par filtre f - k et filtre de polarisation est présenté figure 2.10. Les données initiales sont présentées en figure 2.8. Sur chacune des composantes (Z, H), on observe des ondes montantes et des ondes descendantes qui peuvent être séparées par un filtre en vitesse apparente. Dans le cas présent, un filtre f - k a été appliqué. Après séparation, chaque type d'ondes (montantes ou descendantes) comprend des ondes de compression P et des ondes de cisaillement S, qui ont des vitesses apparentes proches. Les ondes P et S sont séparées par polarisation. La figure 2.10 montre le résultat de l'extraction des ondes descendantes et montantes de type P et S. La descendante P apparaît sur tout l'enregistrement. La descendante S n'apparaît qu'à partir d'une certaine profondeur, correspondant au marqueur sur lequel a lieu le phénomène de conversion.

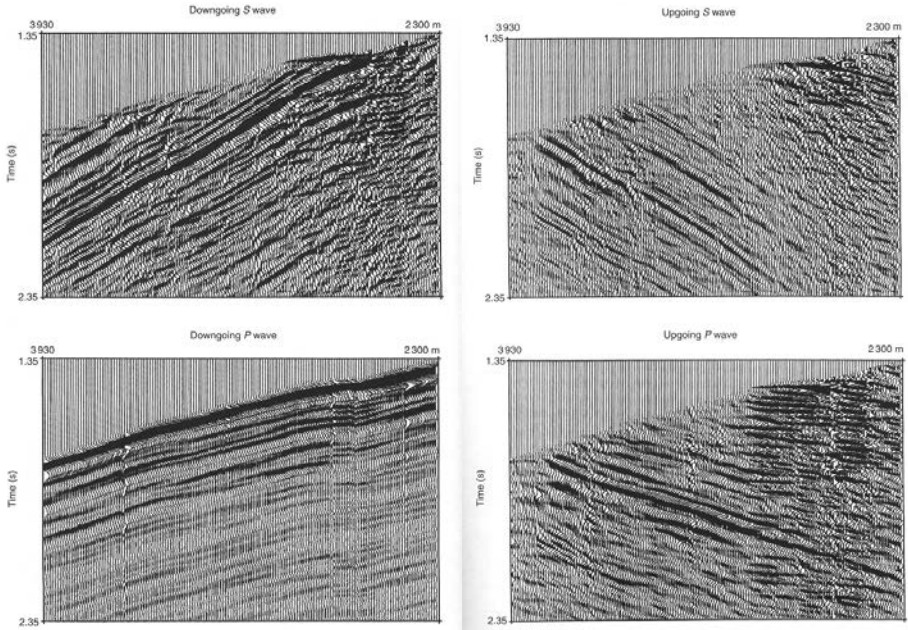
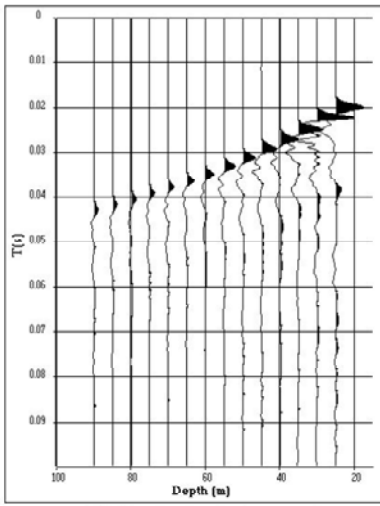


Figure 2.10 Séparation des ondes descendantes et montantes par filtre de polarisation (d'après Mars et al., 1999).

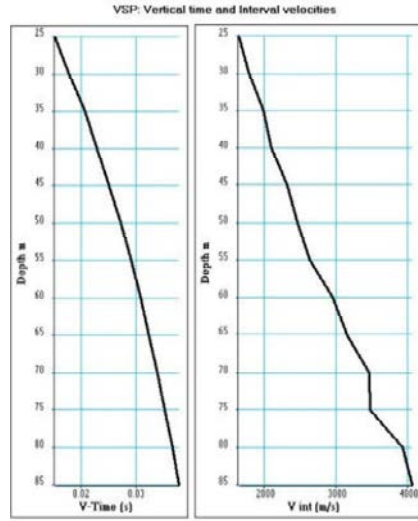
Les figures 2.11 et 2.12 montrent les résultats de traitement du PSV de proche surface, acquis dans l'intervalle de profondeur 25-90 m. La source est une chute de poids (voir figure 2.5), le capteur de puits est un géophone ancrable (voir figure 2.4a). La distance entre 2 points de mesure est de 5 m. La durée d'écoute est 250 ms. Le pas d'échantillonnage en temps est 0,25 ms.

La séquence de traitement appliquée est celle précédemment décrite. Les résultats de traitement sont présentés en figures 2.11 et 2.12. Les ondes montantes et descendantes ont été séparées par un filtre f-k. Un géophone de référence, planté proche de la tête de puits, a été utilisé pour contrôler la bonne répétitivité de la source en temps (fluctuation de TB) et en amplitude (énergie). Cette mesure est indispensable pour des mesures d'atténuation (figure 2.12c).



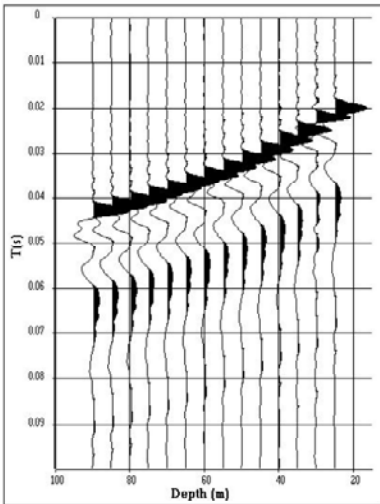
VSP : Raw data (vertical component)
document IFP School . J.L.M., 2015.

a



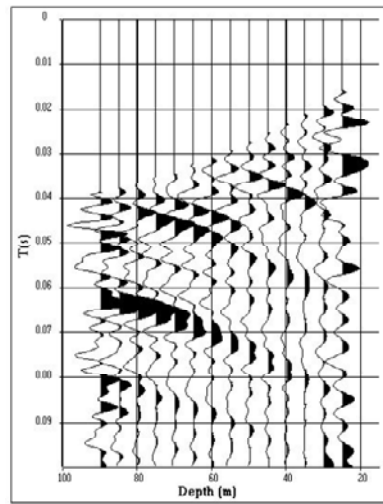
document IFP School , J.L.M., 2015.

b



VSP : Down going waves after amplitude recovery
document IFP School . J.L.M., 2015.

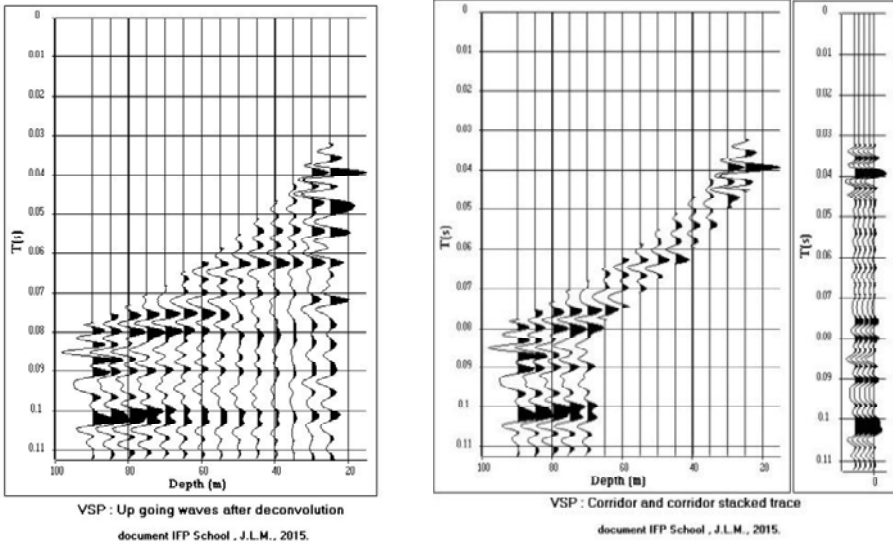
c



VSP : Up going waves after amplitude recovery
document IFP School . J.L.M., 2015.

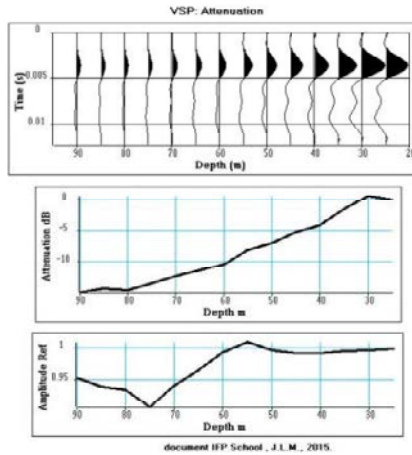
d

Figure 2.11 Traitement d'un PSV de proche surface. a : données brutes. b : temps vertical et vitesses d'intervalle. c : ondes descendantes. d : ondes montantes.



a

b



c

Figure 2.12 Traitement d'un PSV de proche surface. a : ondes montantes déconvoluées. b : couloir de sommation et trace somme. c : mesure d'atténuation (traces PSV, log d'atténuation, référence).

Après séparation des ondes, si émetteur et récepteur ne sont pas situés sur une même normale aux couches, la séquence de traitement qui aboutit à l'image sismique optimale pour l'interprétation géologique diffère. C'est le cas le plus général qui s'applique au PSV déporté, au PSV en puits dévié, à la ballade sismique et à la sismique de puits à puits. La séquence de traitement comprend :

- la déconvolution des ondes montantes. L'opérateur de déconvolution est unique. Il est extrait des traces de fond de puits et permet de s'affranchir du signal source ;
- la correction dynamique et la mise en temps double des ondes montantes déconvoluées. La correction dynamique a pour but de compenser l'obliquité induite par le déport de la source. Elle a pour objet de prendre en compte la géométrie d'acquisition. Pour cette correction, il est nécessaire de connaître le modèle de vitesse ;
- la migration : la méthode la plus couramment utilisée en PSV est celle proposée par Wyatt et Wyatt (1982). La section sismique PSV obtenue après migration est directement comparable à une section sismique réflexion de surface. La section PSV migrée a une investigation latérale de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.

L'exemple ci-après montre une section sismique obtenue à l'aide de données enregistrées dans un puits fortement dévié sur le champ de Wytch Farm, pour le compte de BP-Amoco et de ses partenaires.

Les données de puits ont été acquises dans le puits dévié F18 (qui atteint un maximum de déviation de $88,5^\circ$) avec une source vibratoire située à une distance de 1 865 m (Jerry's Point, JP) par rapport à la tête de puits. Les données ont été acquises en utilisant un géophone de puits à 3 composantes de type CSI (*Combinable Seismic Imager Tool* de la société Schlumberger). Le géophone de puits est équipé de capteurs de fréquence naturelle 10 Hz. Les filtres à l'acquisition sont un filtre coupe-bas à 2 Hz avec une pente de 6 dB/oct et un filtre coupe-haut à 330 Hz avec une pente de 30 dB/oct. Le signal vibratoire a été émis dans la bande passante 10-80 Hz. La durée du balayage en fréquence (*sweep*) est de 16 secondes.

Le modèle de vitesse utilisé pour traiter les données de sismique de puits a été créé en utilisant les informations fournies par la sismique de surface et les lois de vitesse déduites de l'ensemble des puits situés au voisinage du puits F18. Le modèle de vitesse a été affiné par inversion des temps pointés de premières arrivées en minimisant l'écart entre les temps mesurés et les temps calculés par l'algorithme d'inversion. L'écart entre les temps calculés et mesurés n'excède pas 3 ms. La figure 2.13 montre le modèle de vitesse, la trajectoire du puits, les différentes positions du géophone de puits, la localisation des points d'émission. Les tracés de rai montrent pour chaque point source le trajet suivi par l'onde descendante.

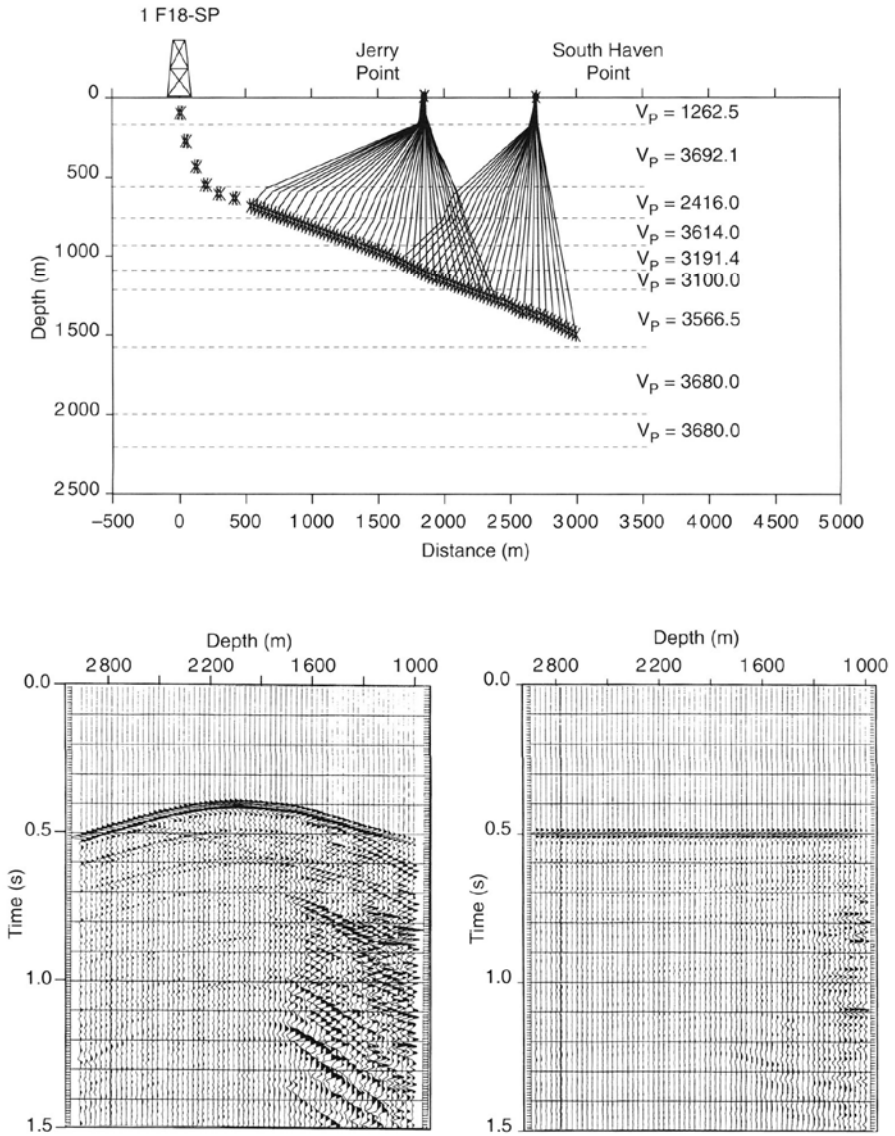


Figure 2.13 PSV en puits dévié (document : BP exploration). En haut : modèle de vitesse et trajectoire du puits. En bas : données PSV après récupération des amplitudes et ondes descendantes.

Les figures 2.13 à 2.15 décrivent la séquence de traitement appliquée aux données de puits obtenues avec la source localisée au point Jerry (JP). Les différentes phases de traitement sont :

- Filtrage en fréquence et récupération d'amplitude. Les données sismiques ont été filtrées dans la bande passante 5-80 Hz et compensées de l'effet de divergence sphérique par application d'une loi de gain. Chaque trace PSV a été ensuite normalisée sur l'arrivée directe pour compenser les pertes par transmission. Le résultat de ce pré-traitement est présenté en figure 2.13 (bas, gauche). L'axe horizontal de la section PSV représente la longueur de câble filé le long de la trajectoire du puits.
- Pointé des temps de première arrivée et séparation des ondes. La section PSV a été horizontalisée sur les temps pointés des premières arrivées. Un filtre médian à 7 termes a été appliqué aux données horizontalisées pour extraire les ondes descendantes (figure 2.13, bas, droite). La section en ondes descendantes a été soustraite aux données initiales. La section résidu a été corrigée des temps de premières arrivées pour ramener chaque trace PSV à son temps initial. La section PSV résidu (figure 2.14, haut, gauche) montre principalement les ondes montantes.
- Déconvolution. Une déconvolution de type Wiener-Levinson (Mari, 2015) a été appliquée aux ondes descendantes (figure 2.14, haut, droite) et aux ondes montantes (figure 2.14, bas, gauche). L'opérateur calculé sur le champ descendant dans le but de transformer l'ondelette descendante en un signal à phase nulle est appliqué sur les champs montant et descendant. Pour chaque cote PSV, un opérateur différent est calculé.
- Obtention de l'image sismique. L'image sismique est obtenue à partir de la section en ondes montantes déconvoluées. Cette opération est réalisée en quatre étapes :
 1. Calcul du modèle de vitesse.
 2. Corrections dynamiques et mise en temps double des ondes montantes (figure 2.14, bas, droite).
 3. Calcul des lignes d'égale abscisse X des points miroirs. La figure 2.15 (gauche) montre la répartition des lignes d'égale abscisse X (iso-X) sur la section présentée en figure 2.14 (bas, droite) après application d'une loi de gain. La distance entre deux lignes iso-X a été choisie à 25 m.
 4. Migration selon la méthode de Wyatt (1981). La section PSV migrée est présentée en figure 2.15 (droite). L'axe horizontal représente la distance horizontale entre le puits (abscisse 0 m) et les différents points miroir. La distance entre deux points miroir est de 25 m. L'investigation latérale de la section PSV est de l'ordre de 1 000 m. La section est rejouée en polarité normale selon la convention SEG. En polarité normale, une onde de compression montante réfléchiée par un réflecteur associé à une augmentation d'impédance acoustique est représentée par une valeur négative de l'amplitude (phase blanche).

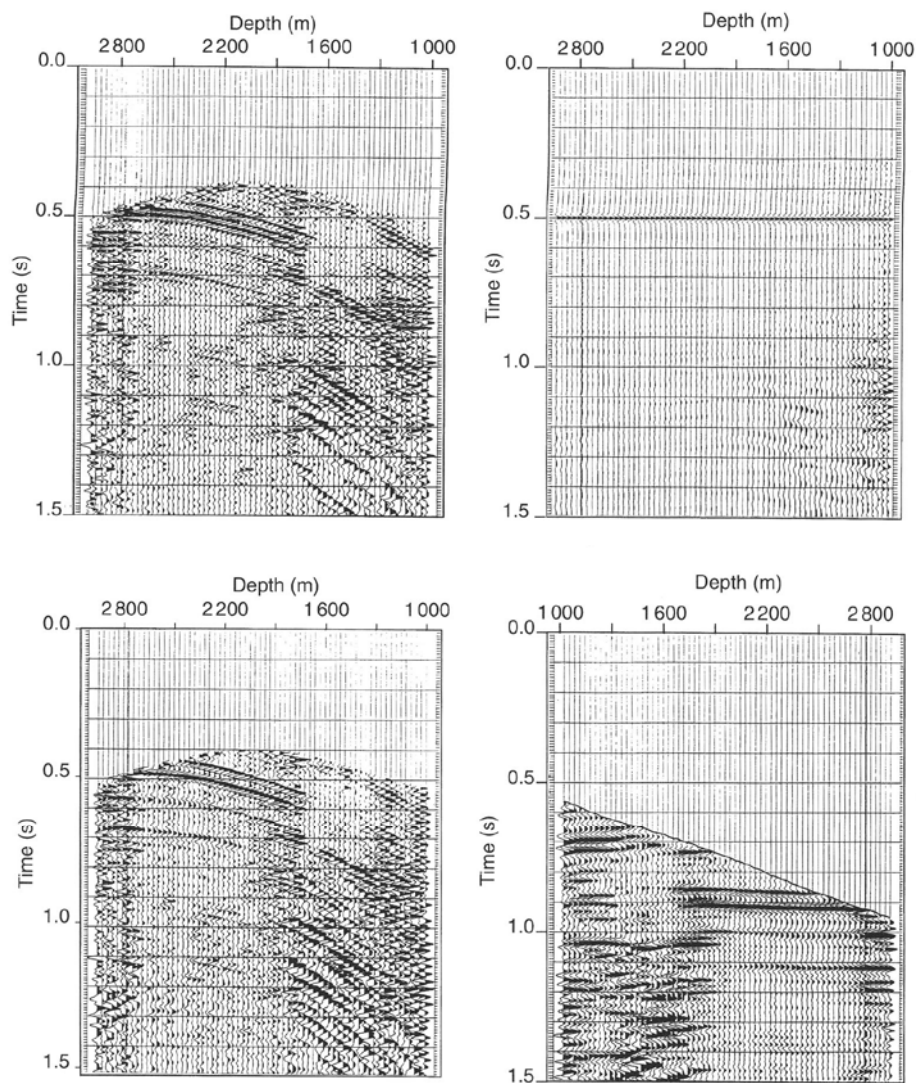


Figure 2.14 PSV en puits dévié (document : BP exploration). En haut : section PSV résidu et ondes descendantes déconvoluées. En bas : ondes montantes après déconvolution et après corrections dynamiques.

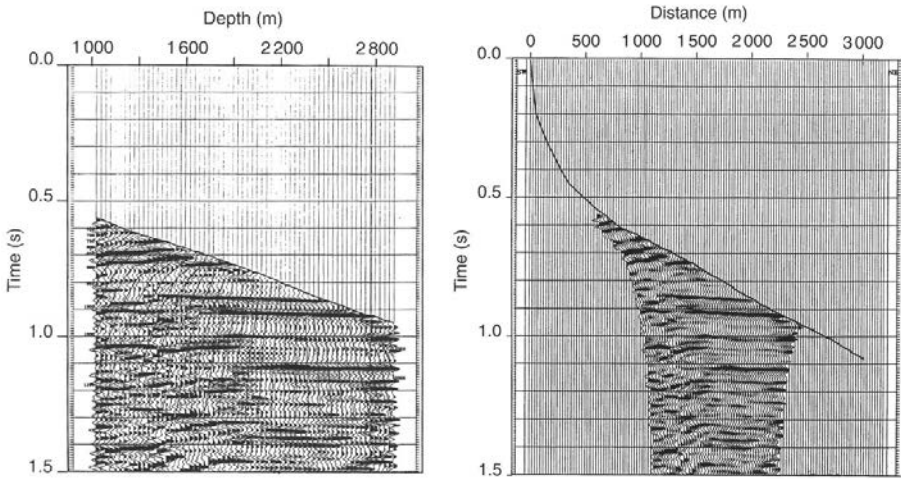


Figure 2.15 PSV en puits dévié (document : BP exploration). À gauche : ondes montantes après déconvolution de Wiener et corrections dynamiques. Lignes d'égal abscisse X (iso-X) présentées tous les 50 m. À droite : section migrée.

2.5 Application avec un jeu de données du domaine géotechnique

L'exemple suivant provient de la base des données de downholes d'EDF. Il s'agit du downhole de l'étude du chapitre 1 paragraphe 4, limité aux données P acquises avec des hydrophones (figure 2.16).

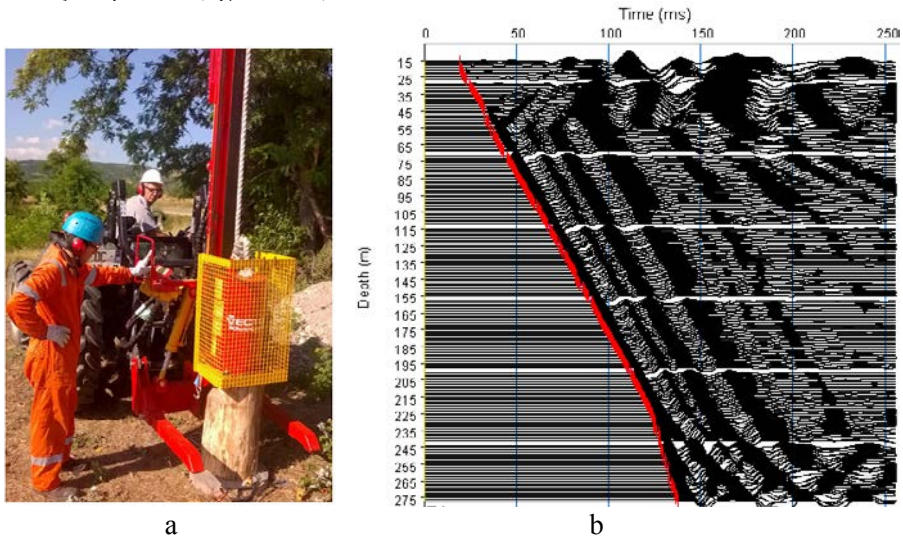


Figure 2.16 Source sismique FUGRO (a) et enregistrement du downhole (b) (document : EDF).

La géologie rencontrée dans ce forage peut se résumer de la façon suivante :

- 0-3 m : sable hors nappe ;
- 3-6 m : sable sous nappe ;
- 6-21,5 m : alluvions sablo-graveleuses ;
- 21,5 à 225 m : succession de bancs de sable fin, d'argile et de silt ; les bancs de sable dominant jusqu'à 41 m ;
- 225 à 280 m : schiste plus ou moins altéré.

IFP Énergies nouvelles a appliqué la séquence de traitement suivante :

- normalisation des traces ;
- déconvolution de type égalisation spectrale pour atténuer l'effet des ondes liées au casing et augmenter la résolution ;
- pointé des premières arrivées et calcul des vitesses ;
- séparation des ondes montantes et descendantes par un filtrage en nombre d'ondes ;
- déconvolution du champ montant ;
- mise à plat du champ montant par l'application de corrections statiques ;
- sommation des traces dans un couloir.

Le champ montant déconvolué (figure 2.17a) est décalé en temps par l'application d'une correction statique définie à chaque profondeur par le temps vertical pour mettre les événements associés à des réflecteurs subhorizontaux en temps double et ainsi permettre une comparaison directe avec une sismique de surface passant proche du forage (figure 2.17b). Les hyperboles de diffraction ne sont ni mises à plat ni focalisées dans cette phase de traitement, comme le montre l'événement diffractant oblique visible avant 250 ms sur la figure 2.17b.

Les ondes montantes déconvoluées par le champ descendant et mises à plat peuvent également contenir des multiples montants. De façon à annihiler les effets des multiples montants, on choisit un couloir de sommation étroit de façon à ne conserver que le signal réfléchi reçu immédiatement après la première arrivée. Les ondes montantes situées dans le couloir de sommation sont additionnées pour obtenir une trace somme sans multiple à phase nulle comparable à la trace sismique migrée de surface la plus proche du forage. Sur la figure 2.18, on constate également que l'événement diffractant avant 250 ms est éliminé par simple sommation sur la trace somme PSV.

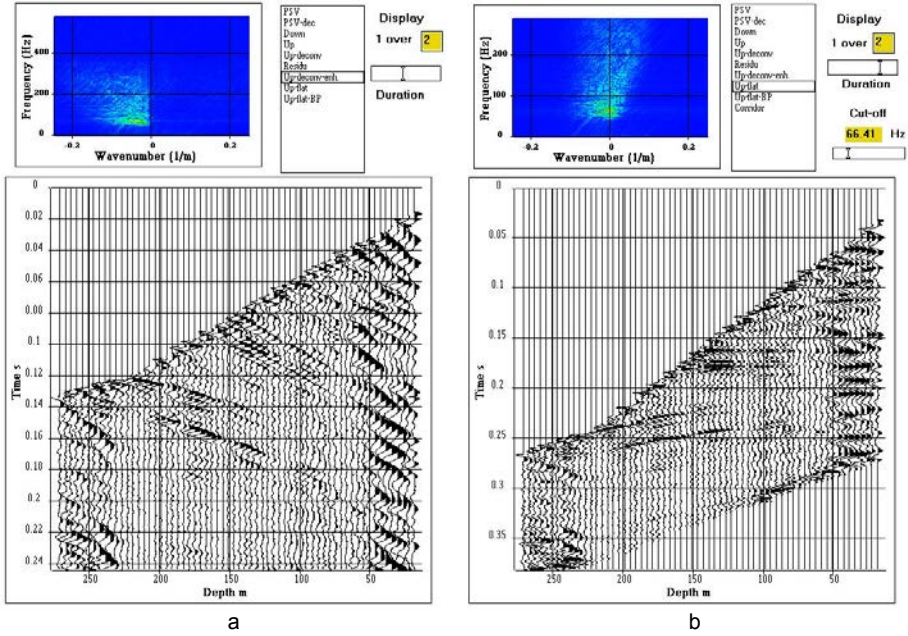


Figure 2.17 a : champ montant déconvolué (amélioration du rapport signal sur bruit).
 b : champ montant déconvolué mis à plat.

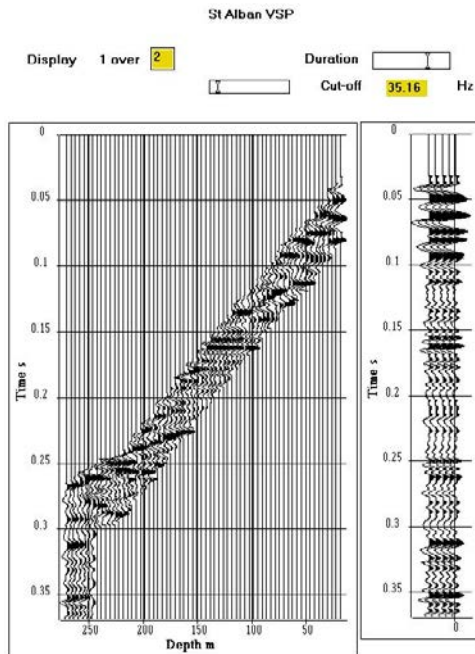


Figure 2.18 Couloir de sommation et trace somme PSV (35-190 Hz).

Les résultats obtenus montrent donc que si les données sont correctement échantillonnées, une séquence conventionnelle de traitement PSV peut être adaptée aux données d'un downhole. La trace somme PSV peut alors servir au calage d'un profil de sismique réflexion comme le montre la figure 2.19.

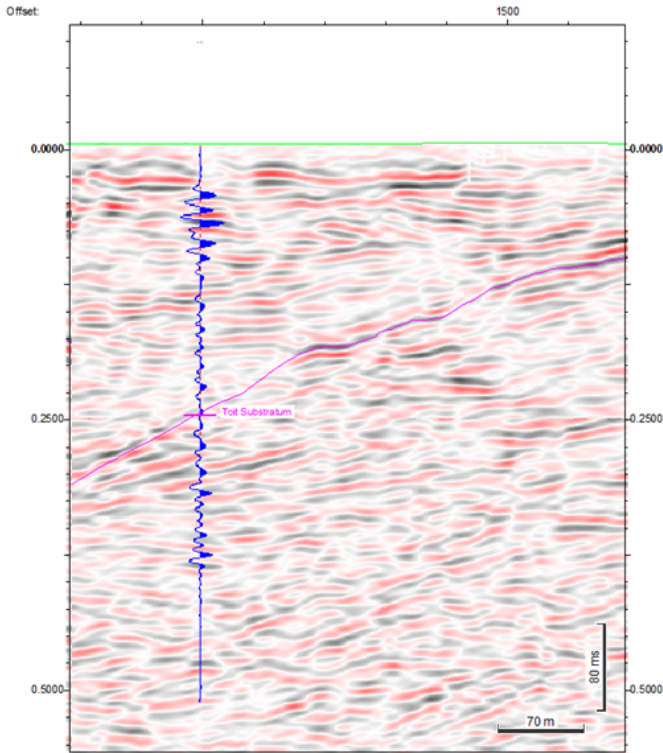


Figure 2.19 Calage d'une section sismique THR sur la trace somme downhole (document : EDF).

2.6 Conclusion

Les principales applications de la sismique de puits sont :

- Établir la relation temps-profondeur à la position puits.
- Établir un modèle de vitesse (P et/ou S).
- Caler les profils de sismique réfraction.
- Valider les corrections statiques.

- Fournir une image de détail au voisinage du puits (en prenant en compte le déport de la source).
- Caler en profondeur les profils de sismique réflexion.
- Identifier les réflexions primaires et multiples.
- Fournir une information structurale, estimer le pendage des réflecteurs (enregistrement 3 composantes).
- Localiser les zones de fractures (mesures avec hydrophone) et les plans de failles (capteur 3C orienté).
- Prédire la présence de réflecteurs ou de zones d'anomalie (sous compaction par exemple) à l'avant du forage, c'est-à-dire sous le puits pour un forage vertical et à l'avant du front de taille d'un tunnel pour un forage horizontal.

Il faut aussi prendre en considération les éléments suivants :

- La principale limitation est l'investigation latérale autour du puits. En PSV classique, avec un déport de la source de quelques mètres, elle est limitée entre la résolution verticale (quart de longueur d'onde) et une dizaine de mètres.
- Un mauvais couplage de la sonde à la formation entraîne la présence de bruits parasites, en particulier pour les composantes horizontales du capteur de puits.
- La force d'ancrage de capteur de puits peut être insuffisante en cas de puits de diamètre trop important, entraînant un mauvais couplage.
- Les conditions de puits, en cas de puits tubé mal cimenté, peuvent rendre les mesures difficiles. Un bon couplage du capteur de puits au casing ne garantit pas un bon couplage du capteur à la formation. Il est alors nécessaire de faire un log de cimentation avant d'acquérir un PSV.
- La présence d'ondes guidées (modes de Stoneley) peut être nuisible à l'extraction et l'analyse des ondes de volume (principalement pour des acquisitions avec des hydrophones).
- L'acquisition est sensible aux vibrations industrielles, humaines et naturelles. Il est important d'éviter les transmissions par le câble en donnant du mou au câble lors des mesures.
- La durée d'acquisition peut être estimée à 5 à 10 min/cote, pour un PSV classique.

Le PSV déporté et la ballade sismique permettent une extension de l'investigation latérale variable avec la profondeur et fournissent une sismique de détail au voisinage de l'objectif étudié.

Si l'investigation latérale de la sismique de puits est de toute façon limitée, le fait d'avoir des récepteurs proches des objectifs permet une bonne résolution verticale, due principalement au fait que la zone altérée de surface n'est traversée qu'une fois.

Références

- Hardage B.A., 1985, *Vertical seismic profiling, Part A: principles*. Geophysical Press, London.
- Hardage B.A., 1985, *Vertical seismic profiling, Part B: advanced concepts*. Geophysical Press, London.
- Hardage B.A., 1992, *Cross well Seismology and Reverse VSP*. Geophysical Press, London.
- Huang C.F., Hunter J.A., 1981, The correlation of tube wave events with open fractures in fluid filled boreholes: current research, Part A, *Geological Survey of Canada*, paper 81-1A, 361-376.
- Mari J.L., 1989, Q-log determination on downgoing wavelets and tube wave analysis in vertical seismic profiles. *Geophysical Prospecting*, 37, 257-277.
- Mari J.L, Arens G., Chapellier D., Gaudiani P., 1998, *Géophysique de gisement et de génie civil*. Éditions Technip, Paris.
- Mari J.L., Coppens F., 2000, *La sismique de puits*. Éditions Technip, Paris.
- Mari J.L., 2015, Signal processing for geologists & geophysicists, e-book, DOI:10.2516/ifpen/2011002, <http://books.ifpenouvelles.fr/ebooks/signal-processing/>
- Mars J., Glangeaud F., Boelle J.L., Vanpe J.M., 1999, Wave separation by an oblique polarization filter, PSIPP'99. First international symposium on Physics in Signal and Image Processing, 18-19 January 1999, Paris, France, 94-108.
- Wyatt K.D., Wyatt S.B., 1982, Determination of subsurface structural information using the vertical seismic profile. *Geophysics*, 47,7, 1123-1128.