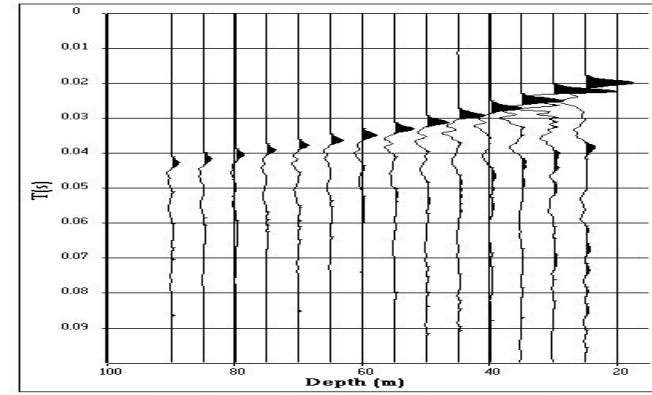


Principe de la méthode

- La sismique de puits, dont la mise en œuvre la plus couramment utilisée est celle du Profil Sismique Vertical ou PSV, 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 être sur la même verticale.
- 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 et se propageant à incidence normale est utilisée pour fournir une distribution de vitesse dans le sous-sol.
- 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)



PSV : Données brutes
(Document IFP School)

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

Moyens nécessaires

- Equipements :
 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.
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. 2 opérateurs qualifiés pour la mise en œuvre (source, treuil, acquisition).
 2. 1 géophysicien (Chef de Mission) qualifié pour le contrôle qualité des données à l'acquisition et qui peut être aussi opérateur.

Sources sismiques : Canon (à gauche), chute de poids (à droite) (Document APEC)



Mise en œuvre sur le terrain

• Déroulement d'une opération de PSV classique en puits vertical :

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

• Sondes de puits :

- La sonde de puits est soit une sonde mono-capteur, soit une sonde multi-capteur. Le capteur peut être un géophone à une composante (géophone vertical) ou un géophone à 3 composantes (une composante verticale et 2 composantes horizontales orthogonales). Le capteur peut être un hydrophone.
- Le capteur peut être à 4 composantes : géophone 3 composantes + 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.

• 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 marteau (pratique mais de faible énergie) et la chute de poids (bon compromis énergie/encombrement) sont les plus utilisées. Ces sources émettent principalement des ondes de volume de type ondes de compression. On peut également utiliser un mini-vibrateur. Pour émettre des ondes S, on peut utiliser un marteau avec frappes latérales sur une cible ancrée au sol.

• 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 2 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, soit : $\Delta z \leq V_{\min} / 2F_{\max}$.

En pratique, les distances verticales sont choisies entre 2m et 5m en géotechnique.



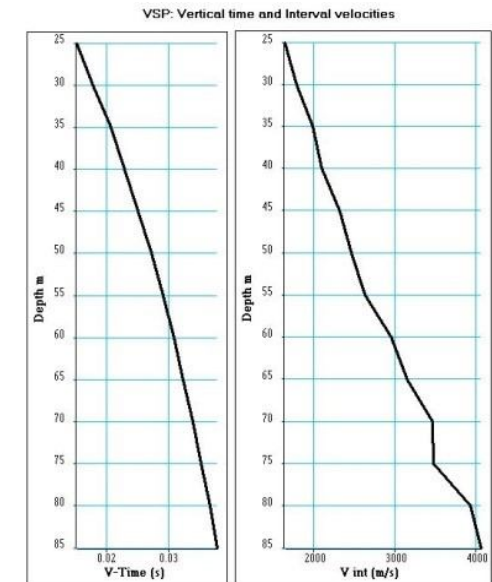
Hydrophone pour borehole
(Document IFPEN)



Flûte d'hydrophones pour borehole
(Document IFPEN)



Hydrophone pour borehole(3 composantes)
(Document IFPEN)



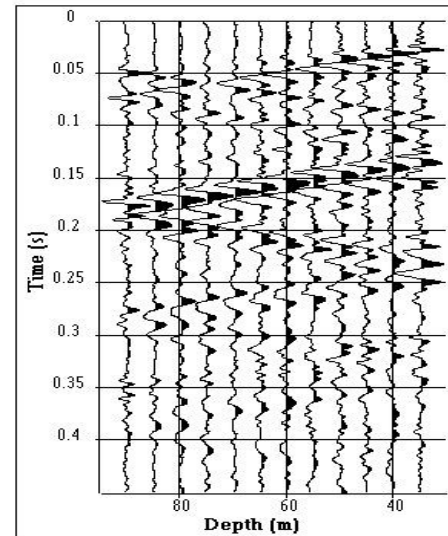
document IFP School, J.L.M., 2015.

PSV : Temps verticaux et vitesses d'intervalles
(Document IFP School)

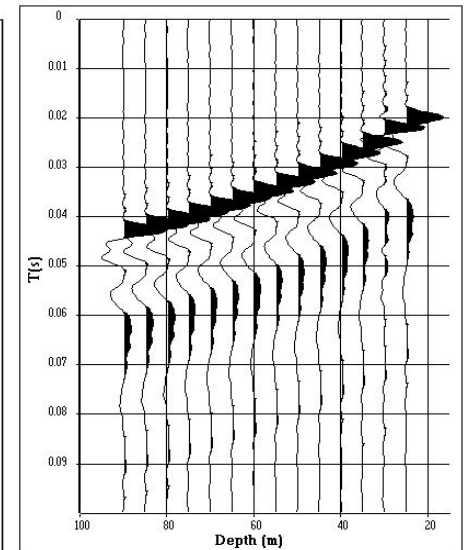
- Autres types de mise en œuvre

Si le puits est dévié, un PSV peut être obtenu en déplaçant horizontalement la source de façon à maintenir émetteur et récepteur sur la même verticale en tenant compte de la trajectoire de puits. Il est indispensable d'effectuer une trajectométrie de puits au préalable. Il existe d'autres mises en œuvre de la sismique de puits telles que le profil sismique vertical déporté, obtenu en augmentant la distance séparant la position de la source et de la tête de puits. Un ensemble de PSV déportés forme une « ballade sismique » ou « walkaway », la source occupant successivement plusieurs positions correspondant à des déports croissants par rapport à la tête de puits. Ces mises en œuvre permettent d'augmenter l'investigation latérale du PSV.

- 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 bouteux professionnels.
- Contrôle Qualité : Après chaque cote, l'opérateur contrôle la qualité des enregistrements (capteurs de puits et de surface, le niveau de bruit, le bon couplage du capteur de puits, ...).
- Production : En moyenne, pour un PSV standard : 5 mn/cote, soit pour un forage de 100 m, avec une prise de mesure tous les 5 m, environ 2 h



VSP with an hydrophone
Enregistrement PSV avec un hydrophone
(Document IFP School)



VSP : Down going waves after amplitude recovery
PSV : Ondes descendantes après correction d'amplitude (Document IFP School)

Ondes sismiques et séquence de traitement

- 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.

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

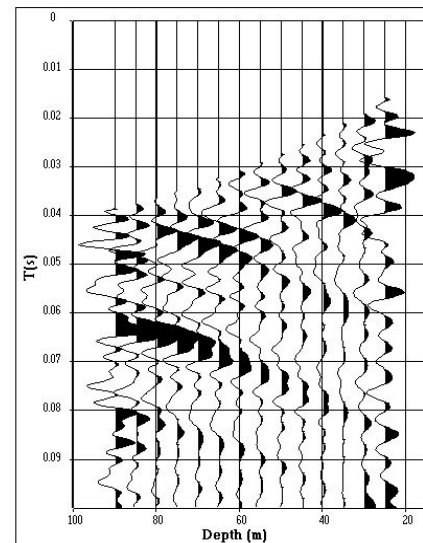
Les ondes descendantes ont des vitesses apparentes positives, les ondes montantes des vitesses apparentes négatives.

- Séquence de traitement

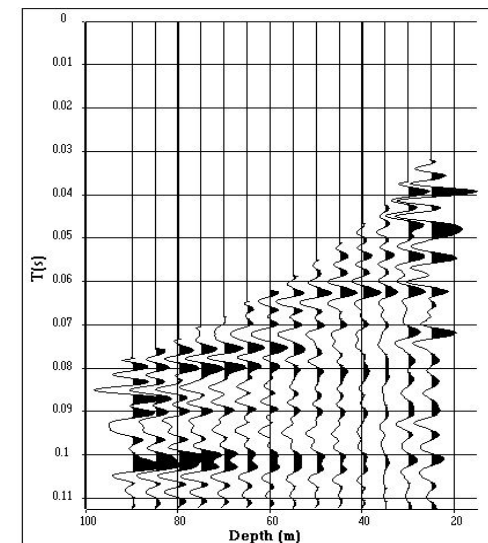
Le traitement classique d'un PSV permet d'obtenir la relation temps-profondeur et les logs de vitesse au puits ainsi que la trace somme PSV comparable à une trace sismique très haute résolution, sans multiples.

La séquence de traitement comprend :

1. Edition (élimination des enregistrements de mauvaise qualité).
2. Corrélation 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. Somme 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, et 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.



VSP : Up going waves after amplitude recovery
PSV : Ondes montantes après correction d'amplitude
(Document IFP School)



VSP : Up going waves after deconvolution
PSV : Ondes montantes après déconvolution
(Document IFP School)

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).

● **Production**

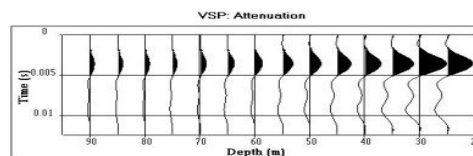
On compte un jour de traitement pour 1 PSV standard à 100 m (composante verticale du capteur de puits), hors écriture du rapport.

Résultats et livrables

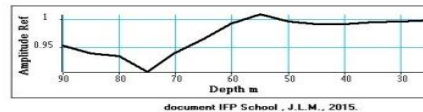
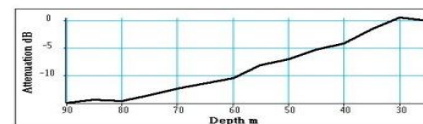
- Relation temps - profondeur.
- Logs de vitesse : vitesse d'intervalle, vitesse moyenne, vitesse RMS (ondes P ou/et S).
- En option : logs d'amplitude des ondes de volume et des ondes guidées.
- Sections PSV associées aux étapes de traitement notées 5, et 7 à 10 dans la séquence de traitement ci-dessus. Ces sections peuvent uniquement être imprimées dans le rapport de traitement. Elles peuvent aussi être transférées en format sismique à la demande du client.
- Rapport de mise en œuvre et de traitement.
- Les données de terrain sont fournies au format standard SEG2, les résultats de traitement au format SEG2 ou SEGY, les logs sismiques (temps mesurés, temps verticalisés, logs de vitesse,...) au format ASCII.

Applications

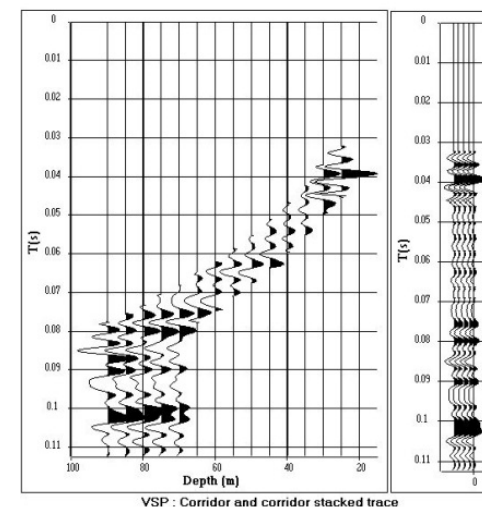
- Etablir la relation temps - profondeur à la position puits.
- Etablir un modèle de vitesse (P et/ou S).
- Caler les profils de sismique réfraction.
- Valider les corrections statiques.
- Fournir une image de détail au voisinage du puits (en prenant en compte le déport de la source).
- Caler en profondeur 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 plans de failles.
- Prédire la présence de réflecteurs ou de zones anormales (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).
- Estimer les paramètres mécaniques (vitesse, coefficient de poisson, modules, atténuation, ...) aux fréquences sismiques.
- Caler les mesures soniques (méthodes Block Shift et Δt minimum).



PSV : Atténuation (Document IFP School)



PSV : Trace sommée dans un couloir de sommation (Document IFP School)



Limitations / Contraintes

- 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.

Dialogue donneur d'ordre / prestataire

- A la charge du donneur d'ordre
 - Cahier des charges détaillé avec objectifs clairs
 - Documents relatifs au puits (trou tubé, ouvert, cimenté, déviation,...)
 - Informations concernant les accès et la sécurité du site, et les autorisations administratives
 - Documents relatifs à d'éventuelles investigations antérieures
- A la charge du prestataire
 - Proposition explicite : Justification de la méthode proposée, adaptation à l'objectif, description des avantages et limitations, facteurs d'influence et/ou non maîtrisable, précision des mesures et résultats finaux réalistes.
 - Rapport d'étude de qualité professionnelle : Rappel des objectifs, méthodologies appliquées, discussion des résultats, conclusions et recommandations.

Pour aller plus loin

- **1998**, Mari J. L., Arens G., Chapellier D. & Gaudiani P., Géophysique de gisement et de génie civil, chapitre 6: la sismique de puits, Editions Technip, Paris, ISBN 2-7108-0727-0
- **2000**, Mari J. L. & Coppens F., Sismique de puits, Editions Technip, Paris, ISBN 2-7108-0780-7, ISSN 0768-147X
- **2015**, Mari J.L., Signal processing for geologists & geophysicists, e-book, DOI:10.2516/ifpen/2011002 <http://books.ifpenergiesnouvelles.fr/ebooks/signal-processing/>