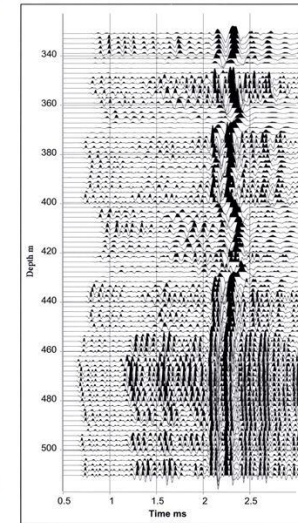


Principe de la méthode

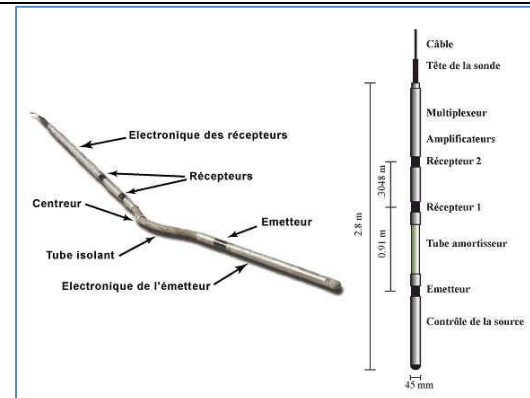
- La diagraphie acoustique est une diagraphie visant à mesurer la vitesse de propagation du son dans les formations géologiques, en utilisant un outil de puits composé d'un système émetteur et d'un système récepteur. À l'origine, cette mesure, appelée sonique (sonic log) était essentiellement destinée à mesurer l'intervalle (Δt) des temps d'arrivée de la première onde de compression, au niveau de deux récepteurs, distants de 25 à 50 centimètres, l'énergie étant émise par un émetteur situé à environ 1 mètre du premier récepteur. On obtient une courbe de lenteur ($1/V$) de laquelle est déduite la vitesse de propagation de l'onde sonique réfractée (15 à 30 kHz) dans les formations. Dans ce cas, on ne prend en compte que le point de la première arrivée de l'onde de compression (P) des milieux traversés.
- La diagraphie acoustique repose sur l'analyse et le traitement des différents trains d'onde (ondes réfractées, ondes guidées, ondes réfléchies) enregistrés par l'outil acoustique.
- Les enregistrements du champ d'ondes total permettent de déterminer les vitesses de propagation des différentes ondes et certains paramètres pétrophysiques, et d'obtenir des informations lithologiques et mécaniques.
- Le puits peut être un trou ouvert, un trou tubé (acier et/ou PVC), un trou tubé cimenté. Dans ce dernier cas, la diagraphie acoustique est utilisée pour faire un contrôle de cimentation et pour déterminer les paramètres caractéristiques des formations (vitesses, ..).



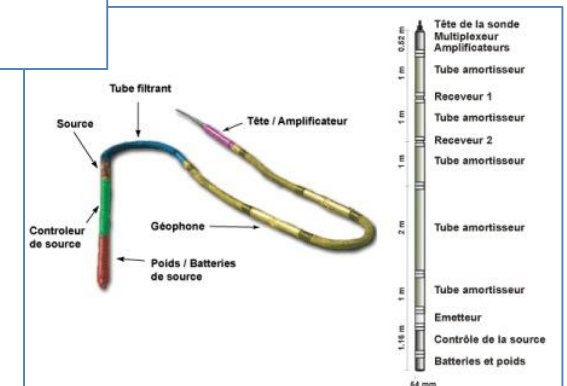
Outil et section acoustique iso-déport 3m.
(Document Mari et al. 2011)

Moyens nécessaires

- Equipements :
 1. une unité de diagraphie comprenant : un certain nombre de sondes, un treuil sur lequel s'enroule un câble de plusieurs centaines de mètres auquel sont connectées les sondes, une unité d'enregistrement et de numérisation (la numérisation pouvant être faite au niveau des sondes), un système de visualisation et d'impression des enregistrements terrain, un système de mesure de la cote profondur ;
 2. une ou plusieurs sondes acoustiques ;
 3. une source sismique (chute de poids), si opération PSV est prévue avec la diagraphie acoustique ;
 4. un système de levage avec poulies pour la descente des sondes de diagraphie (et de PSV) ;
 5. Les équipements sont vérifiés (maintenance, étalonnage) périodiquement.
- Véhicules :
 1. soit : une unité de logging (de préférence tout-terrains/tout-chemins), permettant le transport du personnel et des équipements (sondes de diagraphies et sonde PSV en option, etc.)
 2. soit : une unité de logging et un véhicule ou une remorque permettant le transport de la source PSV (si une opération PSV est prévue avec la diagraphie acoustique).
- Personnel et compétences :
 1. deux opérateurs qualifiés pour la mise en œuvre (treuil, descente des sondes de diagraphie, acquisition) ;
 2. un géophysicien (chef de mission) qualifié pour le contrôle qualité des données à l'acquisition et qui peut être aussi opérateur.



Monopole Acoustic tool
(Mount Soppris document)



Monopole -Dipole Acoustic tool : PSV logging
(Oyo document)

Mise en œuvre sur le terrain

• Déroulement d'une opération de Diagraphie Acoustique en puits vertical :

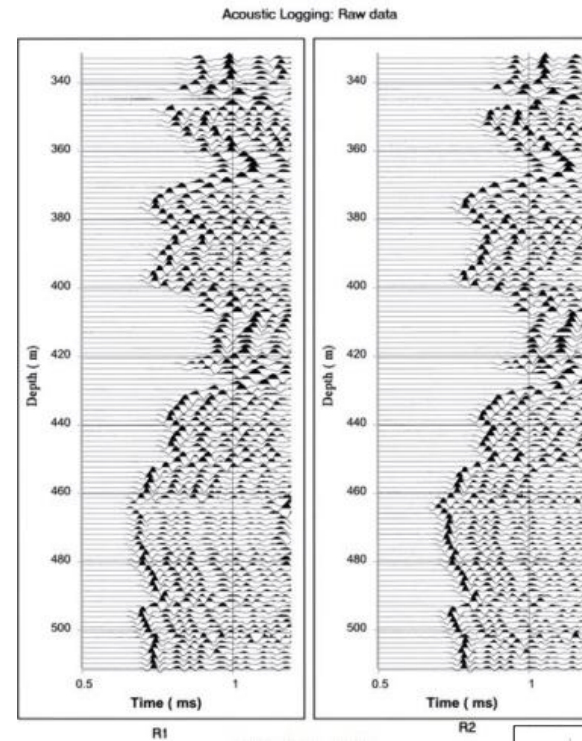
En puits vertical, on fait l'hypothèse de symétrie cylindrique des formations géologiques par rapport à l'axe du puits. Pour cette mesure, le trou doit être en eau (boue de forage). La sonde acoustique est descendue centrée, par des centreurs. Il est recommandé de faire au préalable une mesure des diamètres du forage (diamètreur).

Après avoir effectué le calage du zéro (référence sonde) à un plan de référence (radier, table de rotation, etc.) ou au sol, la sonde est descendue à une profondeur donnée choisie par l'opérateur pour faire des mesures en stationnaire. Ces mesures permettent de vérifier la qualité des enregistrements acoustiques, le bon fonctionnement de l'outil, la répétitivité des mesures, d'évaluer le rapport signal sur bruit et de régler certains paramètres d'acquisition (gains, etc.). L'outil est ensuite descendu en fond de puits. Une acquisition de contrôle peut être faite à la descente, pour s'assurer qu'il n'y aura pas de saturation à l'acquisition. L'opération de mesure est ensuite faite à la remontée à vitesse constante en fonction du pas d'échantillonnage en profondeur. Une vitesse de remontée de 4 à 6 m/mn est classique.

• Sondes acoustiques :

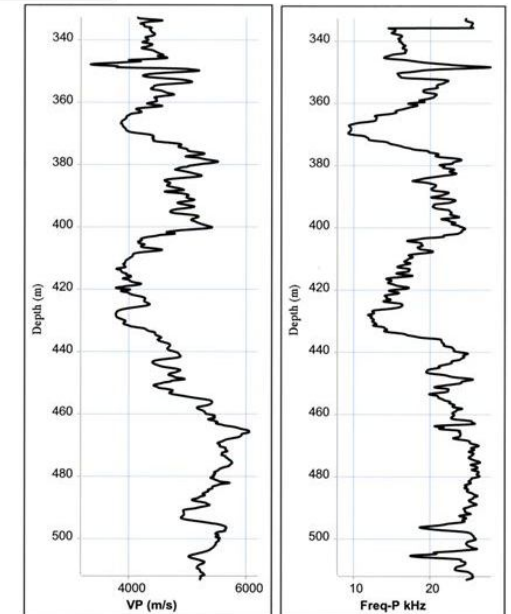
Les outils utilisés sont des outils de type monopôle ou dipôle. Les outils monopôles sont les plus utilisés. Les émetteurs et récepteurs sont multidirectionnels. Les émetteurs génèrent dans le fluide une onde de compression qui donne naissance dans la formation à une onde de compression (onde P) et une onde de cisaillement (onde S) aux angles limites de la réfraction. Les outils acoustiques de type dipôle sont utilisés pour accéder aux paramètres S des formations lentes et sont équipés d'émetteurs et de récepteurs polarisés. De tels outils génèrent des ondes de compression polarisées perpendiculairement à l'axe du puits. Ces ondes de compression créent à la paroi du puits des modes de flexure qui donnent naissance dans la formation à des pseudo-ondes de cisaillement se propageant parallèlement à l'axe du puits. Un outil acoustique est caractérisé par :

- le type de fonctionnement :
 - monopôle : fréquence d'émission 10-40 kHz
 - dipôle : fréquence d'émission 1-3 kHz
- le type d'émetteur et de récepteur :
 - magnétostrictif
 - piézo-électrique
- le nombre d'émetteurs et de récepteurs :
 - classique avec un ou deux émetteurs et deux récepteurs
 - 1 à 4 émetteurs et une antenne réceptrice avec de quatre à huit récepteurs
- l'écartement entre récepteurs : de dix à cinquante centimètres
- le déport de la source par rapport au premier récepteur : de un à cinq mètres
- les caractéristiques mécaniques :
 - ossature rigide ouvragée
 - ossature souple.
- le pas d'échantillonnage en temps :
 - 5 ou 10 μ s pour un outil monopôle
 - 20 μ s pour un outil dipôle
- la durée d'écoute :
 - 2 ou 5 ms pour l'analyse des ondes réfractées
 - 10 ms ou plus pour l'analyse des ondes réfléchies



Enregistrements acoustiques sur 2 récepteurs
séparés de 25 cm
(Document Mari et al. 2011)

Logs de vitesse de compression et de
fréquence (Document Mari et al. 2011)



• Paramètres d'acquisition et visualisation :

L'enregistrement acoustique peut être visualisé sous forme de sections acoustiques à déport constant (iso-déport), le déport étant la distance séparant l'émetteur d'un récepteur. Chaque section iso-déport est un enregistrement à deux dimensions (temps : axe vertical - profondeur ou longueur filée : axe horizontal, ou inversement). Le pas d'échantillonnage en profondeur doit être choisi pour éviter le phénomène d'aliasing spatial sur les sections iso-déport en vue d'un traitement ultérieur des données acoustiques. En pratique, le pas d'échantillonnage en profondeur est choisi égal à une fraction de la distance séparant 2 récepteurs de l'outil soit entre 5 et 15 cm en géotechnique.

Les gains d'acquisition doivent être choisis pour éviter toute saturation, notamment pour les modes guidés. Cependant, si l'acquisition est faite pour obtenir un log de vitesse en onde P, on peut choisir des gains pour amplifier les ondes de compression de façon à faciliter le pointé de temps de première arrivée (pointé par seuil), quitte à saturer les modes guidés et faire un second run pour acquérir les modes guidés en amplitude préservée.

• Diagraphie acoustique en puits dévié :

Si le puits est dévié, les ondes réfléchies aux limites des couches traversées par le forage sont enregistrées par l'outil acoustique. Ces ondes pourront être exploitées et traitées pour fournir une micro-sismique de détail au voisinage du puits.

• Sécurité :

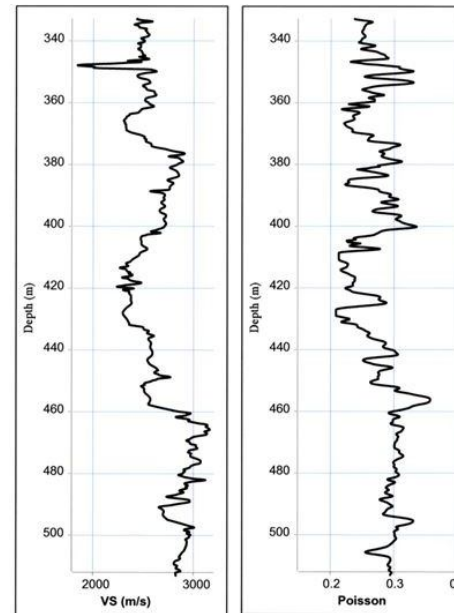
La sécurité du chantier doit être assurée par le Chef de Mission, **en accord avec le Système Qualité du prestataire**. Les accès à la zone de mesures sont sécurisés.

• Contrôle Qualité :

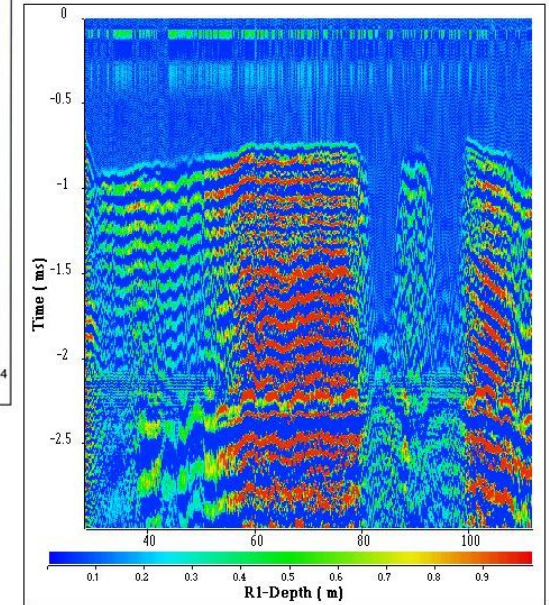
Lors de la remontée de la sonde acoustique, l'opérateur contrôle la qualité des enregistrements sur les différents récepteurs de la sonde acoustique, notamment le niveau de bruit. En zone bruitée, il peut être utile de réduire la vitesse de remontée, le pas d'échantillonnage en profondeur devant resté constant.

• Production :

En moyenne, pour une diagraphie acoustique, la vitesse de logging est de 4 à 6 m/mn. Cette diagraphie est rarement effectuée seule. Elle s'inscrit dans un ensemble de mesures obtenues dans plusieurs runs.



Logs de vitesse de cisaillement et coefficient de Poisson (Document Mari et al. 2011)



Section acoustique iso-déport 3m (Document IFP School J.L.M.2015)

Ondes acoustiques et séquence de traitement

• Ondes acoustiques :

Dans un puits vertical, les outils monopôles permettent d'enregistrer cinq modes de propagation :

- l'onde de compression réfractée ;
- l'onde de cisaillement réfractée, uniquement en formation rapide ($VS > V$ fluide) ;
- l'onde de fluide ;
- deux modes guidés dispersifs qui sont les ondes de pseudo-Rayleigh et les ondes de Stoneley :

- les ondes de pseudo-Rayleigh sont des ondes coniques réfléchies (Biot, 1952) dispersives, dont les vitesses de phase et de groupe approchent aux basses fréquences (< 5 kHz), la vitesse S de la formation, et asymptotiquement aux hautes fréquences (> 25 kHz), la vitesse de propagation de l'onde de compression dans le fluide.

Ces ondes n'existent qu'en formations rapides.

- les ondes de Stoneley sont des ondes dispersives d'interface qui, en formation rapide, ont des vitesses de phase et de groupe qui approchent asymptotiquement et par valeur inférieure aux hautes fréquences la vitesse du fluide et qui, en formation lente, sont plus dispersives et plus sensibles aux paramètres des ondes S de la formation. Aux basses fréquences, les ondes de Stoneley sont analogues aux ondes de tube observées en PSV.

• **Séquence de traitement :**

Le traitement classique d'une diagraphie acoustique permet d'obtenir la relation temps-profondeur et les logs de vitesse au puits et certains paramètres mécaniques tels que le coefficient de Poisson.

La séquence de traitement comprend :

1. édition (élimination des enregistrements de mauvaise qualité) ;
2. calcul des vitesses acoustiques par pointé des temps d'arrivées des différents trains d'onde ou par balayage en vitesse et semblance ;
3. contrôle qualité des vitesses (mesure du coefficient de corrélation) et des pointés (par exemple par mise à plat du train d'onde par application de corrections statiques égales aux temps pointés).

Remarques

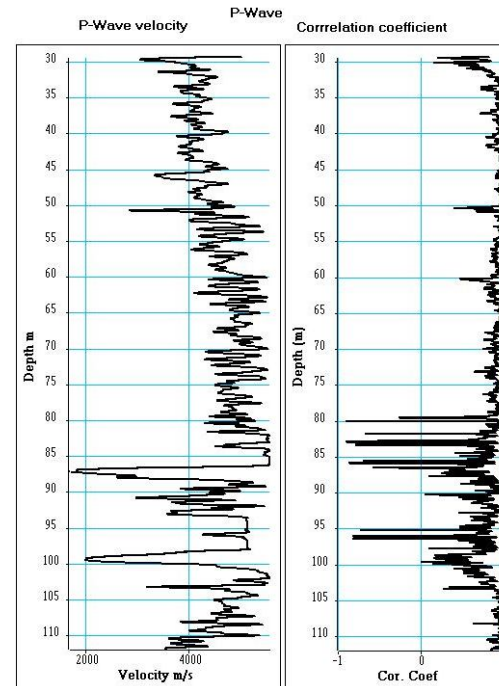
- si pointé par seuil, détection des pointés erronés (spikes et sauts de cycle) et édition des logs de vitesse. Cette technique est uniquement applicable aux ondes de compression.

- si les vitesses sont mesurées par semblance, il est recommandé d'utiliser un outil avec déport important entre l'émetteur et le premier récepteur (de l'ordre de 2 à 3 m) et ayant au minimum 4 récepteurs. La mesure est facilitée si les trains d'ondes sont bien séparés en temps.

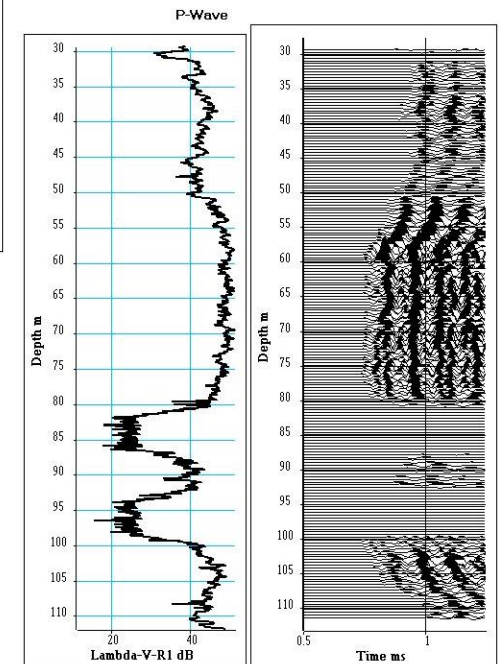
4. en option, mesure des amplitudes des différents trains d'onde et calcul des logs d'amplitude et atténuation ;
5. en option, mesure des fréquences des différents trains d'onde et calcul des logs de fréquence (atténuation, résolution,..) ;
6. en option, calcul de la porosité acoustique (formule de Wyllie) ;
7. en option, calcul de films synthétiques. Il est recommandé d'effectuer le calage (méthodes Block shift et Δt minimum) des mesures acoustiques Δt sur les mesures PSV ;
8. en option, calcul des modules élastiques (géo-mécanique : choix des modèles utilisés).

Production

On compte un à plusieurs jours (voire semaines : un traitement de micro-sismique est équivalent à un traitement de sismique réflexion) de traitement en fonction des options demandées. Si le traitement demandé est uniquement le log de vitesse P, pointé par seuil, il peut être obtenu en temps réel sur le terrain. L'écriture du rapport peut prendre quelques jours.



Log de vitesse (ondes) et log de corrélation. Les faibles valeurs de vitesse et du coefficient de corrélation indiquent la présence de niveaux karstiques (Document IFP School J.L.M.2015)



Log d'amplitude des ondes P. Les très faibles amplitudes indiquent la présence de niveaux karstiques. (Document IFP School J.L.M.2015)

Résultats et livrables

- Logs de lenteur ou de vitesse (vitesse d'intervalle) des ondes réfractées (P ou/et S) et des ondes guidées (Stoneley) ;
- Relation temps - profondeur ;
- En option : logs d'amplitude et de fréquence des ondes de volume et des ondes guidées ;
- Sections acoustiques iso-déport brutes et après traitement. 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 des sections iso-déports au format SEG2 ou SEG-Y, les logs acoustiques (logs de lenteur ou de vitesse, logs de fréquence, logs d'amplitude, paramètres mécaniques, ..) au format ASCII.

Applications

Par rapport aux autres diagraphies, la diagraphie acoustique a une résolution verticale équivalente mais un rapport investigation latérale sur résolution verticale très nettement supérieur. La diagraphie acoustique a une investigation latérale de quelques centimètres pour les modes d'interface, décimétrique à métrique pour les modes rétractés, et de quelques mètres à la dizaine de mètres pour les modes réfléchis.

La diagraphie acoustique est principalement utilisée pour :

- mesurer les vitesses des formations (en compression et cisaillement) et calculer les modules d'élasticité (mesure dynamique 2-40 kHz) ;
- établir la relation temps-profondeur très haute résolution par intégration de la courbe des lenteurs (inverse de la vitesse) ;
- réaliser des films synthétiques pour caler la sismique réflexion de surface ;
- mesurer l'atténuation et l'anisotropie (mode dipôle) d'une formation ;
- identifier la lithologie en combinaison avec d'autres diagraphies ;
- étudier la fracturation et détecter des hétérogénéités ;
- évaluer la cimentation d'un tubage ;
- évaluer la porosité et appréhender la perméabilité ;
- mesurer les pendages ;
- fournir une micro-sismique de détail (ondes réfléchies) au voisinage du puits ; opérations à privilégier dans les puits fortement déviés ou horizontaux.

Limitations / Contraintes

- La mesure acoustique doit être faite dans un puits rempli d'eau (boue). IL est préférable de travailler en trou ouvert (voire tubé PVC). Il est souhaitable de faire une mesure continue des diamètres du forage (diagraphie : diamètre) pour détecter les zones cavées. L'outil doit être centré par des centreurs lors des mesures acoustiques.
- La vitesse de logging doit être faible (4 à 6 m/mn) pour respecter les conditions d'échantillonnage en distance et pour éviter les bruits de raclement créés par les centreurs. En général, un filtre en fréquence (coupe bas : 1 kHz) est utilisé à l'acquisition pour filtrer ces bruits.
- La mesure acoustique peut être réalisée en trou tubé acier, lorsque les tubages sont parfaitement cimentés. La présence de phénomènes de résonance dus à la mauvaise cimentation est utilisée pour évaluer la cimentation (log de cimentation).
- Les conditions de puits, en cas de puits tubé mal cimenté, peuvent rendre les mesures difficiles. Les ondes associées aux vibrations du casing doivent être filtrées. Ce traitement ne permet pas toujours d'extraire les ondes de volume caractéristiques de la formation et de mesurer les paramètres de formation.
- La mesure acoustique est favorisée par l'utilisation d'outils longs (3 à 4 m entre l'émetteur et les récepteurs). La mise en œuvre peut receler quelques difficultés lorsque le mât du système de levage n'est pas suffisamment haut. Dans ce cas, l'outil, s'il est souple, peut être introduit dans le puits en le courbant. L'outil peut aussi être introduit par éléments constitutifs connectables entre eux.

Dialogue donneur d'ordre / prestataire

- A la charge du donneur d'ordres:
 - Cahier des charges détaillé avec objectifs clairs ;
 - Documents relatifs au puits (trou tubé, ouvert, cimenté, déviation, etc.) ;
 - 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 7: la diagraphie acoustique, Editions Technip, Paris, ISBN 2-7108-0727-0
- **2011**, Mari J. L , Gaudiani P. & Delay J., Characterization of geological formations by physical parameters obtained through full waveform acoustic logging, Physics and Chemistry of the Earth, 36, 1438-1449, Elsevier Ltd.
- **2015**, Mari J.L., Signal processing for geologists & geophysicists, e-book, DOI:10.2516/ifpen/2011002
<http://books.ifpenergiesnouvelles.fr/ebooks/signal-processing/>