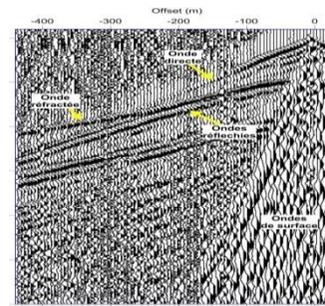


Principe de la méthode

- Le principe des méthodes sismiques consiste à générer un ébranlement à la surface du sol et à analyser la propagation des différents types d'ondes émises, ainsi que la mesure de leur vitesse. Chaque type d'onde est le support d'une méthode particulière.
- La sismique réfraction fait partie des méthodes de propagation d'ondes sismiques au même titre que la sismique réflexion, la sismique par ondes de surface et la sismique en forages.
- La sismique réfraction repose sur l'analyse des **ondes de compression, P**, réfractées au toit des couches. Les vitesses (VP) sont calculées par la mesure du temps d'arrivée des premières ondes réfractées (au-delà des arrivées directes).
- Suivant les objectifs du projet et la restitution souhaitée, La sismique réfraction peut se décliner en «conventionnelle» ou «**tomographie sismique**». Mise en œuvre, traitement, interprétation et livrables sont définis ci-dessous.



Tir sismique (Document BRGM)

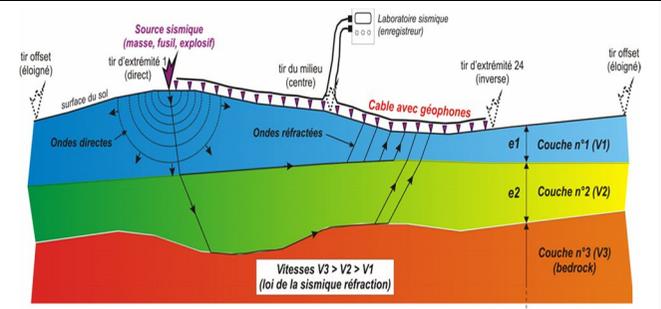
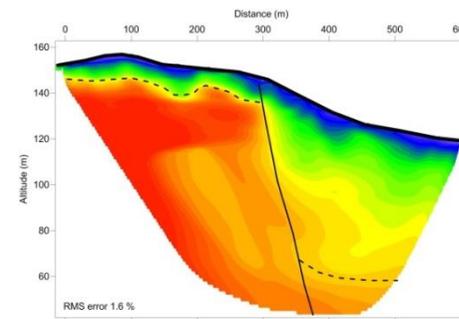


Schéma de principe (Document SOLDATA Geophysical)

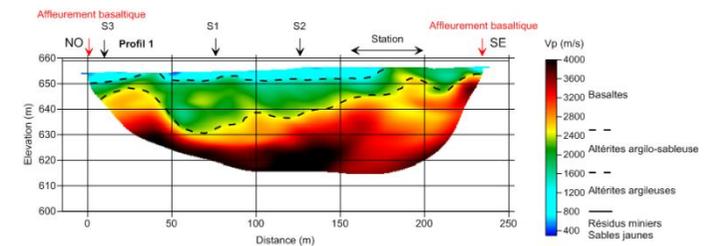
Applications

Bien que la méthode soit plus particulièrement adaptée aux milieux tabulaires, les domaines d'application sont nombreux :

- Type de problèmes traités :**
 - Détermination des épaisseurs et vitesses sismiques des différents horizons sismiques.
 - Suivi de la position d'un substratum sismique sous une couverture meuble.
 - Recherche de zones d'évolution du « faciès sismique » :
 - Fracturation : Passage de failles, zones décompressées.
 - Surépaisseur de sédiments : Surcreusement, épaisseur d'altération.
 - Variation de la qualité du matériau : Gisement de granulats, matériaux d'emprunts.
- Domaines d'emploi usuels :**
 - Géologie structurale, recherche de matériaux, recherche minière.
 - Etudes de fondations, optimisation d'implantation de structures, préfaisabilité
 - Hydrogéologie : Position de la nappe, structure du réservoir, limite fracturation / altération.
 - Milieu aquatique : Dragages, ensouillage de câbles/pipelines, fondations, matériaux. La cohérence entre profils terrestres et aquatiques est un avantage de la méthode.
- Profondeur d'investigation :** Dépend des contrastes de vitesses et de la longueur du dispositif, L. En moyenne, entre L/4 et L/5.
- Résolution :** Dépend des contrastes de vitesses et de l'espacement entre capteurs. En moyenne, 10% de la profondeur, 1/2 espacement de capteur et 50 à 100 m/s.

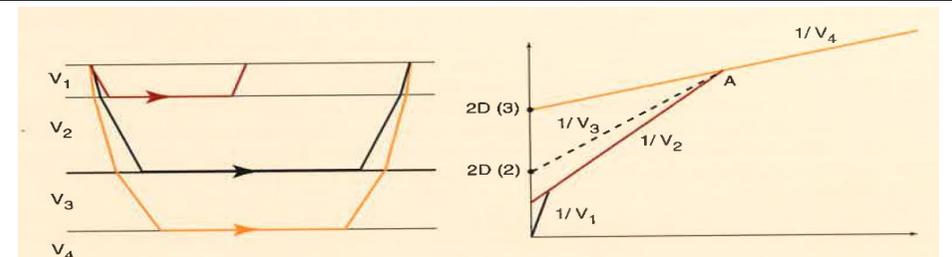


Exemples de coupes sismiques interprétées par tomographie (Document BRGM)



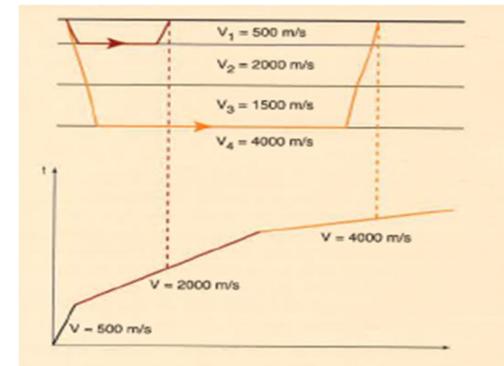
Limitations / Contraintes / Interdits

- La principale limitation est l'obligation d'avoir **une augmentation de la vitesse avec la profondeur**. Ainsi, lorsqu'une couche dure surmonte une couche tendre, la pénétration se limite au toit de la couche dure et la couche tendre est invisible. L'interprétation en est affectée.
- Une couche fine et peu contrastée, intercalée, est en général peu visible.
- Le phénomène de la disparition d'une couche sur les enregistrements («couche cachée») est due à 1) une vitesse inférieure aux deux couches encaissantes et/ou 2) une épaisseur relativement faible par rapport aux couches supérieures.



- La méthode est globale. L'interprétation intègre un volume de terrain lié à la géométrie du dispositif. Les anomalies ponctuelles (cavités, filons, objets enfouis, blocs) sont difficilement discernables.
- La réfraction est significative uniquement s'il existe des contrastes de VP entre les formations lithologiques.
- Des lithologies différentes peuvent présenter des vitesses identiques ou proches. Un horizon sismique ne correspondra pas nécessairement à une couche géologique.
- L'interprétation est donnée sous le profil. Il n'y a pas (ou peu) de vue latérale.
- **La réfraction nécessite un étalonnage sur des forages géotechniques.**
- L'acquisition est perturbée par les vibrations d'origine humaines (industries, routes, bétail) et naturelles (vent, ruissellement, proximité d'arbres).

Exemples de limitations :
Couches de faible épaisseur ou de vitesse inférieure à l'encaissant (Document AGAP)



Moyens nécessaires à l'acquisition

- **Equipements** : Capteurs de vibrations (géophones), câbles de connexion (flûte), enregistreur sismique (amplification du signal, numérisation, visualisation, stockage des données), source sismique (explosif, masse, fusil sismique, chute de poids). Les équipements sont vérifiés (maintenance, étalonnage) périodiquement.
- **Véhicules** : 2 véhicules de transport léger (camionnette, break), de préférence tout-terrains/tout-chemins, permettant le transport du personnel et des équipements.
- **Personnel et compétences** : 1 opérateur qualifié pour la mise en œuvre, 1 géophysicien qualifié pour l'interprétation (dont un Chef de Mission), environ 4 aides non qualifiés.



Flûte sismique
(Document BRGM)



Enregistreur GEODE de Geometrics (Document BRGM)



Enregistreur STRATAVIEW de Geometrics (Document GEO2X)

Mise en œuvre sur le terrain

- **Dispositif de mesures** : Appelé également « base », il est dimensionné aux objectifs de l'étude, la profondeur de cible et la résolution. Constitué de N géophones (généralement 12, 24 ou 48), régulièrement espacés (S généralement de 2 à 10m), la longueur d'un dispositif standard est de l'ordre de 48 à 480m. **La profondeur de pénétration de la méthode est d'environ ¼ de la longueur du dispositif (L = N x S).**
La source sismique doit être dimensionnée pour un rapport Signal/Bruit optimal sur l'ensemble du dispositif et pour un contenu fréquentiel adapté. L'explosif (forte énergie mais nuisances et autorisations contraignantes), la masse et le fusil sismique (pratiques mais de faible énergie), et la chute de poids accélérée ou non (bon compromis énergie/encombrement) sont les plus utilisées. Masse, fusil sismique et chute de poids sont réservées aux dispositifs courts.
- **Travaux préparatoires** :
 - Déclarations administratives et autorisations de travaux dans les propriétés. **Attention au**



Tir sismique à l'explosif (Document FUGRO)



Tir sismique à la masse (Document GEO2X)

fait que certains tirs indispensables (tirs offset notamment) sont implantés en dehors de la base

- Piquetage de l'emplacement des capteurs, avec relevé topographique. L'élagage et le débroussaillage ne sont nécessaires que dans un environnement végétal dense.
 - Relevés des singularités du site (remblais, sol décomprimé, fuites, conduites, routes, clôtures, etc.), pouvant influencer sur la qualité des mesures et de l'interprétation, et sur la sécurité du personnel.
 - **Installation** : Les capteurs sont fermement plantés dans le sol, le long d'un profil rectiligne. Ils sont connectés sur la flûte et la flûte à l'enregistreur.
 - **Tests** : La continuité électrique et la réponse des capteurs sont vérifiées, ainsi que le circuit de « temps zéro » (ou time break, TB). Les bruits électroniques et naturels sont atténués. Les sources d'énergie et les approvisionnements sont contrôlés.
 - **Tirs** : En sismique réfraction «conventionnelle», un dispositif sismique est investigué par 5 tirs minimum : 2 tirs en bout (à chaque extrémité), 1 tir au centre, 2 tirs offset (déportés d'une distance minimale d'environ 1/2 dispositif à l'extérieur). Tous les tirs sont strictement alignés sur le dispositif. Le nombre de tirs, leur espacement et l'éloignement des tirs offset est fonction de l'objectif de l'étude et de la résolution attendue.
- Si l'objectif de l'interprétation est une «tomographie sismique», les tirs seront implantés tous les 2 ou 3 géophones.
- **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 tir, l'opérateur contrôle la qualité des enregistrements, le niveau de bruit, le bon état fonctionnel des traces (capteurs + connections). L'enregistrement doit autoriser un dépouillement sans ambiguïtés des mesures. **Le dispositif ne doit pas être démonté avant validation du tir.**
 - **Production** : Dépend de la difficulté de déplacement sur le terrain et de l'importance de l'équipe. En moyenne, 4 dispositifs de 120m / 24 capteurs / 5 tirs par jour (hors préparation du terrain).



Exemples d'installation de dispositifs sismiques (Documents FUGRO, GEO2X, BRGM)

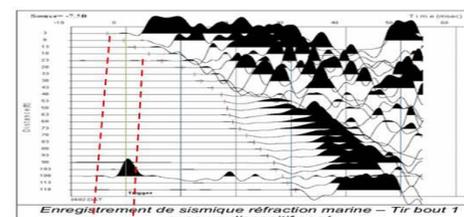


Tir sismique par chute de poids accélérée (Document ANDRA)

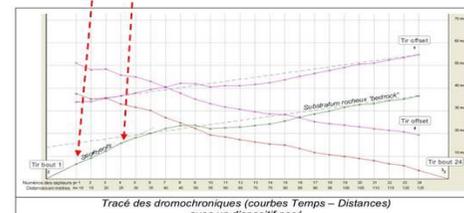


Traitement et interprétation des données

1. Pointé des arrivées premières et tracé des dromochroniques (courbes temps/distances).
 2. Contrôle de la cohérence entre tirs (fermeture des trajets directs et inverses).
- Interprétation par méthode conventionnelle (Plus / Minus, délais, intercepts)**
3. Calcul des courbes de délais (« Plus ») et des vitesses de fond (« Minus »).
 4. Calcul des vitesses intermédiaires et des épaisseurs de chaque couche individualisée, par la méthode des intercepts, au droit de chaque tir.
 5. Interpolation des épaisseurs entre tirs par la méthode des délais.
 6. La méthode conventionnelle **ne restitue pas** les variations progressives de vitesses, ni verticalement ni horizontalement
- Interprétation par tomographie sismique**
7. Eventuellement, par l'application d'un logiciel de tomographie sismique, à des fins de contrôle et/ou de validation. Le passage préalable par la phase d'interprétation «conventionnelle» (points 1 à 6 ci-dessus) est **recommandé** pour définir un modèle a-priori, optimisé par le logiciel de tomographie.
 8. Un des intérêts de la tomographie sismique est de restituer les variations progressives de



Enregistrement de sismique réfraction marine – Tir bout 1 avec un dispositif posé



Tracé des dromochroniques (courbes Temps – Distances) avec un dispositif posé

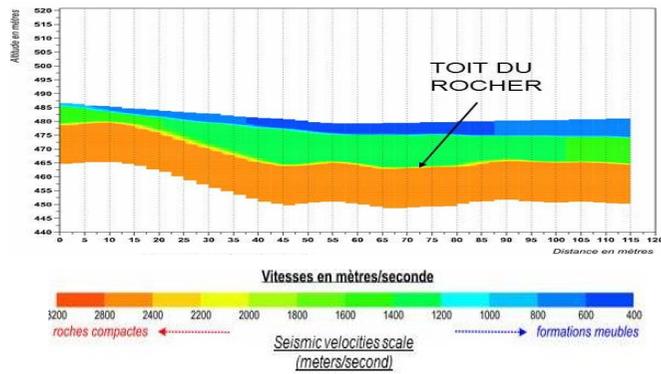
Enregistrement sismique (Document SOLDATA Geophysic)

Tracé de dromochroniques (Document SOLDATA Geophysic)

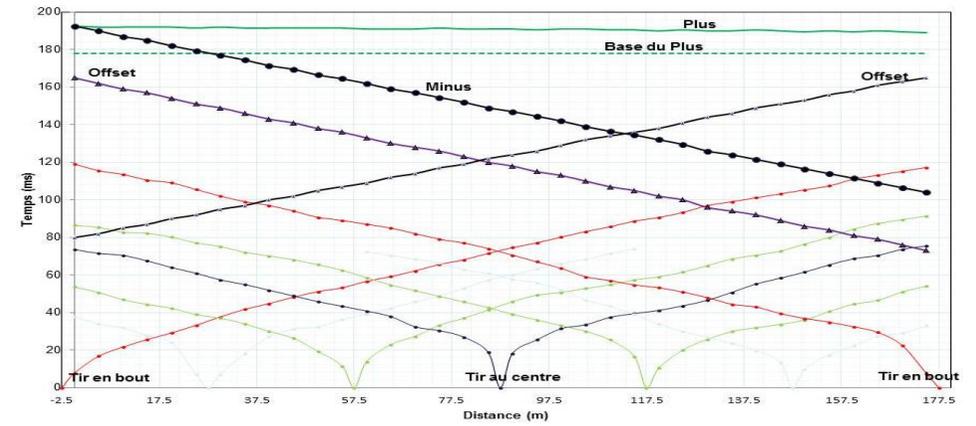
vitesse.

Production : 1 jour de traitement pour 1 jour d'acquisition, hors écriture du rapport et cartographie.

Coupe sismique avec vitesses (Document SOLDATA Geophysical)



Dromochroniques avec Plus et Minus (Document AGAP)



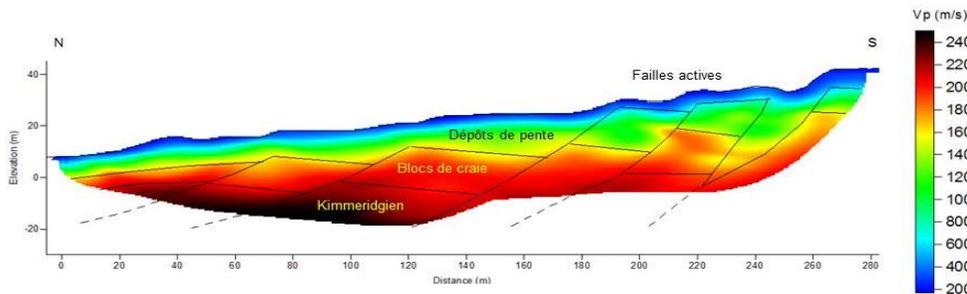
Résultats et livrables

Interprétation par méthode conventionnelle

- Coupe interprétative 2D (XZ), profondeur / distance, au droit du profil sismique. Les couches y sont caractérisées par leurs vitesses sismiques VP et leurs épaisseurs, calculées au droit des tirs. L'interpolation entre tirs est déduite des courbes «Plus/Minus».
- A noter que le «fond» ou «substratum sismique» est la couche la plus profonde interprétée sur les dromochroniques. Il ne correspond pas obligatoirement au «substratum géologique».
- Lorsque les profils ont été tirés suivant une grille plus ou moins régulière, les résultats peuvent être figurés sous la forme de cartes 2D (XY) représentant la distribution des vitesses VP à une profondeur ou à une côte cible, ainsi que la profondeur d'une formation de vitesse VP donnée.

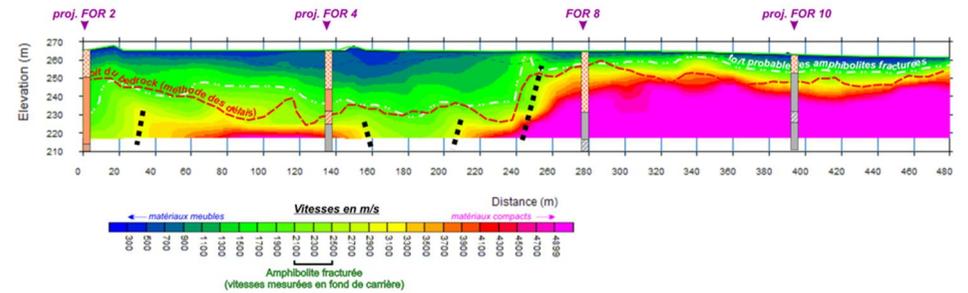
Interprétation par tomographie sismique

- La tomographie sismique produit une zonation des vitesses, avec un code couleur, au droit du profil.

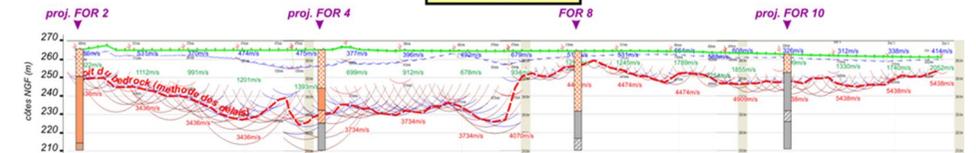


Coupe sismique interprétée (Document BRGM)

Sismique Réfraction Tomographie



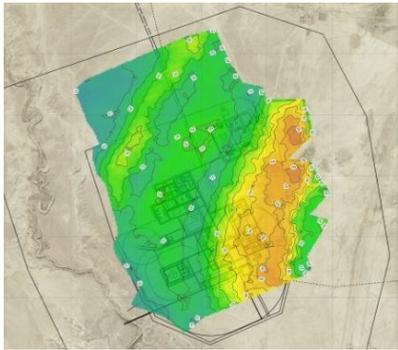
Sismique Réfraction Méthodes des délais



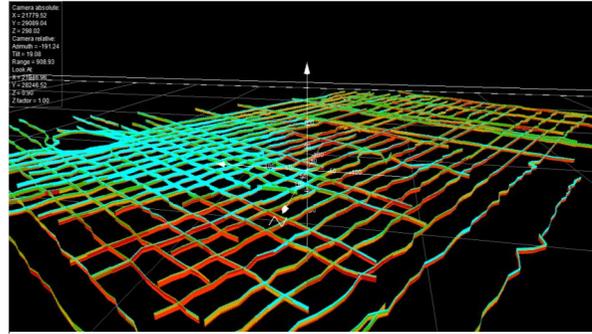
Coupe sismique interprétée par la méthode Tomographie (en haut) et la méthode des Délais - Plus / Minus (en bas) (Document SOLDATA Geophysical)

Rapport d'étude

- Le rapport d'étude comporte plusieurs sections. Un document AGAP spécifiant le plan d'un rapport-type peut être consulté sur le site web (www.agapqualite.org).



Carte de répartition des vitesses sismiques
(Document GEO2X)



Bloc sismique 3D de répartition des vitesses sismiques
(Document FUGRO)

- **Section Générale** : Traite des généralités de l'étude, entre autres, localisation, contexte géologique régional, objectifs, mode opératoire, équipement, méthodologie d'interprétation, etc.
 - **Section Spécifique** : Traite du paramétrage des équipements, de l'équipe du projet, de la localisation et de la topographie détaillées, des observations de terrain et de la qualité des mesures, ainsi que des résultats spécifiques au site (vitesses et épaisseurs, particularités et anomalies géologiques, etc.).
 - **Section Synthèse** : Suivant les objectifs de l'étude, des attentes du client et des termes du contrat, une interprétation avancée (incluant une intégration des résultats avec d'autres méthodes géophysiques et/ou des données géotechniques) pourra être menée. Des conclusions (sur la corrélation entre VP et lithologie), et des recommandations (sur des études complémentaires éventuellement) sont nécessaires.
- Le rapport comporte un volume texte et un volume cartographique, sur papier et/ou en format électronique. Le rendu cartographique est proposé au format CAD et/ou SIG. Les données de terrain sont fournies au format standard SEG2 et les relevés topographiques au format ASCII.

Apport à l'étude géotechnique

- Intégration géophysique / géotechnique : Profil de compacité, interpolation entre forages.
- Calcul des modules géotechniques par intégration de la vitesse VP à la vitesse des ondes de cisaillement (VS) après acquisition spécifique des VS.
- Corrélations : (1) entre la vitesse des ondes P et la vitesse des ondes S, (2) entre la vitesse des ondes P et la compacité des sols, (3) entre la vitesse des ondes P et la résistance de pointe du pénétromètre (qc).
- Appréciation de la rippabilité des matériaux en fonction de leurs vitesses sismique VP (voir Table de Rippabilité Caterpillar)

Quelques vitesses VP hors nappe

- Air : 300 m/s
- Terre végétale : 100m/s-350m/s
- Sables fins : 300m/s-700m/s
- Graves : 500m/s-900m/s
- Argile : 500m/s-1400m/s
- Marnes : 1800m/s-2100m/s
- Craie fracturée : 800m/s-1500m/s
- Substratum fracturé (calcaire, granite, basalte) : 1000m/s-3000m/s
- Substratum sain (calcaire, granite, basalte) : 3000m/- 6000m/s
- Nappe d'eau libre, eau de mer : 1450m/s-1500m/s

Dialogue donneur d'ordre / prestataire

- A la charge du donneur d'ordre
 - Cahier des charges détaillé avec objectifs clairs
 - Plans et documents relatifs à l'ouvrage, à la zone à prospecter
 - 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 pratiques.

Pour aller plus loin...

- **1959**, Hagedoorn G.J., *The Plus-Minus method of interpreting seismic refraction sections*, Geophysical Prospecting, 7, 158-182
- **1980**, Palmer D., *The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation*, K.B.S. Burke edition, SEG Tulsa
- **2005**, Magnin O. et Bertrand Y., *La sismique réfraction en Géophysique Appliquée*, Presses du LCPC, à l'initiative de l'AGAP
- **2006**, Norme ASTM 5777 : *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*
- **1970**, Darcy J., *Applications de la mécanique des roches aux terrassements rocheux*, Journée du Comité Français de Mécanique des Roches, Mai 1970

Liens

- www.abemfrance.eu, www.iris-instruments.com