

Comparaison des méthodes sismiques de surface, afin d'imager les premiers décimètres du sous-sol

Surface seismic methods comparison to image the near surface basement

Christophe VERGNIAULT¹, Claudio STROBBIA², Gian-Piero DEIDA³, David DUPUY⁴

¹ EDF-DI-TEGG, 905, Avenue du camp de Menthe Cedex 02, 13097 Aix-en-Provence, christophe.vergniault@edf.fr

² Realtimeseismic, 2 Avenue du Président Pierre Angot, 64000 Pau, claudio@realtimeseismic.com

³ Université de Cagliari, Via Università, 40, 09124 Cagliari CA, Italie. gpdeidda@unica.it

⁴ Geo2X, Route du Ctre 6, 1377 Oulens-sous-Echallens, Suisse. david.dupuy@geo2x.com

Mots clefs

Reconnaitances géophysiques, ondes de surface, sismique réfraction, sismique réflexion, UHR, ondes S.

Résumé

Cet article effectue un bilan du potentiel des méthodes sismiques usuellement utilisées dans les reconnaissances de sol de la proche surface et présente une des premières opportunités en Europe d'apporter des éléments concrets à l'idée finalement innovante dans le domaine industriel que la sismique Ultra Haute Résolution en ondes S (UHR-S_H) peut être un moyen de réaliser une image relativement fine de la proche surface (<5-50m).

Abstract

This article reviews the potential of seismic methods commonly used in near surface ground surveys and presents one of the first opportunities in Europe to bring concrete elements to the ultimately innovative idea in the industrial field that Ultra High Resolution – Shear waves (UHR-S_H) can be a means of achieving a relatively fine image of the near surface (<5-50m).

Éléments de contexte

Améliorer la résolution des reconnaissances sismiques des premiers décimètres du sous-sol, mieux définir leurs domaines d'application, identifier les limites et les incertitudes est un besoin essentiel afin de fiabiliser l'application de ces méthodes géophysiques aux reconnaissances de la proche surface. La finalité est de pouvoir caractériser des variations latérales de géologie, des structures spécifiques, des lentilles, des chenaux ou des accidents géologiques voire d'identifier des zones faibles. Une synergie a réuni EDF, Realtimeseismic (RTS), Geo2X et l'Université de Cagliari autour de cette thématique. Ceci a notamment permis de réaliser une comparaison relativement exhaustive des différentes méthodes sismiques de surface, à partir d'un jeu de données, enregistré il y a environ 20 ans par l'Université de Cagliari, sur un site dont la géométrie du sous-sol est contrôlée. En 2018, une acquisition a été reconduite sur ce même site, afin de pouvoir comparer les résultats des méthodes sismiques classiquement utilisées dans les reconnaissances de proche surface, à une reconnaissance par sismique réflexion en ondes S_H avec une source de type micro-vibrateur Elvis VII. La zone d'étude est une maquette de grande taille (33 m de long) en extérieur dans des alluvions d'un ancien lac asséché, à environ 10 km à l'Est de Cagliari (Sardaigne). Pour cela, une fouille a été faite, par l'Université de Cagliari, et un béton maigre a été coulé pour simuler différents contacts géologiques (cf. figure 1).

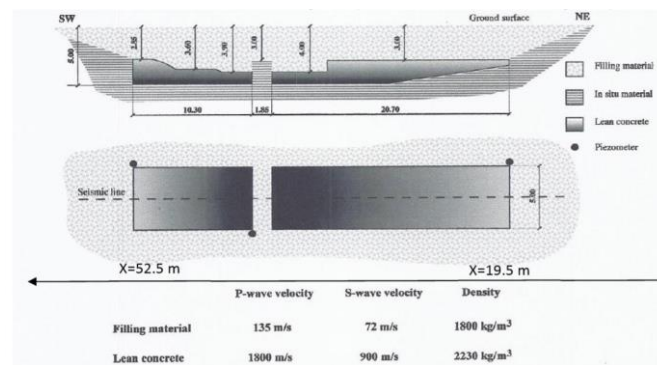


Figure 1 : Principales caractéristiques de la maquette utilisée d'après Deidda, 2001

« Comparaison des méthodes sismiques de surface pour imager les premiers décimètres du sous-sol »

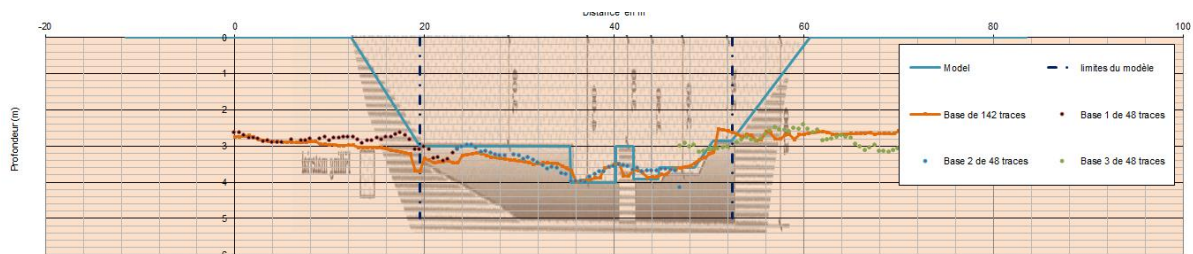
Suite à la construction de la maquette, une acquisition en ondes P et S_H a été réalisée en 2001, avec une masse comme source sismique. Cet article présente les résultats du profil UHR de 2018 et l'analyse récente du jeu des données historiques qui comprend un ensemble de 96 tirs P enregistrés sur les 142 traces actives (géophones verticaux). Ceci permet d'isoler différents groupes de traces pour un tir donné et ainsi simuler différentes méthodes d'acquisition, à savoir :

- 1 base longue de réfraction, avec 142 traces actives,
- 3 bases enchainées de réfraction, avec 48 traces actives (23.5 m),
- 2*47 bases glissantes de réfraction ou MASW (type marine ou landstreamer, suivant 2 sens de déplacement), en considérant un dispositif glissant de 48 traces avec uniquement 1 tir en bout à une extrémité ou l'autre de la base,
- 2*73 bases glissantes MASW, de 24 traces (11.5 m) avec uniquement 1 tir en bout à une extrémité ou l'autre de la base.

Principaux constats sur les analyses de sismique réfraction

Malgré la complexité du cas étudié, en raison de nombreuses variations latérales sur une courte distance, la sismique réfraction analysée avec la méthode des Délais (en l'occurrence «Plus-Minus») apparaît être la plus performante des méthodes de réfraction (Intercept, Tomographie). En effet, après une analyse qui somme toute est simple, car limitée à 2 tirs (284 temps pointés) lorsque l'on a une base longue, on retrouve un aspect lissé du fond de fouille avec tout de même des indentations clés (cf. figure 2). La vitesse de fond moyenne est autour de 1200 m/s, mais elle semble peu fiable car fortement variable (de 500 à 2000 m/s). Ceci est probablement en lien avec des variations latérales fortes et fréquentes. De part et d'autre de la maquette, le réfracteur entre 2.5 et 3 m de profondeur s'explique par la présence de la nappe. Il est rappelé que la Méthode des Délais est basée sur la détermination d'une fonction dite Plus et Minus, à partir des valeurs des temps de trajet direct et inverse, correspondant au déplacement de l'onde sismique au toit d'un même réfracteur (Magnin, 2005). Elle est donc généralement effectuée sur les dromochroniques des tirs avec déport (offset), pour lesquelles les temps d'arrivée correspondent bien à un déplacement de l'onde effectué au toit du substratum. Toutefois, les retours d'expériences récents montrent que cette méthode d'analyse est souvent difficile à mettre en œuvre, car elle nécessite d'avoir des tirs offsets de qualité, qui sont généralement atteignables qu'avec de l'explosif dès que les bases ont une longueur significative.

L'approche par tomographie apparaît très intéressante, car elle a l'avantage de s'accommoder de ce manque d'un défaut de tir offset, à condition d'avoir suffisamment de tirs le long du dispositif (5 à 7 est un minimum). Il est rappelé que le cœur du processus de tomographie par réfraction est l'optimisation par inversion itérative d'un modèle de vitesses, en fonction de la comparaison des temps de trajet directement calculés à partir du modèle à ceux observés. Le point faible de cette méthode est de définir un modèle initial pertinent et les seuils d'isovitesse reflétant au mieux les formations géologiques. Pour cela, cette méthode est généralement réalisée en complément d'une analyse classique (Belfer, 1996). Dans notre cas d'étude, le résultat d'une tomographie utilisant 7 tirs (142 traces) permet également de retrouver un aspect lissé du fond de fouille, mais l'incertitude semble plus importante qu'avec la méthode de Délais.



« Comparaison des méthodes sismiques de surface pour imager les premiers décimètres du sous-sol »

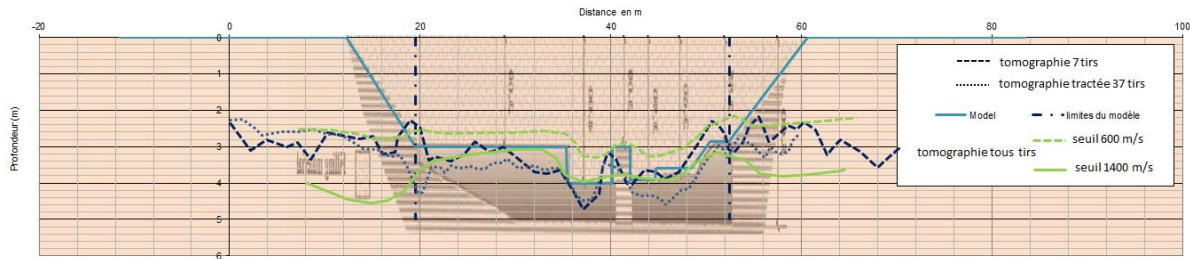


Figure 2 : Superposition sur la coupe du modèle, en haut, des résultats de sismique réfraction avec une base longue de 142 traces (284 temps pointés), 3 bases enchaînées de 48 traces (violet, bleu, vert), après une analyse « Plus-Minus » (orange) et en bas, des résultats de la tomographie en considérant 7 tirs sur la base longue (994 temps pointés, seuil à 600 m/s), 47 bases glissantes (2256 temps pointés) et une autre campagne de 120 tirs avec 120 traces (14400 temps pointés, seuil à 600 et 1400 m/s).

L'analyse par tomographie de l'intégralité d'un deuxième jeu de données (vert sur la figure 2), acquis 6 mois après le jeu principal, montre que l'incertitude associée à une analyse par tomographie semble se réduire avec l'augmentation du nombre de temps pointés (14400 au lieu de 994). Toutefois, le seuil d'isovitesse à prendre au toit de la maquette reste un vrai sujet avec des choix entre 600 ou 1400 m/s, alors que le niveau de la nappe doit aussi être entre 2.7 et 3 m.

Le ratio entre le coût du personnel et celui du matériel fait qu'il est souvent privilégié d'enchaîner des bases, plutôt que de mettre en place une base couvrant tout le linéaire du profil. Nous avons donc également vérifié qu'enchaîner plusieurs bases relativement courtes ne dégrade pas la qualité du résultat (cf. résultat des 3 bases 48 traces sur la figure 2 haut).

Enfin, dans le cas d'une acquisition dite de grand rendement (type sismique réfraction tractée au fond de l'eau ou à terre), la spécificité est d'avoir un grand nombre de bases courtes qui s'enchaînent. Dans un tel cas, il n'y a pas de tir déporté et donc la méthode des Délais n'est pas applicable. Nous avons constaté qu'en appliquant la méthode des Intercepts, dans le cas de la maquette ayant de nombreuses variations latérales, il est difficile de trouver un sens aux résultats. Ceci illustre la limite de cette approche, lorsque les variations latérales sont plus fréquentes que la longueur du dispositif. En revanche, il est à noter que dans un tel contexte, par l'exploitation d'un nombre importants de tirs (47 tirs, 2256 temps pointés) l'application d'une analyse par tomographie donne un résultat sensiblement équivalent à celle faite sur les bases fixes (cf. résultat tomographie tractée en figure 2bas). Ceci est donc intéressant pour des approches de réfraction tractée (grand rendement), que ce soit en mer ou à terre.

Principaux constats sur les analyses MASW

L'analyse des bases MASW 1D a été conduite suivant le principe introduit par Park (1999). Toutefois, seules les bases où le milieu peut être considéré comme tabulaire au droit de la flûte de récepteurs actifs ont été sélectionnées. Pour cela, nous avons regroupé les bases d'une longueur donnée (24 ou 48 traces) et ayant le même point milieu. Ensuite le diagramme de dispersion des tirs aux 2 extrémités de ces bases a été comparé. Lorsque les courbes de dispersion de ces tirs sont cohérentes, la base est considérée exploitable et dans le cas contraire non exploitable (Vergniault, 2018). Sans surprise, les bases jugées exploitables se trouvent principalement en dehors du modèle et dans la partie où le toit du béton est plan (cf. figure 3).

L'inversion a été faite en 2 étapes :

- 1ère inversion sans définir de modèle initial mais avec une série de couches de 50 cm d'épaisseur,
- 2ème inversion en utilisant un algorithme génétique (GA) et utilisant un modèle initial déduit d'un découpage macroscopique du résultat de la première phase, avec un nombre limité de formations.

« Comparaison des méthodes sismiques de surface pour imager les premiers décimètres du sous-sol »

Toutes les inversions montrent un saut de vitesse au niveau de la nappe ou du toit du modèle (passage de 70 à 150 m/s), mais pas vraiment de différence entre la zone au droit du modèle et aux 2 extrémités, comme si la résolution de la méthode n'est pas suffisante pour détecter la lentille de béton dont la vitesse S est de 900 m/s.

Ensuite nous nous sommes intéressés à l'approche pseudo-2D dite CMP-CC, car théoriquement elle permet d'améliorer la résolution latérale de la méthode MASW (Hayashi, 2004). Pour résumer, une approche CMP-CC consiste en une mise en collection de type point milieu commun (CMP) des traces après cross-corrélation (CC) entre les paires de capteurs. Dès lors le processus d'analyse MASW peut se poursuivre sur les collections CMP. Le plus grand nombre de base 1D permet d'avoir un résultat pseudo-2D après interpolation des logs 1D.

Dans des travaux que nous avons menés, afin de prendre en compte le fait que des bases CMP peuvent être trop petites pour être fiables et générer des effets de bord, les zones non contraintes par des données (pointées) sont matérialisées par un masque translucide (cf. figure 3). Dans le cas étudié, l'analyse MASW par la méthode CMP-CC est certes entachée d'effets de bords (sur les côtés et proche de la surface), mais la tendance des vitesses est cohérente avec une approche conventionnelle qui est nettement plus fastidieuse. Toutefois, ici les deux approches ne sont pas en mesure de s'approcher de la vitesse de la « fine » lentille de béton. On voit bien que pour l'identification d'accidents géologiques ou d'une structure spécifique, la résolution de la méthode MASW est trop faible pour être un outil probant. L'idée est plutôt d'avoir une approche grand rendement, de façon qualitative pour identifier des anomalies majeures, devant ensuite être mieux caractérisées autrement. Dans ce contexte, une approche du type MASW CMP-CC semble intéressante, mais le traitement des logiciels du marché reste à éprouver. Enfin, il semblerait que le sens de déplacement de la base glissante puisse avoir un impact sur la délimitation des anomalies, ce qui reste aussi à mieux caractériser. En effet, l'extension de la zone de faible vitesse visible (70 m/s) sur le profil pseudo-2D de la figure 3 est plus étendue vers un bord ou l'autre en fonction du sens d'avancement. Il est difficile de savoir si cette lentille de faible vitesse est réelle ou liée à un effet de bord, car on ne l'identifie pas sur les profils 1D. Cet effet du sens d'avancement de l'acquisition est à approfondir par des analyses de signaux synthétiques.

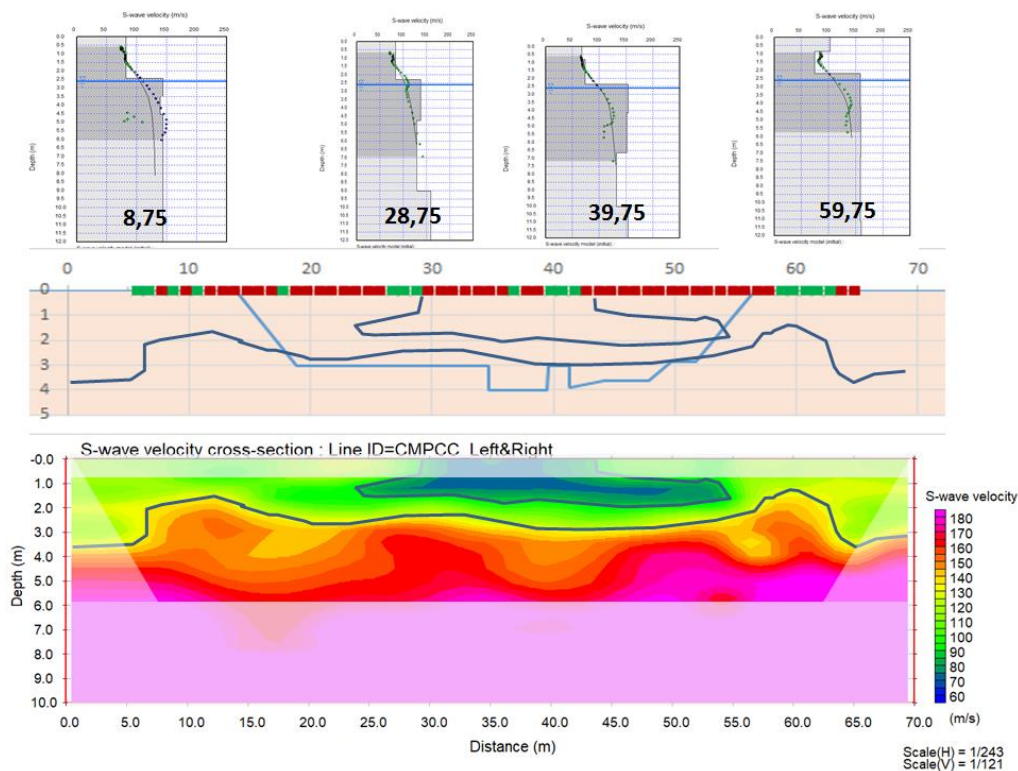


Figure 3 : En haut superposition des analyses 1D conventionnelles avec l'abscisse du log en gras ; Au milieu, profil de la maquette et du report des principaux marqueurs pseudo 2D avec au-dessus, les

marques rouges indiquant les bases 1D non exploitables et les marques vertes celles qui le sont ; En bas, section pseudo-2D par méthode CMP-CC pour les bases glissantes de 48 traces

Principaux constats sur les analyses de sismique réflexion UHR en ondes S_H

Le monde pétrolier utilise très largement la sismique réflexion en ondes P (Conventionnelle, Haute Résolution et Très Haute Résolution), lors de phase d'exploration et même d'exploitation. Historiquement, à terre, cette méthode était trop coûteuse pour les applications d'ingénierie à faible profondeur (Ultra Haute Résolution). De plus, le principal facteur qui limite l'usage de la sismique réflexion aux investigations à faible profondeur est sa faible résolution pluridécimétrique pour une sismique Très Haute Résolution (THR) en ondes P. En revanche, les réflexions des ondes S possèdent des longueurs d'onde beaucoup plus faibles, de l'ordre du mètre voire moins, ce qui rend leur utilisation appropriée pour séparer deux horizons en proche surface. Néanmoins, leur utilisation est restée limitée au domaine académique, notamment en raison des investissements importants en matériel sans marché cible avéré. L'investissement en matériel est important car les espacements requis entre capteurs sont courts afin d'éviter le phénomène d'aliasing spatial ($\text{espacement} < V_{\min}/(2.f_{\max})$) et ces capteurs sont des géophones horizontaux contrairement aux méthodes sismiques usuelles utilisant des géophones verticaux. Enfin, il faut également une source sismique en cisaillement. Toutefois, un certain nombre de travaux universitaires existent (Deidda, 2001, Pugins 2013, Fabien-Ouellet 2014) et ils nous ont semblé suffisamment encourageants pour mettre en place l'expérimentation industrielle de 2018 à Cagliari. Cette dernière a permis de générer une image sismique dès 3 m de profondeur et outre un profil 2D, il est à noter qu'un mini-bloc 3D a également été réalisé (cf. figure 4), ce qui est à notre connaissance une innovation pour le milieu industriel sur ce domaine de profondeur d'investigation.

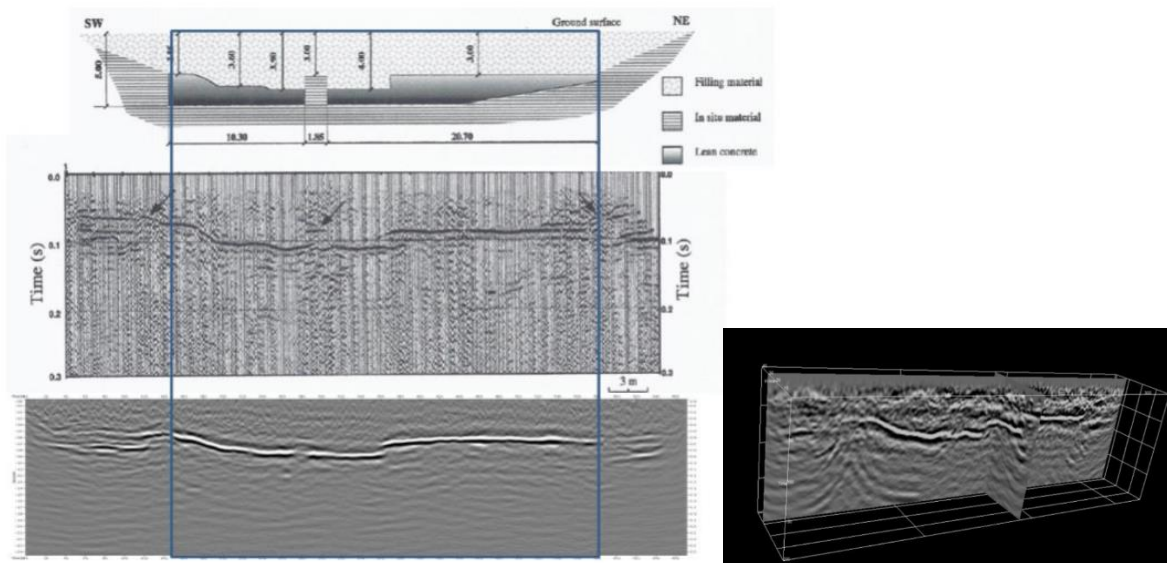


Figure 4 : Profil UHR-SH (en temps double) à la masse (RawStack de 2001) et avec une source vibrante (PSTM de 2018). Illustration du bloc 3D (migration avant stack) en ondes SH, le marqueur majeur correspond au toit du modèle

Conclusion

La sismique réfraction reste un bon compromis qualité / prix dans l'objectif de définir la géométrie du substratum, identifier la nappe. La méthode d'acquisition à mettre en œuvre (base fixe, base glissante) dépendra du contexte et de l'objectif, ce qui influera sur la méthode d'analyse (Délais, Tomographie). Lorsque le nombre de tir est limité, la méthode des Délais est à préconiser, à condition d'avoir des tirs déportés de qualité. Dans le cas contraire, il faut préférer la tomographie. Elle est aussi à préconiser pour des approches de grand rendement.

La MASW pseudo-2D est également intéressante dans l'idée d'avoir une approche grand rendement, de façon qualitative pour identifier des anomalies majeures, devant ensuite être mieux caractérisées autrement. Toutefois, l'approche du type CMP-CC reste à fiabiliser (simulations numériques, qualification de différents logiciels). En revanche, pour imager finement des accidents géologiques ou une structure spécifique, la résolution de la méthode MASW est trop faible pour être un outil probant.

Le plot d'essai de sismique Ultra-Haute Résolution en ondes S_H avec un micro-vibrateur Elvis VII réalisé en 2018, en partenariat avec l'université de Cagliari, Realtimeseismic, Geo2X et EDF est une des premières opportunités en Europe d'apporter des éléments concrets à l'idée finalement innovante dans le domaine industriel que la sismique UHR- S_H peut être un moyen de réaliser une image relativement fine de la proche surface (<5-50m), utilisable pour définir un modèle géométrique, identifier des accidents éventuels, des surcreusements, des lentilles, mais aussi donner un modèle macroscopique de la vitesse S du sous-sol à partir des vitesses de traitement, complété par une analyse en tomographie S . En l'état, on peut donc envisager de passer à un autre stade de la démonstration, afin d'évaluer les limites de cette méthode :

- d'une part, par des simulations numériques (générateur de signaux synthétiques en développement à EDF-R&D),
- d'autre part, en se confrontant à des applications industrielles (imager une faille capable caractérisée à l'affleurement ou en tranchée),
- enfin, en testant différents matériels (source Mechatronics avec une plus large plage de fréquences, capteurs landstreamer pour les grands linéaires et accéléromètres 3C MEMS)

Remerciements : aux nombreux étudiants de l'Université de Cagliari qui ont participé à l'acquisition, ainsi qu'à Sylvain Pouliquen et Denis Vautrin d'EDF, Giuseppe Cocchiararo et Thomas Tschärner de Geo2X, Frédéric Chasserot de RTS.

Bibliographie

- Gebriel Fabien-Ouellet, Mesures sismiques à faible profondeur, Mémoire de Maîtrise SVT, Université de Laval, 2014.
- Gian Piero Deidda, Roberto Balia, An ultrashallow SH-wave seismic reflection experiment on a subsurface ground model, Geophysics, July 2001, pages 1097-1104.
- K. Hayashi, H. Suzuki, CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, Exploration Geophysics, 2004, pages 7-13.
- Igor Belfer, Evgeny Landa, Shallow velocity-depth model imaging by refraction tomography, European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE), 1996.
- Olivier Magnin, Yves Bertrand, Guide de sismique réfraction, cahiers de l'AGAP-Q N°2 collection LCPC, 2005, 96 pages.
- Park C., R. Miller & J. Xia, Multi - channel analysis of surface waves, Geophysics, 64 (3), 1999, pages 800-808.
- André J.-M. Pugin, Kevin Brewer, Timothy Cartwright, Susan E. Pullan, Perret Didier, Heather Crow1 and James A. Hunter, Near surface S-wave seismic reflection profiling—new approaches and insights, first break volume 31, February 2013
- Christophe Vergnault, Fanny Dubié, Benjamin Girard, Florence Renalier, « Méthodes de calcul innovantes pour les études d'évaluation de la sûreté des ouvrages en remblais », Colloque CFBR, 2018.