

Recherche d'anomalies dans les digues par ondes de surface (MASW et DCOS) : application sur le site expérimental de l'Agly (66)

Edouard MOUTON, Grégory DURAND, SismoOcean, 132 Rue Pauline RAMART, 34070 MONTPELLIER, France, Tél/Fax 00 33 (0) 4 67 75 52 67, email : greg.durand@sismocean.com, edouard.mouton@sismocean.com, www.sismocean.com

Arnauld CLEMENT, Patrice MERIAUX, Cemagref - Centre Regional d'Aix-en-Provence, Unité de Recherche « Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie », CS 40061, 13182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5, France, Tél 00 33 (0)4 42 66 99 51, email : patrice.meriaux@cemagref.fr.

Introduction

La digue rive gauche du fleuve côtier Agly à Saint-Laurent-de-la-Salanque (Pyrénées orientales) est depuis 2000 un site privilégié d'expérimentation des méthodes de prospection géophysique pour la reconnaissance des ouvrages hydrauliques en remblai. Cette portion de digue renferme, en effet, plusieurs grosses hétérogénéités de constitution, consécutives aux dégâts de la crue de novembre 1999 (une brèche et plusieurs points d'érosion par surverse).

Avec l'autorisation de son gestionnaire, le Syndicat Intercommunal de l'Agly maritime, elle a fait l'objet, de 2000 à 2004, de plusieurs campagnes de mesures géophysiques (méthodes électromagnétiques, radar, panneaux électriques, etc.) au titre du projet national de recherche Criterre (Dérobert § al., 2003) (Fauchard, Mériaux, 2004). Celles-ci ont permis d'accumuler une masse importante d'informations internes à l'ouvrage. Il est ainsi intéressant de tester de nouveaux modes ou dispositifs de prospection géophysique sur ce site remarquable.

C'est dans un tel cadre que la société SismoOcean s'est rapprochée du Cemagref afin d'expérimenter sur la digue de l'Agly la méthode de prospection sismique par ondes de surface. Cette communication, après avoir rappelé le principe des méthodes MASW et DCOS, présente le dispositif déployé sur la digue début 2007 et une première interprétation des résultats des mesures, réalisée volontairement à ce stade en n'ayant qu'une connaissance minimale de l'histoire et de la constitution de la digue.

Ondes de surface de type Rayleigh

Les ondes de surface de Rayleigh sont des ondes qui se propagent à l'interface séparant un solide et le vide (ou l'air). Ces ondes sont étroitement liées aux caractéristiques de cisaillement du sous-sol ainsi qu'à la géométrie des couches (épaisseurs). La figure 1 illustre la propagation d'une onde de surface composée d'un déplacement de compression/dilatation et d'un déplacement vertical de type cisaillement.

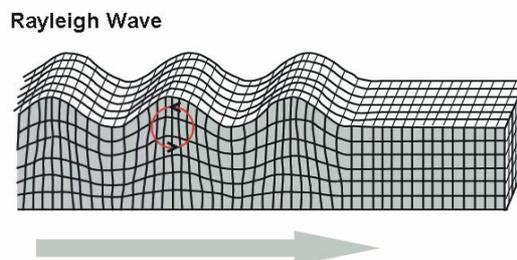


Fig. 1 : Propagation des ondes de Rayleigh.

Dans un milieu constitué de plusieurs matériaux, les ondes de Rayleigh deviennent dispersives c'est-à-dire que la vitesse de propagation varie en fonction de la fréquence. La majeure partie de l'énergie

de ces ondes se propage dans une épaisseur de sol voisine de la longueur d'onde (Stokoe K.H. § al, 1994).

Ces ondes sont relativement faciles à générer puisque dans le cas d'une excitation ponctuelle de la surface d'un matériau (tir à la masse, chute de poids ou explosif), les deux tiers de l'énergie sont convertis en onde de surface. Habituellement ces ondes sont analysées afin d'obtenir des informations sur les caractéristiques de cisaillement (vitesse de propagation des ondes de cisaillement) du sous-sol en fonction de la profondeur et ceci au moyen de transformations telles que Tau-p, Hough et d'inversion de la dispersion. Cette analyse peut être réalisée aussi bien avec des tirs classiques qu'avec une acquisition du microtremor ambiant (ou microsismicité ou bruit sismique) qu'il soit anthropique ou non (Louis J.N., 2001, Young Ho Cha § al., 2006).

MASW (Multichannel Analysis Surface Wave) dans le cas d'une digue

Du fait de la géométrie de la digue, qui ne peut pas être comparée à un milieu plan de dimension infini, les ondes de surface mesurées (ondes de Rayleigh) ont des propriétés de propagation qui sont différentes de celles que nous modélisons numériquement pour des topographies planes. Par conséquent, l'inversion numérique qui donne accès à ces vitesses de cisaillement doit être considérée avec précaution.

Cependant comme cette « erreur » d'analyse est réalisée pour l'ensemble des mesures traitées, les résultats obtenus peuvent être utilisés, en analyse relative, afin de localiser les variations de propriétés de cisaillement. Aussi le résultat obtenu par l'étude MASW sera visualisé sous la forme d'une valeur adimensionnelle définie de la manière suivante :

$$I = \frac{V_s}{V_s \text{ moyen}}; \quad V_s \text{ moyen} = 221 \text{ m/s}$$

Principes du DCOS (Détection de Cavités par Ondes de Surface)

Le DCOS s'appuie sur les caractéristiques de propagation des ondes de surface et sur l'interaction qu'elles peuvent avoir avec tout type d'anomalies rencontrées (Mouton E., et al, 2006). La figure 2 montre le cas d'un milieu sans anomalie.



Fig. 2 : Sous-sol sans hétérogénéités.

Les éléments posés sur le sol représentent la chaîne d'acquisition (flûte sismique) constituée de géophones reliés à un enregistreur. Dans le cas d'un milieu sans hétérogénéités de tailles caractéristiques par rapport à la géométrie du dispositif, l'énergie des ondes de Rayleigh, se propageant dans le sous-sol, ne sera pas perturbée pendant son parcours.

En revanche dans le cas de la présence d'une anomalie, l'énergie de l'onde de Rayleigh sera modifiée après son passage au travers de celle-ci. Sur la figure 3, nous avons représenté une cavité présente dans le sous-sol.

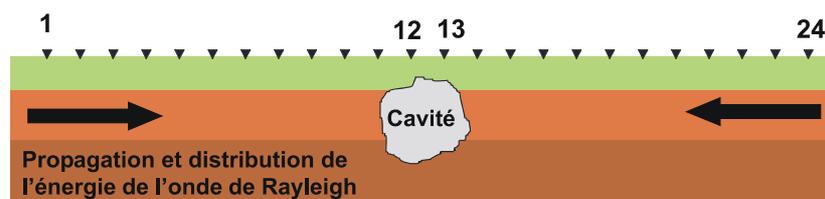


Fig. 3 : Sous-sol avec une hétérogénéité.

L'énergie de l'onde de Rayleigh se propageant du géophone 1 vers le géophone 24 va interagir avec l'anomalie et l'énergie mesurée par les géophones 1-12 sera supérieure à celle mesurée par les géophones 13-24.

Selon le sens d'application de la transformée permettant d'exprimer la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh en fonction de la fréquence, il est possible de définir deux sens de propagation par rapport à la flûte sismique :

- sens direct ou positif dans la direction des géophones 1 à 24
- sens inverse ou négatif dans la direction des géophones 24 à 1

De plus, la transformation permettant le passage d'une représentation du plan x-t (distance-temps) au plan f-v (fréquence-vitesse) permet de visualiser la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde λ définie par $\lambda = v/f$.

Ainsi, la méthode de détection par DCOS est basée sur une comparaison relative des distributions d'énergie par moitié de dispositif, dans le sens des vitesses positives d'une part, et dans le sens des vitesses négatives d'autre part.

Ceci permet en particulier de s'affranchir du fait que l'énergie arrivant au dispositif avec des vitesses positives n'est pas au même niveau que l'énergie arrivant au dispositif avec des vitesses négatives.

Equipements

Les équipements utilisés sont des géophones 4,5 Hz mesurant des déplacements verticaux connectés à des « flûtes » reliées aux enregistreurs sismiques.

Les figures 4 et 5 présentent la configuration d'utilisation de cet équipement qui a été mise en œuvre début 2007 sur la digue rive droite de l'Agly à Saint-Laurent-de-la-Salanque.



Fig. 4 : Dispositif en place sur la digue.



Fig. 5 : Véhicule roulant le long des géophones.

Aujourd'hui, nous utilisons aussi bien une géométrie de mesures modulables qu'une géométrie plus figée. La géométrie modulable est constituée de 72 géophones dont la distance entre capteurs peut varier de 1 à 3 mètres, ce qui permet d'avoir des dispositifs variant de 71 à 213 mètres de long.

La géométrie utilisée est composée de 96 géophones espacés de 2 mètres qui nous permettent d'avoir une flûte sismique de 190 mètres de long. Le bruit sismique naturel et anthropique (véhicule roulant) a été enregistré.

Méthologie

Pour l'étude par DCOS le bruit anthropique est le plus couramment utilisé car il permet de s'affranchir des problèmes de couplage et de champ proche rencontrés avec les tirs sismiques classiques. Cette approche permet, avec les dispositifs employés, de réaliser une analyse par fenêtre glissante en

extrayant de l'enregistrement sismique globale le nombre de traces voulues. La figure 6 illustre ce procédé.

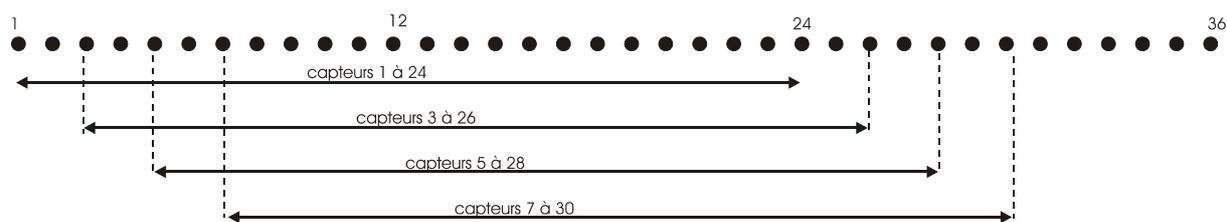


Fig. 6 : Traitement réalisé sur les acquisitions : extraction de géophones.

Par conséquent, sur un même dispositif de mesure de 96 capteurs et pour une extraction de 24 capteurs, nous pouvons réaliser 73 analyses par MASW et DCOS qui seront espacées de la distance séparant deux capteurs.

La méthodologie se décompose de la manière suivante :

- Acquisition du bruit sismique ambiant (naturel et anthropique) avec la totalité des géophones
- Extraction des groupes de géophones par fenêtre glissante
- Analyse MASW et DCOS sur chacun des groupes de géophones extraits
- Production d'une interprétation MASW et DCOS

Résultats

Les traitements par MASW et DCOS appliqués pour chacune des fenêtres d'analyse permettent, au final, d'avoir une représentation en deux dimensions où figurent les variations de la vitesse de cisaillement normalisée et de l'énergie associée aux ondes de surface. Les figures ci-dessous illustrent ceci.

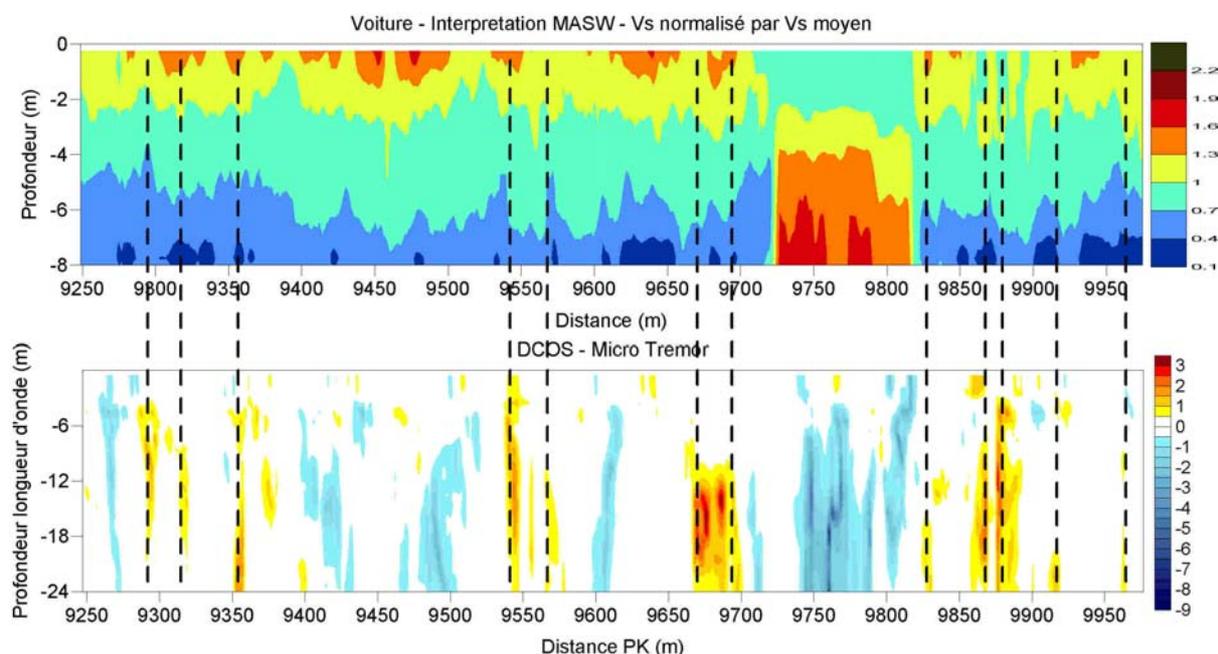


Fig. 7 : Comparaison des résultats obtenus par analyse MASW (V_s Moy = 221 m/s) et DCOS.

Sur ces figures, l'axe horizontal est l'axe des distances et l'axe vertical celui des profondeurs. Pour la figure du bas la profondeur est exprimée en longueur d'onde. Une approche empirique consistant à diviser les longueurs d'onde par 3 permet d'approximer une profondeur métrique des anomalies. Ces résultats ont été obtenus à partir d'une fenêtre d'analyse (extraction des traces sismiques) composée de 24 capteurs.

Les variations d'énergie relevées sont représentées avec une palette de couleur et les anomalies (zones décomprimées, vides, rupture de tabularité) correspondent aux couleurs allant du jaune au rouge.

On observe que la principale anomalie, visible sur l'étude MASW entre les pm 9730 et les pm 9820 correspondant à une brèche qui a été comblée par des matériaux différents de ceux de la digue originelle, n'est pas mise en évidence par l'analyse DCOS. Ceci a pu être expliqué par la présence à proximité d'une station d'épuration générant un fort bruit de fond très directif perturbant l'analyse DCOS. L'analyse MASW qui a été employée n'est pas sensible à ce genre de perturbations car seule la position de la courbe de dispersion est utilisée pour l'interprétation en vitesse de cisaillement.

En revanche, de nombreuses anomalies DCOS ont été relevées sans pour autant que des variations en vitesse de cisaillement ne soient visibles (excepté autour du pm 9875).

Conclusion

La combinaison des méthodes MASW et DCOS utilisant des mesures de microtremor anthropique ou naturel, permet une caractérisation du sous-sol basée sur ses propriétés de cisaillement. Des inhomogénéités (cavités formées ou en formation, zones décomprimées, variations de nature de terrain) peuvent alors être mises en évidence.

Ces deux approches aident à une meilleure compréhension des milieux auscultés, étant rappelé qu'à ce stade de l'expérimentation sur la digue de l'Agly, l'interprétation a été faite en « aveugle », c'est-à-dire sans avoir eu la connaissance ni de la nature exacte des sols constituant la digue et la réparation de brèche, ni des résultats des prospections géophysiques antérieures. Aussi, un second rapport d'interprétation sera produit ultérieurement, à la lumière de ces informations.

Bibliographie

Dérobot X., Hollier-Larousse A., Mériaux P. (2003), Reconnaissance géophysique des digues de l'Agly après la crue de novembre 1999 – Contribution à l'élaboration d'une méthode de diagnostic. colloque GEOFCAN, septembre 2003 à Paris.

Fauchard C., Mériaux P. (2004), Les méthodes de reconnaissance à grand rendement adaptées aux digues de protection contre les inondations. Colloque CFGB, 25 et 26 novembre 2004, Orléans.

Louis J.N. (2001) – Faster, better : Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bull. of Seism. Soc. Of Am., vol.91, n°2, p 347-364.

Mouton E., et al (2006) – Détection d'anomalies dans le sous-sol à partir d'ondes de surface. Méthode DCOS, AGAP Qualité- GEOFCAN Besançon 2006, pp. 44-47

Young Ho Cha, et al. (2006) - Application of linear-array microtremor surveys for rock mass classification in urban tunnel design, Exploration Geophysics 37, 108-113

Stokoe K.H. et al. (1994) – Characterization of geotechnical sites by SASW method. XIII ICSMFE, Ed R.D. Woods, Oxford & Ibh Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, India, 15-25.