

# Détection d'anomalies dans le sous-sol à partir d'ondes de surface. Méthode DCOS

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

Philippe GRANDSERT, SNCF, Direction de l'Ingénierie, Division LGOT Département des Etudes de Lignes Ouvrages en Terre, 6 av. François MITTERRAND 93574 La Plaine St Denis cedex, Tél : 01 41 62 02 91, Fax : 01 41 62 48 57, e-mail: [philippe.grandsert@sncf.fr](mailto:philippe.grandsert@sncf.fr)

Serge NEBIERIDZE, SNCF, Direction de l'Ingénierie, Département des Etudes de Lignes, Division des Ouvrages en Terre, 6 av François Mitterrand, 93574 La plaine Saint Denis cedex, Tel : 01 41 62 02 75, Fax: 01 41 62 48 57

## Introduction

La recherche de cavités, de zones décomprimées, est devenue aujourd'hui une problématique de premier ordre. Afin de répondre à cette demande, nous avons développé et breveté au niveau européen, une méthode de détection d'anomalies appelée DCOS (Détection de Cavités par Ondes de Surface) qui utilise les propriétés de propagation des ondes de surface de type Rayleigh. De nombreux travaux concernant l'analyse de ce type d'onde par une approche MASW ont montré qu'il était possible, par une inversion numérique, d'avoir accès aux propriétés de cisaillement du sous-sol (Park *et al.*, 1999 ; Abraham *et al.*, 1999 ; Louis J.N., 2001 ; Young Ho Cha *et al.* 2006). Nous présentons ici les principes de base de l'analyse par DCOS, qui ne nécessite pas d'inversion numérique, ainsi que la corrélation des résultats obtenus avec ceux d'une campagne de forage.

## Onde 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.

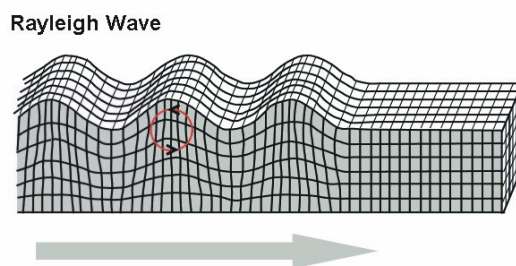


Fig. 1 : propagation des ondes de Rayleigh

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 voisine de la longueur d'onde.

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 .... Cette interprétation peut être réalisée aussi bien avec des tirs classiques qu'avec une analyse du microtremor ambiant qu'il soit anthropique ou non.

## Principes du DCOS

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. La figure 2 montre le cas d'un milieu sans anomalie.

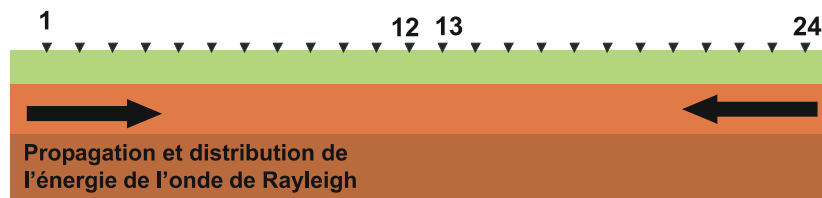


Fig. 2 : sous-sol sans inhomogénéités

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 inhomogénéités, 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.

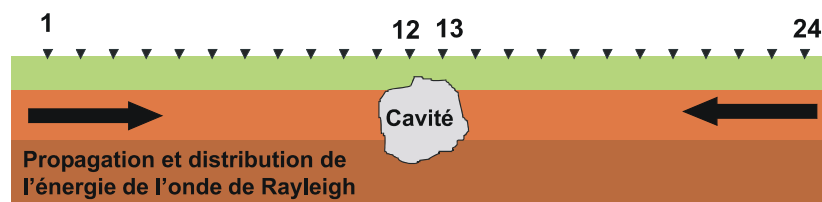


Fig. 3 : sous-sol avec une inhomogénéité

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 directe 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  $\lambda$  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.

## Développement de la méthode dans le contexte ferroviaire

A la demande de la SNCF, la méthode DCOS a été mise en œuvre sur les voies ferrées pour le compte et sur financement RFF et ce afin de compléter les méthodes employées pour maîtriser l'aléa cavités. L'objectif est la détection de cavité avant que leur évolution n'affecte l'infrastructure et ce dans différents types de contexte (géologique, ferroviaire).

Les différentes opérations ont permis de définir une méthodologie à adapter en fonction du site (notamment en fonction du niveau de bruit) et des contraintes ferroviaires (exploitation, gare, etc...).

## Equipements

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

Les figures 4 et 5 présentent une configuration d'utilisation de cet équipement ainsi qu'un géophone posé sur le sol.



Fig. 4 : dispositif le long d'une voie ferrée



Fig. 5 : Géophone connecté à la « flûte »

Aujourd'hui, nous utilisons aussi bien une géométrie de mesures modulables qu'une géométrie plus figée. La modulable est constituée de 72 géophones dont la distance entre capteur peut varier de 1 à 3 mètres ce qui permet d'avoir des dispositifs variant de 71 à 213 mètres de long. La géométrie « figée » est composée de 96 géophones espacés de 2 mètres qui nous permet d'avoir une flûte sismique de 190 mètres de long.

## 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.

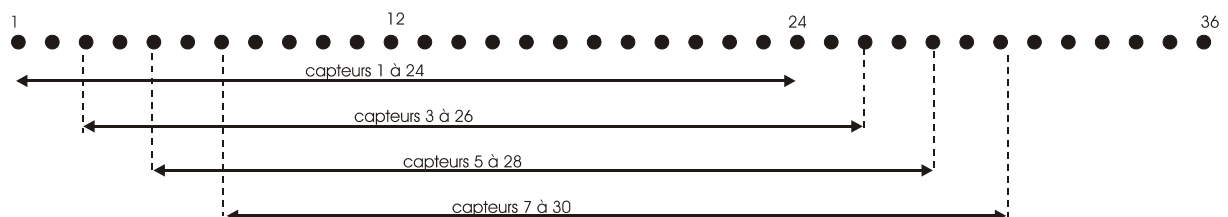


Fig. 6 : Traitement réalisé sur les acquisitions : extraction de géophones

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

deux capteurs. De même, pour une analyse avec 48 capteurs nous obtenons au final pour un dispositif d'acquisition, 49 analyses par DCOS.

La méthodologie se décompose de la manière suivante :

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

## Résultats

Le traitement par DCOS appliqué pour chacune des fenêtres d'analyse permet, au final, d'avoir une représentation en deux dimensions où sont représentées les variations d'énergie. La figure 7 présente les résultats d'une étude par DCOS qui a été suivie d'une campagne de forages.

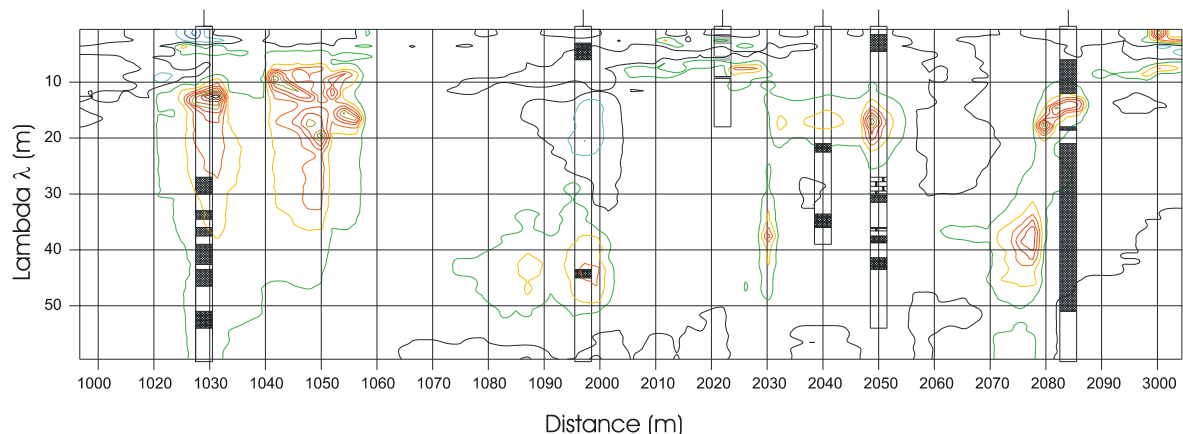


Fig. 7 : comparaison des résultats obtenus par analyse DCOS et par une campagne de forages

Sur cette figure, l'axe horizontal est l'axe des distances et l'axe vertical celui des profondeurs exprimées en longueur d'onde. Une profondeur approximée peut être obtenue en divisant les valeurs de longueur d'onde par 3. Ces résultats ont été obtenus à partir d'une fenêtre d'analyse (extraction des traces sismiques) composée de 48 capteurs

Les variations d'énergie relevées sont représentées avec une palette de couleur et les anomalies correspondent aux couleurs allant du vert au rouge. Les parties hachurées dans les descriptions des sondage représentent des taux allant de 40% à plus de 80 de calage du vide.

On observe une bonne corrélation entre les anomalies détectées par DCOS et les résultats obtenus par forage et ceci jusqu'à une profondeur d'environ 15 mètres (45 mètres en longueur d'onde).

## Conclusion

La méthode DCOS permet à partir de la mesure du microtremor, de localiser en distance mais aussi en profondeur des hétérogénéités (cavités formées ou en formation, zones décomprimées, variations de terrain) présentes dans le sous-sol. Il est possible par ce type de mesures de s'affranchir des problèmes de couplage de source sismique avec le sol, mais aussi d'environnements bruyants (autoroute, industries ...), certaines perturbations sont tout de même à éviter (machines à l'arrêt moteur en marche par exemple). A partir des données acquises, l'analyse DCOS qui ne nécessite pas de modèle d'inversion numérique, peut aussi être complétée par une analyse de type MASW classique permettant la détermination des caractéristiques de cisaillement du sous-sol. Ces approches aident à une meilleure compréhension des milieux oscultés et ceci sur de grands linéaires ou de grandes surfaces.

## Bibliographie

Abraham O. et al. (1999) – Procédure expérimentale multi-capteurs pour l'enregistrement et le traitement des ondes de surface. Actes du 2<sup>ème</sup> colloque de géophysique des sols et des formations superficielles, 1999, 113-117.

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.

Park C.B., Miller R.D. and Xia J. (1999) – Multi-channel analysis of surface wave. Geophysics, vol.64, p800-808.

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.