

# Méthodes Géophysiques Appliquées aux Problèmes Géotechniques en Milieu Urbain : Tomographie Sismique Cross-hole, Sismique Passive et Sismique Parallèle

Some Experiences of the Application of Cross-hole Seismic Tomography, Passive Seismic and Parallel Seismic Methods to Geotechnical Studies in Urban Areas

T. Granda París

*International Geophysical Technology, Madrid, Spain*

A. Madrid Contreras

*International Geophysical Technology, Madrid, Spain*

A. Granda Sanz

*International Geophysical Technology, Madrid, Spain*

## RÉSUMÉ

La connaissance détaillée du sous-sol urbain suppose un défi auquel doivent répondre géotechniciens et ingénieurs civils. Les éléments souterrains existants aux alentours d'un chantier en milieu urbain (tunnels, structures, canalisations, etc) constituent un problème majeur, étant donné que l'information à leur propos fait souvent défaut. Déterminer de façon précise les caractéristiques géotechniques des chantiers urbains n'est pas une tâche toujours facile, mais il existent cependant quelques moyens fiables et rapides pour y parvenir. En raison de leur qualité non-destructive, l'emploi de méthodes géophysiques s'avère être un outil fondamental pour la résolution de ce type de problèmes, notamment les méthodes basées sur les principes de transmission des ondes sismiques à travers le sous-sol. Parmi elles, la Tomographie Sismique Cross-hole, la Sismique Passive et la Sismique Parallèle sont des méthodes simples et efficaces qui fournissent des résultats dont l'intérêt et la précision sont indiscutables.

## ABSTRACT

Underground works carried out in urban environments require access to highly detailed knowledge of underground features, such as potential anthropic elements, foundations, sewers, structures, etc. Precise determination of the geotechnical characteristics of the work areas and their surroundings is a great challenge for engineers confronted with urban workings, and is not always feasible. By being non-destructive, Geophysical methods have become a widely known tool in these situations and have acquired a leading role in the solution of these problems, specially those based on the transmission of seismic waves. Cross-hole Seismic Tomography, Passive Seismic and Parallel Seismic measurements have proved to provide precise information of significant geotechnical interest.

Keywords: géophysique, chantiers urbains, tomographie sismique, sismique passive, sismique parallèle.

## 1 INTRODUCTION

La connaissance détaillée du sous-sol urbain suppose un défi auquel doivent faire face géotechniciens et ingénieurs civils. L'existence d'éléments souterrains (d'origine anthropique le plus souvent, tels que tunnels, canalisations, pieux, etc) à proximité des chantiers constitue un problème non négligeable. Déterminer de façon précise les caractéristiques géotechniques des chantiers urbains n'est pas une tâche toujours facile, mais il existent cependant quelques moyens fiables et rapides pour y parvenir. Malheureusement ce genre d'information n'est pas toujours à portée de main. Il n'est pas toujours faisable d'obtenir des renseignements utiles à partir de mesures ou d'essais en forages ou en

surface en raison des multiples interférences induites par l'activité humaine aux alentours et en-dessous des zones d'intérêt. En raison de leur qualité non-destructive, l'emploi de méthodes géophysiques s'avère être un outil fondamental pour la résolution de ce type de problèmes, notamment les méthodes basées sur les principes de transmission des ondes sismiques à travers le sous-sol. Nous présentons à la suite quelques exemples d'application de trois méthodes géophysiques sismiques : Tomographie Sismique Cross-hole (que nous appellerons TSCH à partir de maintenant), Sismique Passive et Sismique Parallèle, correspondent à des études réelles qui ont eu lieu à Madrid, Santander et Molina de Segura. Les résultats obtenus fournissent une information

précise et dont l'indéniable intérêt géotechnique mérite leur divulgation.

Le premier exemple réel que nous allons exposer concerne l'utilisation des mesures de TSCH lors de la construction des nouvelles pistes de l'aéroport de Madrid Barajas, pour localiser des anciennes galeries minières. Un autre exemple d'application des mesures de TSCH concerne la reconnaissance du terrain sous un des piliers du Pont de Segovia à Madrid, après des travaux de consolidation et d'amélioration du terrain. Le but de ces mesures fut de déterminer l'efficacité du traitement du terrain.

Pour le cas de la Sismique Passive, nous avons choisi deux exemples ayant différents objectifs. Lors des travaux de creusement d'un tunnel urbain à Santander, l'emploi de mesures de Sismique Passive sur toute la longueur du tracé (1.200 mètres) permet de connaître l'épaisseur et la distribution des matériaux anthropiques, ainsi que les limites de la zone altérée du substrat rocheux. Le second exemple correspond à un projet de construction de lotissements à Molina de Segura. Finalement, notre dernier exemple concerne des mesures de Sismique Parallèle qui eurent lieu dans la banlieue de Madrid. L'objectif fut de déterminer la longueur des pieux de fondation de deux bâtiments situés au-dessus du parcours de nouveaux tunnels prévus pour le Plan d'Elargissement du Réseau de Métro de Madrid 2003-2007.

## 2 TOMOGRAPHIE SISMIQUE CROSS-HOLE

Dans le sens le plus large une Tomographie Sismique Cross-hole est la détermination détaillée de la distribution d'un paramètre sismique du terrain dans l'espace compris entre deux forages relativement proches entre eux.

Parmi les différents paramètres physiques du terrain, un des plus significatifs dans le cadre de la géotechnique et le génie civil est la vitesse de transmission des ondes de compression ( $V_p$ ) à travers lui. Etant donné que les valeurs de  $V_p$  dépendent du degré de compacité et intégrité des matériaux en place, et sont donc en rapport direct avec la qualité des massifs rocheux, son importance est grande pour les études géotechniques.

Les hétérogénéités potentielles et ponctuelles du terrain (zones de faille, comblements, zones d'altération, cavités, contacts géologiques) se caractérisent par des contrastes remarquables des valeurs de  $V_p$  par rapport à celles du milieu rocheux, et sont donc susceptibles d'être détectées et caractérisées à partir de mesures réalisées entre forages.

Par essence, l'exécution de ce genre de mesures se fait en situant dans un des forages une flûte de senseurs (hydrophones), espacés régulièrement, et suffisamment longue pour dépasser en longueur l'espace que l'on veut étudier. Ces senseurs

enregistrent le signal sismique produit à un certain point (à une certaine profondeur) d'un deuxième forage à l'aide d'un système capable de générer uniquement des ondes de compression.

Une fois le signal enregistré pour une certaine position des senseurs et du point d'émission des ondes, ce dernier se déplace le long du forage jusqu'à une nouvelle position ; la démarche se répète itérativement jusqu'à ce que le point émetteur du signal parcoure la longueur totale du forage dans lequel il se trouve logé. La flûte d'hydrophones reste immobile pendant ces opérations.

Le traitement des données obtenues est schématisé par la Figure 1. On distingue trois étapes.

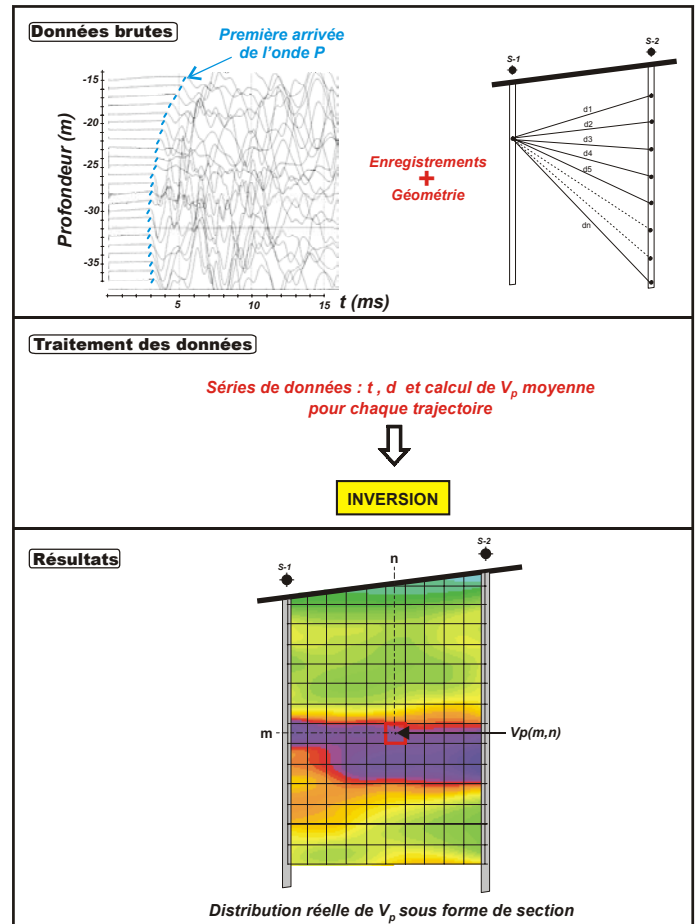


Figure 1. Traitement des données de TSCH

En premier lieu il est indispensable de connaître le plus exactement possible les distances entre chaque hydrophone et chacun des points de tir utilisés. La connaissance de la géométrie de notre dispositif de mesure est fondamentale pour aboutir à des résultats cohérents et de bonne qualité. Ensuite il s'agit d'identifier la première arrivée des ondes de compression à chaque senseur, et ceci pour chacun des points de tir. On calcule ainsi le temps mis pour chaque trajet "point de tir-hydrophone". Finalement, la dernière phase du traitement des données est leur inversion, dont le résultat final est l'obtention des valeurs de  $V_p$  pour chacune des cellules de la section de terrain comprise entre les deux forages étudiés. Le résultat final des mesures est une section de

l'espace compris entre les deux forages utilisés pour la prise de données (Figure 1), qui montre la distribution continue des valeurs de  $V_p$ . Identifier des particularités du terrain dans cette section en raison des contrastes des valeurs de  $V_p$  est immédiat.

Nous présentons ci-dessous deux exemples d'application de cette méthode. Le premier correspond à la localisation d'une galerie minière sous les nouvelles pistes de l'aéroport de Madrid (Figure 2). La galerie se trouvait quelque part entre les forages A, B, C et D. Les mesures géophysiques entre les forages montrèrent l'existence de la galerie à une profondeur d'environ 15 mètres, située entre les forages C et D.

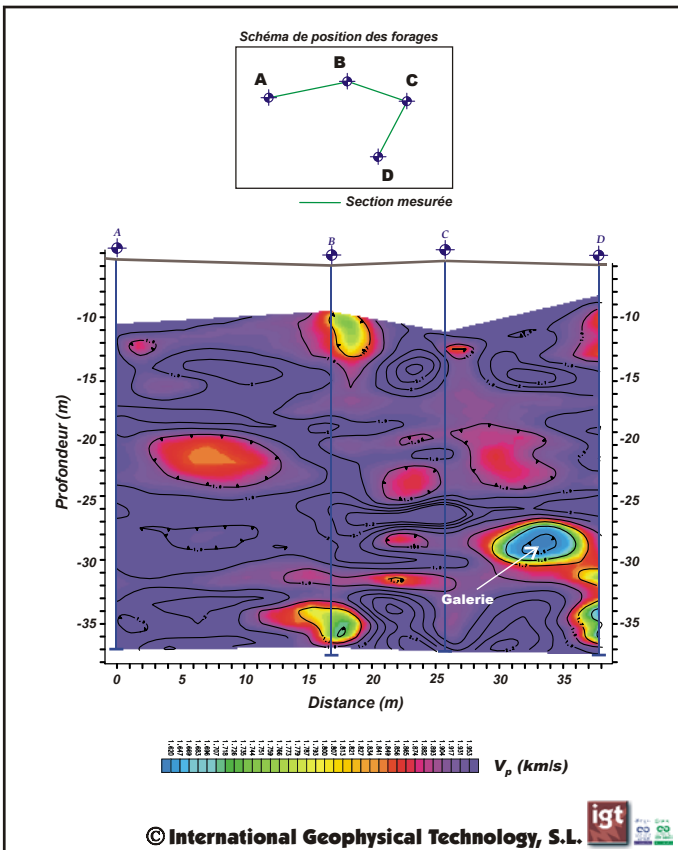


Figure 2. Localisation d'une galerie à l'endroit prévu pour la construction de nouvelles pistes de l'aéroport de Madrid

Le deuxième exemple fut aussi obtenu à Madrid, lors de l'auscultation des piliers du Pont de Segovia, après un traitement d'amélioration du terrain à l'aide d'injection de coulis de ciment. Les résultats fournirent l'information nécessaire pour connaître les zones ayant encore une faible capacité mécanique, tel que le montre la Figure 3.

### 3 SISMOLOGIE PASSIVE

Lorsque les caractéristiques des zones de chantier sont telles que l'application de méthodes géophysiques conventionnelles devient non-viable (chantiers urbains, notamment), il est nécessaire de recourir à d'autres techniques permettant de

contourner ces inconvénients. Les méthodes sismiques "traditionnelles", basées sur la détermination des valeurs de  $V_p$ , deviennent quasiment inutiles.

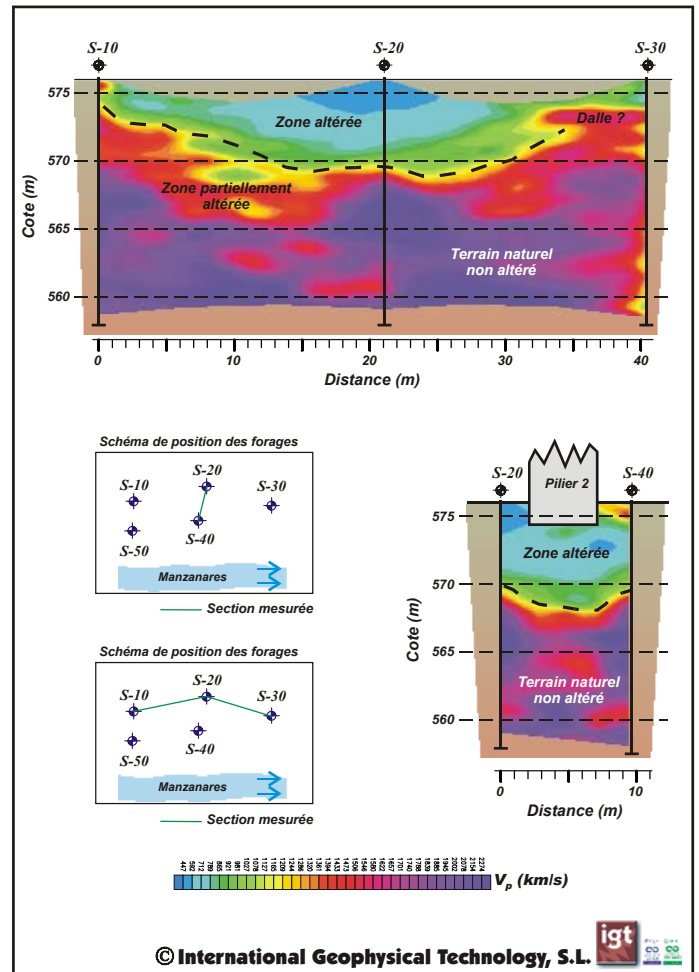


Figure 3. Sections de distribution des valeurs de  $V_p$  obtenues sous le Pont de Segovia (Madrid)

Les particularités de la Sismologie Passive qui en font une méthode largement plus avantageuse que les autres méthodes sismiques dans les zones urbaines sont sa capacité à détecter des zones où se produisent des inversions de vitesse et le fait d'employer le bruit de l'environnement comme source du signal sismique à mesurer.

La Sismologie Passive est une méthode de développement récent, qui apparaît souvent appelée *Refraction Microtremor* (ReMi), et qui a des similitudes avec d'autres méthodes connues, SAWS (*Spectral Analysis of Surface Waves*) et MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), ces deux dernières méthodes concernant l'étude des ondes de surface du type *Rayleigh*. L'objectif principal est de déterminer la distribution des valeurs de transmission des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) à travers le terrain, à partir de l'analyse spectrale du bruit sismique environnant, qui est convenablement enregistré.

En dépit de sa jeunesse, la Sismologie Passive a prouvé qu'il s'agit d'une option fiable lorsqu'il s'agit de caractériser en termes géotechniques le

terrain urbain ou à proximité d'autoroutes, aéroports ou voies ferrées. Ce sont là des milieux où le niveau de bruit ambiant empêche la mise en place d'autres types de dispositifs sismiques.

La connaissance de la distribution des valeurs de  $V_s$  du terrain est un aspect incontournable à tenir en compte lors des projets d'intervention géotechnique. Ces valeurs dépendent spécifiquement du degré de contact entre les matériaux et de la cohésion entre leurs grains, sans que le contenu en eau ait aucune influence. Le but principal des mesures est donc l'évaluation de la consistance du terrain.

Ceci est possible à partir de l'analyse des ondes superficielles (Rayleigh) qui font partie du bruit sismique ambiant (parmi ce bruit sismique on trouve des ondes de compression, des ondes de cisaille, des réfractions, des réflexions, des ondes directes...). A l'aide de la transformée bidimensionnelle de Fourier et de calculs que nous ne développerons pas ici, on arrive à isoler les ondes de Rayleigh des enregistrements sismiques et à connaître leur vitesse  $C_R$ , vitesse de phase. A partir de là on calcule facilement les valeurs de  $V_s$  en employant la formule :

$$C_R = 0,94 V_s \quad (1)$$

Une fois que les données ont été enregistrées et traitées on arrive donc à construire un modèle de la distribution des valeurs de  $V_s$  en suivant le processus de la Figure 4, qui se fait en trois étapes.

La représentation graphique des résultats peut se faire sous forme de diagrammes 1D ou de sections 2D distance-profondeur (Figure 5), selon le type de dispositif (configuration géométrique des géophones) employé pour faire les mesures.

Les exemples que nous avons choisi correspondent à des représentations 2D et 1D. La section de la Figure 6 représente le sous-sol sous le tracé d'un tunnel urbain à Santander. Grâce aux mesures linéales de Sismique Passive on put déterminer la structure géologique du terrain, une information importante à tenir en compte à l'heure de concevoir les caractéristiques de soutien de l'excavation. Les forages perforés par la suite coïncidèrent totalement avec les résultats géophysiques.

La Figure 7 montre le cas d'une étude ponctuelle à Molina de Segura (résultats sous forme de diagramme 1D) visant à déterminer le paramètre  $V_{s30}$ , auquel l'International Building Code (IBC) accorde une importance non négligeable. La méthode Sismique Passive permet de calculer les valeurs de ce paramètre pour un terrain de construction de lotissements. Les mesures géophysiques furent réalisées dans le but spécifique de savoir si le terrain proposé était conforme aux normes de sécurité sismologiques, en particulier en

ce qui concerne les valeurs minimum acceptables pour la vitesse de transmission des ondes de cisaille.

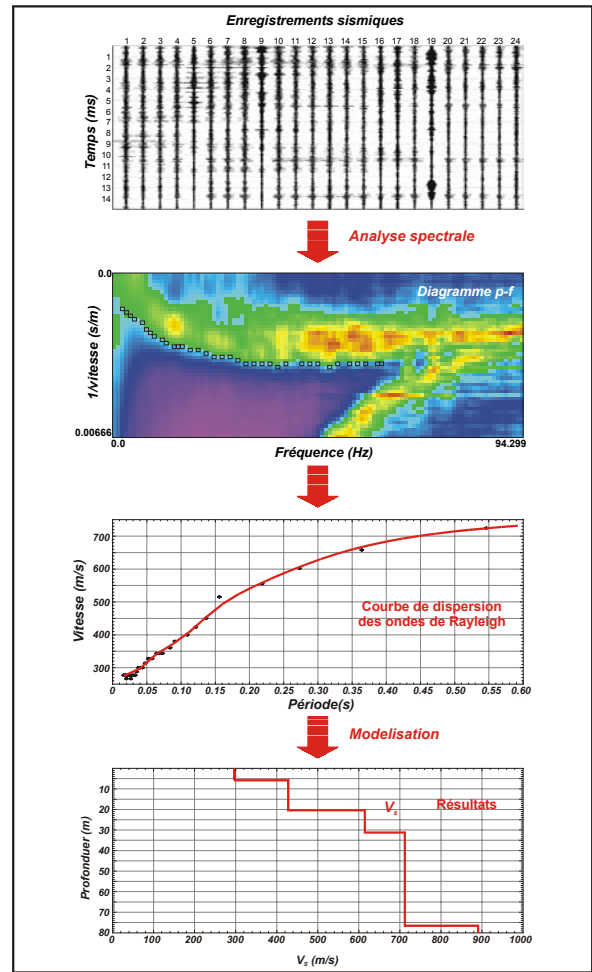


Figure 4. Traitement des données de Sismique Passive

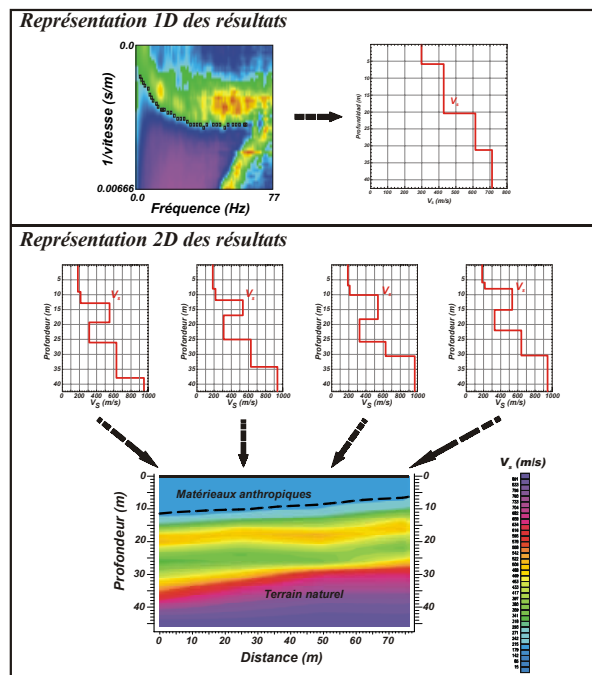


Figure 5. Représentation des données (diagrammes 1D ou sections 2D)

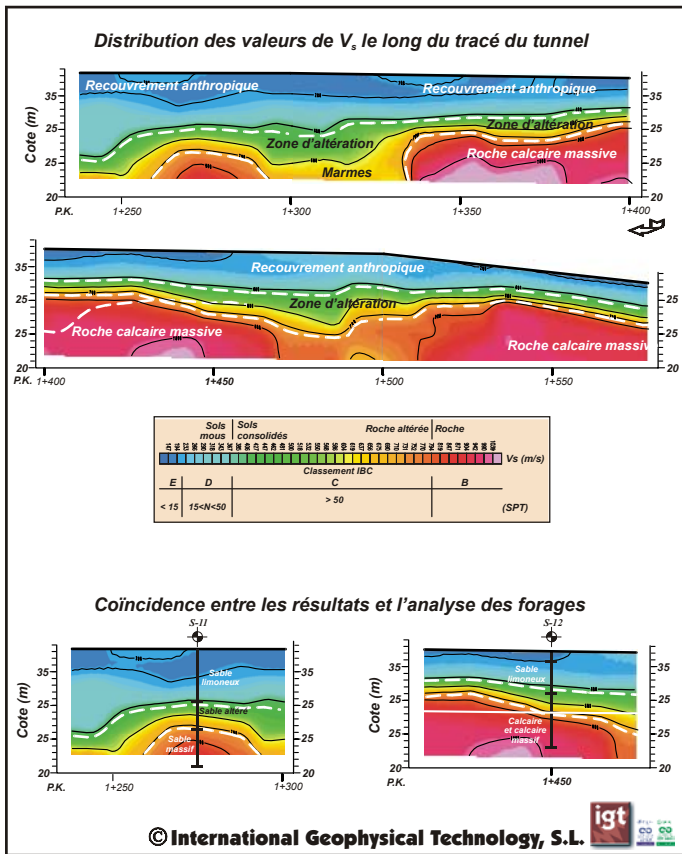


Figure 6. Structure géologique du sous-sol obtenue par des mesures de Sismique Passive à Santander, suivant le tracé d'un futur tunnel urbain

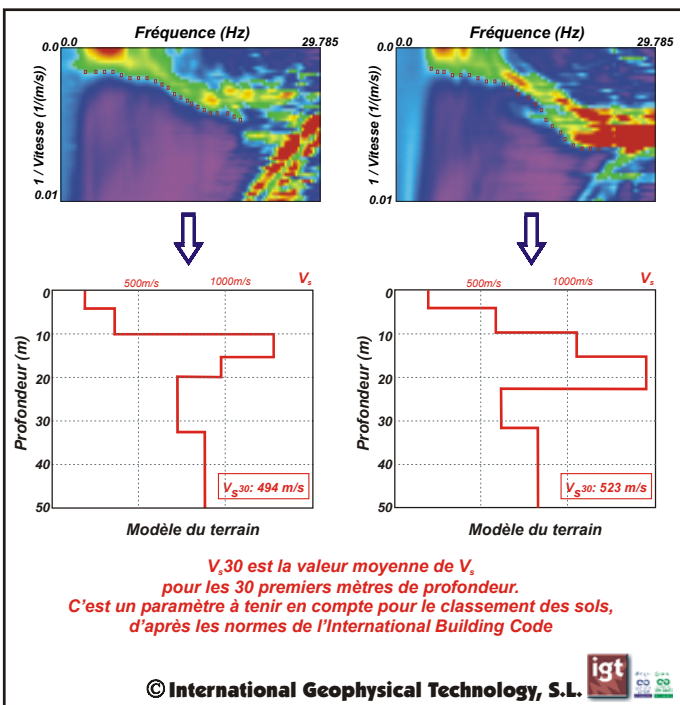


Figure 7. Diagrammes 1D de distribution des valeurs de  $V_s$  en fonction de la profondeur correspondant à un terrain où l'on prévoit de construire des lotissements (Molina de Segura)

#### 4 SISMIQUE PARALLÈLE

La méthode géophysique appelée Sismique Parallèle consiste en la réalisation de mesures style

*down-hole* dans un forage perforé à proximité d'un pieu ou d'un mur de fondation, l'objectif étant d'obtenir des renseignements à propos de leur continuité, leur intégrité et leur longueur.

Pour y aboutir, il faut générer un signal sismique en frappant verticalement le bout du pieu ou bien, dans le cas des mur de fondation, verticalement le plus près possible du mur que l'on veut caractériser. La transmission de ce signal sismique est enregistrée à l'aide de plusieurs senseurs (géophones) régulièrement espacés et placés à l'intérieur du forage.

Les résultats obtenus seront représentatifs si certaines conditions concernant le forage sont respectées : il doit être parallèle au pieu ou au mur, la distance entre eux ne doit pas dépasser 2 mètres et sa profondeur doit dépasser largement celle du pieu ou du mur.

Le traitement des données de ce genre de mesures consiste principalement à construire les graphiques temps-distance ou dromochrones. Après avoir identifié la première arrivée de l'onde de compression à chacun des géophones placés à l'intérieur du forage, on calcule le temps mis par celle-ci pour atteindre les senseurs. Ces temps calculés nous permettent de construire le diagramme temps-distance qui montre le temps de parcours de l'onde P pour arriver à chacun des senseurs (c'est à dire pour chaque profondeur). Ce diagramme constitue le document principal de synthèse des mesures, ainsi que la base à partir de laquelle s'effectue l'interprétation des résultats. La Figure 8 montre un le schéma classique d'acquisition des données et de construction du graphique temps-distance.

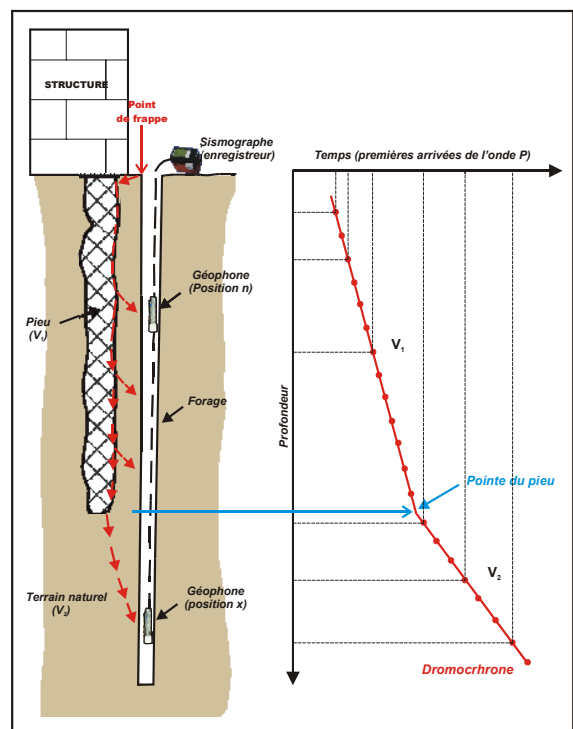


Figure 8. Acquisition des données et obtention des résultats en Sismique Parallèle

La base du pieu ou du mur est mise en évidence par un changement brusque de pente de la dromochrone. La première partie de la courbe est normalement affectée exclusivement par la présence du mur ou du pieu, qui ont des valeurs de transmission des ondes P supérieures à ceux du terrain naturel environnant. En dessous, une fois dépassée la pointe du pieu ou la fin du mur, l'effet du terrain naturel modifie l'allure de la courbe et se pente change. Ce changement de pente est d'autant plus accentué que le contraste de valeurs de  $V_p$  est important. Néanmoins il est toujours visible sur les dromochrones.

Déterminer la longueur des pieux de fondation de deux bâtiments situés au-dessus du parcours de nouveaux tunnels prévus pour le Plan d'Elargissement du Réseau de Métro de Madrid 2003-2007 fut l'objectif du dernier exemple réel que nous présentons. Les dromochrones obtenues et représentées sur la Figure 9 ont toutes un changement brusque de pente, qui correspond au bout des pieux auscultés. Les résultats fournissent la longueur des pieux, et donc permettent d'estimer la distance de leurs pointes à la voûte du tunnel qui se creuserait en-dessous.

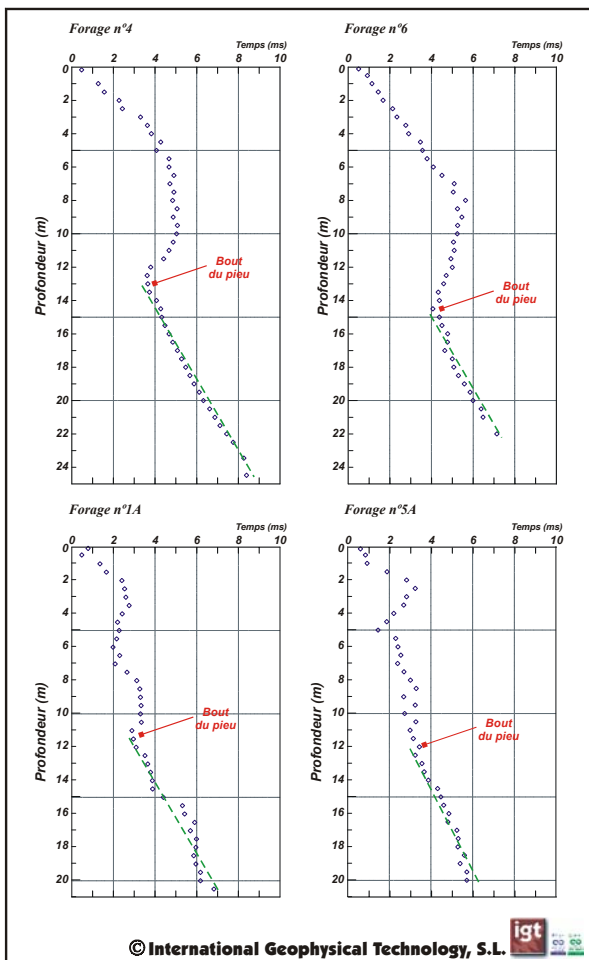


Figure 9. Dromochrones montrant les profondeurs auxquelles se situe le bout de plusieurs pieux de fondation (San Fernando de Henares, Madrid)

## 5 CONCLUSIONS

Les méthodes géophysiques sismiques exposées dans cet article ont prouvé leur capacité pour résoudre simplement et efficacement les problèmes qui surgissent souvent en travaillant dans des chantiers urbains. Egalement, leur mise en oeuvre facile et peu coûteuse en fait des outils attrayants et de plus en plus populaires.

Les cas réels qui ont donné lieu aux exemples que nous avons exposés permirent d'apprécier les compétences de ces méthodes géophysiques sismiques et d'estimer leur performance pour résoudre des situations qui autrement auraient eu une solution longue, incertaine et sûrement beaucoup plus coûteuse.

Néanmoins, même s'il serait souhaitable de pouvoir faire face à n'importe quel "imprévu géotechnique" avec ces techniques, il faut savoir quand et comment les employer. Il ne faut jamais perdre de vue que même l'outil le plus puissant perd son efficacité et ses qualités s'il est manipulé par un usager peu rigoureux ou dans des conditions qui déconseillent son utilisation. Ce ne sont pas des techniques infallibles, mais les résultats qu'elles fournissent sont le plus souvent largement satisfaisants.

## 6 REFERENCES

- Granda A. 2004. Comentarios a algunos métodos sísmicos aplicados al estudio del subsuelo en el ámbito de la geotecnia. *Curso de Geotecnia para Infraestructuras, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Andalucía*.
- Granda, A. et al. 2005. El método de la Sísmica Pasiva. Una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en medios urbanos. *Ingeopress number 137*, pp. 78-84.
- Granda A. et al. 2002. El método de la Tomografía Sísmica Cross-hole para el estudio detallado del subsuelo. *Ingeopress*.
- Kak A.C. and Slaney M. 1988. Principles of Computerized Tomographic Imaging. *IEEE Press New York*.