

ESSAIS CROSS HOLE : NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS POUR LA RÉALISATION ET L'INTERPRÉTATION

CROSS HOLE SEISMIC TESTING: NEW DEVELOPMENTS FOR MEASUREMENT AND INTERPRETATION

Christophe BODARD¹, Jean Luc MATTIUZZO²

¹INNOGEO®, Chambéry, France

²INNOGEO®, Chambéry, France

RÉSUMÉ – Les expérimentations récentes associées aux retours d'expérience d'INNOGEO® ont permis de nouveaux progrès de la méthodologie d'acquisition et d'interprétation des essais Cross Hole, en particulier pour les terrains moins propices à la transmission des ondes P ou S. Ces améliorations intègrent la mise en œuvre de différentes méthodes géophysiques complémentaires et de nouveaux matériels.

ABSTRACT– Recent experiments in accordance to INNOGEO® experience feedback led to further progress of the measurement and interpretation methodology of Cross Hole seismic testing, particularly in case of poor soil conditions for the transmission of P or S waves. These improvements include the implementation of different complementary geophysical methods and new equipment.

1. Introduction

L'essai sismique Cross Hole est utilisé par INNOGEO® pour la détermination des paramètres dynamiques du sol dans le cadre de projets nécessitant des calculs d'interaction sol-structure, et plus particulièrement encore en cas de risque de liquéfaction des sols au droit d'un ouvrage.

Les expérimentations récentes associées aux retours d'expérience d'INNOGEO® ont permis de nouveaux progrès de la méthodologie d'acquisition et d'interprétation, en particulier pour les terrains moins propices à la transmission des ondes P ou S.

Ces développements ont débouché sur une nouvelle procédure de mesure INNOGEO®, combinant la méthode Cross Hole à différentes méthodes géophysiques d'acquisition sismique telles que l'essai Down Hole, la Tomographie Sismique, la MASW, ainsi qu'à la mise en œuvre de différentes sources sismiques. La méthodologie d'acquisition est ainsi établie en amont de l'étude sur la base des données géologiques du site et peut être ensuite directement adaptée sur le terrain pendant les essais.

L'interprétation conjointe des différentes données d'entrée (géologie, coupes de sondage, essais de laboratoire, acquisitions géophysiques,...) permet de contraindre le log des vitesses des ondes de cisaillement et de compression et ainsi de fiabiliser les résultats des essais sismiques.

2. Principe de la méthode

L'essai Cross-Hole consiste à mesurer les temps de propagation des ondes sismiques de compression (ondes P) et de cisaillement (ondes S) entre plusieurs forages afin de déterminer, en fonction de la profondeur, leurs vitesses sismiques et les paramètres

dynamiques que sont le module d'Young, E_d , le module de cisaillement G_d et le coefficient de Poisson. Il permet également de déterminer la vitesse harmonique $V_{S,30}$ qui sur la base de l'EUROCODE 8 définit la classe de sol.

Les essais sont en général réalisés avec un pas variable suivant les objectifs de l'étude mais typiquement de 1, 2 ou 3 m. On réalise la mesure entre une sonde sismique émettrice placée dans un forage « émetteur » et une ou plusieurs sondes réceptrices placées à la même profondeur dans les forages « récepteurs ».

L'essai se fait idéalement avec trois forages en ligne afin de mesurer les vitesses des ondes de compression et de cisaillement par différence entre les deux forages récepteurs, en s'affranchissant ainsi du déclenchement de la source qui peut générer des erreurs de mesure des temps, ce dispositif est celui recommandé par INNOGEO®. De plus, si une anisotropie est suspectée sur le site, il peut être envisagé de compléter le dispositif de trois forages avec deux forages disposés perpendiculairement et en ligne avec le forage émetteur (forme de « L »).

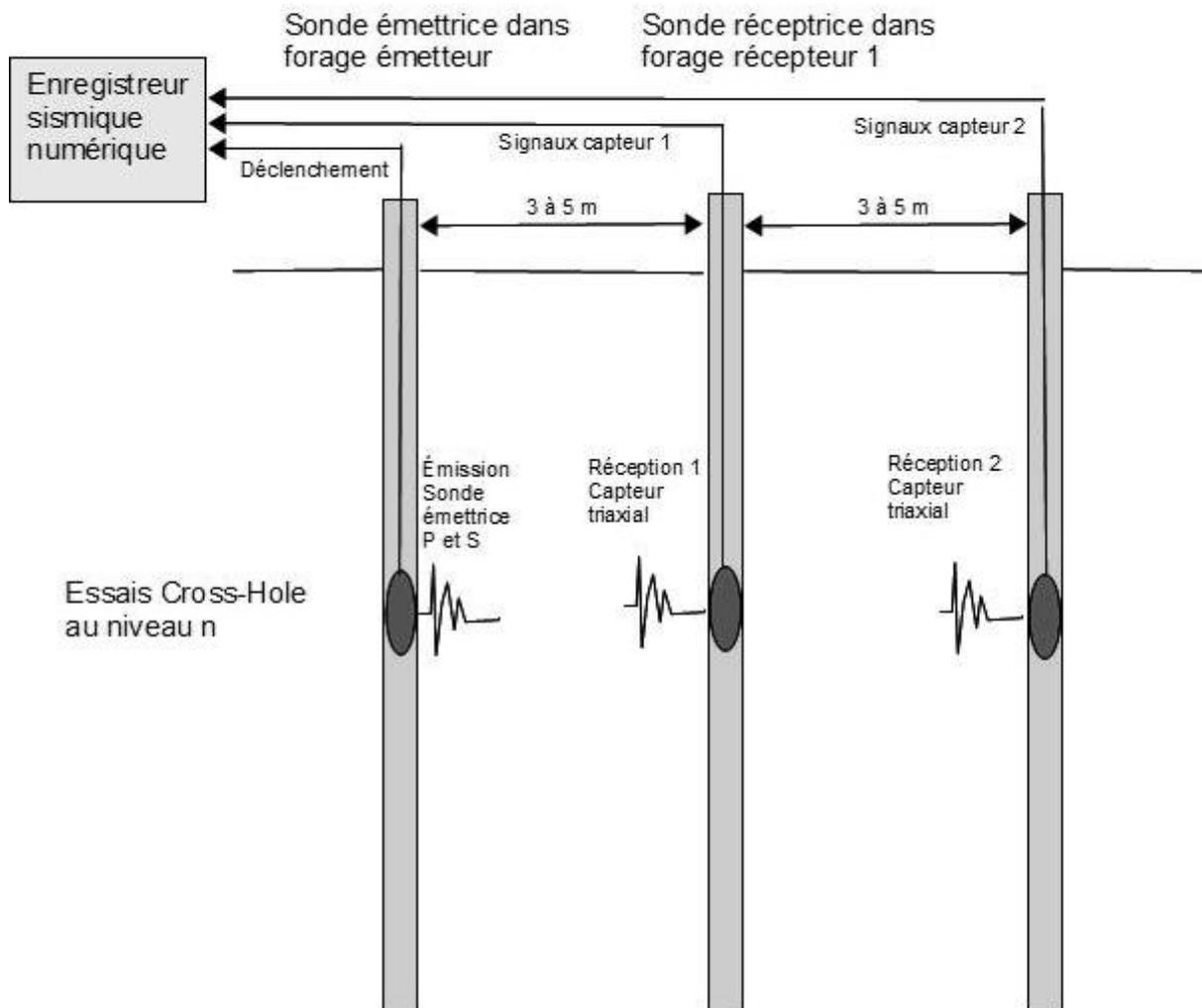


Figure 1. Schéma de principe de l'essai Cross Hole

La source sismique, disposée dans le forage « émetteur » peut être de deux types :

- Source mécanique de type Ballard : elle comporte une masse sismique mobile et un dispositif de plaquage pneumatique. En frappant alternativement vers le haut et vers le bas, la source produit alternativement une onde S polarisée verticalement (Sv), vers le haut, puis vers le bas en même temps que l'onde P, qui n'est pas, quant à elle, polarisée. L'onde S est ainsi mieux identifiée dans le train d'ondes ;
- Source piézo électrique de type étinceleur généralement appelé Sparker : un générateur délivre une impulsion électrique qui via un étinceleur produit une onde mécanique dans le sol. Selon l'embout utilisé, il est généré une onde de compression P ou bien une onde de cisaillement S, polarisée horizontalement (Sh). Pour les ondes de cisaillement, la source comporte un dispositif de plaquage pneumatique.

Les sondes sont munies d'un capteur de déclenchement qui est relié à l'enregistreur et permet la synchronisation précise du choc et du déclenchement de l'enregistrement.

Les ondes sismiques sont mesurées dans les forages « récepteurs » à l'aide de sondes sismiques réceptrices également plaquées à la paroi du forage par un système d'ancrage mécanique ou pneumatique. Les sondes comportent un ensemble de trois capteurs orientés à 90° les uns des autres (un vertical et deux horizontaux disposés à 90° l'un de l'autre). Cette disposition de capteurs permet, lors de l'essai Cross-Hole, une bonne identification des trains d'ondes S (Sv ou Sh)

Les mesures sont effectuées à différents niveaux de profondeur afin d'obtenir une coupe des vitesses des ondes P et S en fonction de la profondeur. Les paramètres dynamiques et la vitesse harmonique VS,30, définie par l'Eurocode 8 comme la moyenne harmonique des vitesses des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres de terrain, sont ensuite calculés en utilisant les formules suivantes :

$$\text{Coefficient de Poisson} : \nu = \frac{(V_p^2 - 2 \times V_s^2)}{2 \times (V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

$$\text{Module de Young} : E_d = 2 \times \rho \times V_s^2 \times (1 + \nu) \quad (2)$$

$$\text{Module de cisaillement} : G_d = \rho \times V_s^2 \quad (3)$$

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}} \quad (4)$$

Vp et Vs sont respectivement les vitesses des ondes de compression et de cisaillement et sont exprimées en mètre par seconde (m/s). Le calcul de Ed et de Gd nécessite de connaître ou de faire une hypothèse sur la masse volumique des terrains traversés.

Hormis dans le cas où le forage est effectué en terrain rocheux et ne présente aucun risque d'éboulement ou de coincement de la sonde, la réalisation des essais Cross-Hole nécessite la mise en place d'un tubage PVC de protection afin d'éviter tout éboulement sur la sonde et son coincement. Le tubage, de diamètre intérieur 80 mm, et d'épaisseur 4 à 5 mm, doit être scellé à la paroi du forage au coulis de ciment sur toute la hauteur. Il doit être bouché en pied et parfaitement étanche, les tubes devant être à raccords vissés et collés. De la qualité du scellement dépend en partie la qualité des résultats des essais. Les essais doivent être réalisés au plus tôt une semaine après la réalisation des scellements afin que le coulis atteigne une résistance mécanique suffisante. Des mesures de déviation des forages sont réalisées en même temps que les essais Cross-Hole pour connaître précisément la distance entre la source et les capteurs à chaque niveau d'essai.

Les premiers mètres de terrain, généralement déconsolidés, ne permettent pas toujours d'obtenir des signaux de qualité. Il en est de même dans certains terrains hors nappe, comme les alluvions par exemple. Dans ce cas, la détermination des vitesses et des modules dynamiques peut s'avérer imprécise, voire impossible.

La réalisation des essais Cross Hole par INNOGEO® se conforme à la fiche AGAP Qualité 92.1 SIS 25 (SISMIQUE « CROSS HOLE ») ainsi qu'à la norme américaine ASTM D 4428/D 5528 M (Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing).

3. Développement et amélioration de la méthodologie d'acquisition

La méthode Cross Hole, dans la pratique, peut être limitée par un certain nombre de facteurs soit liés à la géologie (réfraction des ondes, pendage des couches, aliasing spatial lorsque les couches de terrains sont de faibles épaisseur) soit liés aux forages (problèmes de couplage mécanique tubage / terrain). En cas d'anisotropie marquée des terrains, il peut être nécessaire d'ajouter un ou deux forages formant une branche perpendiculaire (en L) par rapport aux deux ou trois forages du dispositif classique.

Afin de répondre au mieux aux objectifs des mesures Cross Hole, INNOGEO® a fait évoluer sa méthodologie de réalisation des essais ces dernières années à la fois en s'appuyant sur l'amélioration du matériel de mesure, et notamment des sources sismiques, mais aussi en couplant différents types de méthodes géophysiques complémentaires (Down Hole, Up Hole, Masw). Ces développements visent à assurer des résultats de qualité et à compenser, dans une certaine mesure, les limitations indiquées précédemment.

Il est également à noter qu'il est possible, voire très souhaitable, de contrôler le scellement des forages par diagraphie afin de valider le couplage mécanique tubage terrain et d'éliminer ainsi l'incertitude sur la qualité des scellements. En effet en cas de résultats bruités, il est toujours difficile de faire la part des choses entre des scellements médiocres et des hétérogénéités réelles des terrains.

3.1. Les sources sismiques

Le choix de nouvelles sources sismiques a été motivé par la difficulté d'obtenir des ondes de compression et des ondes de cisaillement dans certains terrains avec une source de type marteau-enclume classiquement mise en œuvre (voir Figure 1). En effet, ce type de source génère principalement, de par sa conception, des ondes de cisaillement (Sv), l'obtention d'ondes de compression étant liée, quant à elle, à la qualité des terrains.



Figure 1. Source sismique Ballard.

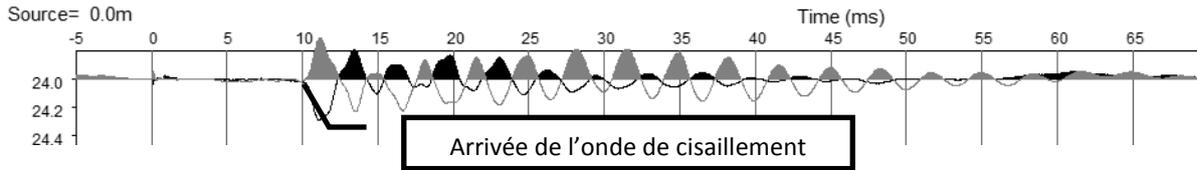


Figure 2. Exemple de signal obtenu avec une source Ballard.

Sur cette base, l'utilisation de sources de type marteau-enclume est désormais uniquement dédiée à l'obtention des ondes de cisaillement, et une seconde source est utilisée pour l'émission des ondes de compression. Ces sources, de type « sparker », sont mises en œuvre dans des forages en eau et permettent l'émission d'ondes de compression hautes fréquences (voir Figure 3).



Figure 3. Sources sismiques Sparker (P à gauche, S à droite)

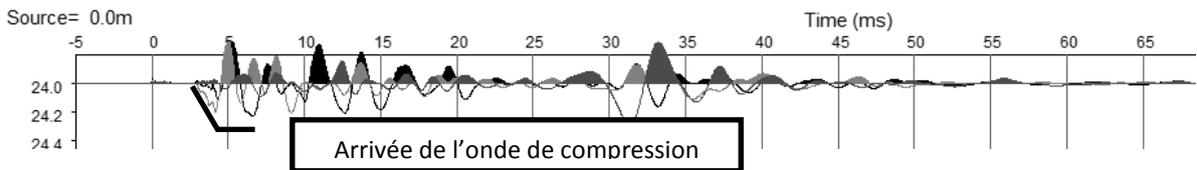


Figure 4. Exemple de signal obtenu avec une source sismique Sparker P

Dans certains cas, une source de type « Sparker » équipée pour émettre des ondes de cisaillement peut être mise en œuvre. L'expérience d'INNOGEO® montre que ces sources sont surtout adaptées aux terrains rocheux correspondant à des vitesses élevées pour les ondes sismiques (voir figures 3 et 4, qui correspondent à un même niveau de mesure sur un même site). On notera que la source Sparker S produit des ondes de cisaillement horizontales (S_h) alors que la source Ballard produit des ondes de cisaillement verticales (S_v).

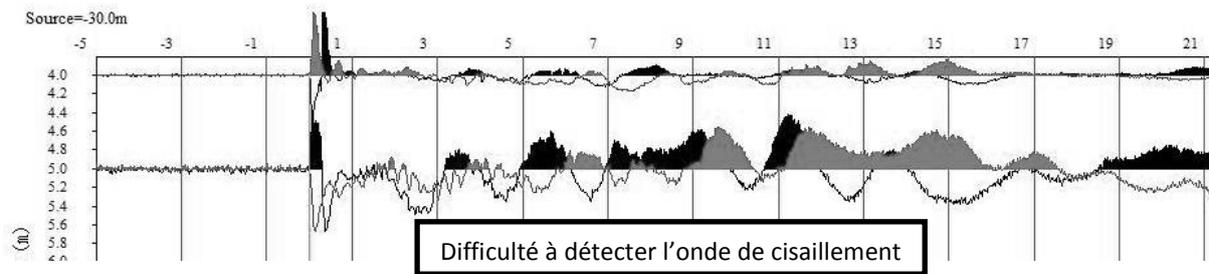


Figure 5. Acquisition ondes de cisaillement source Ballard (calcaire).

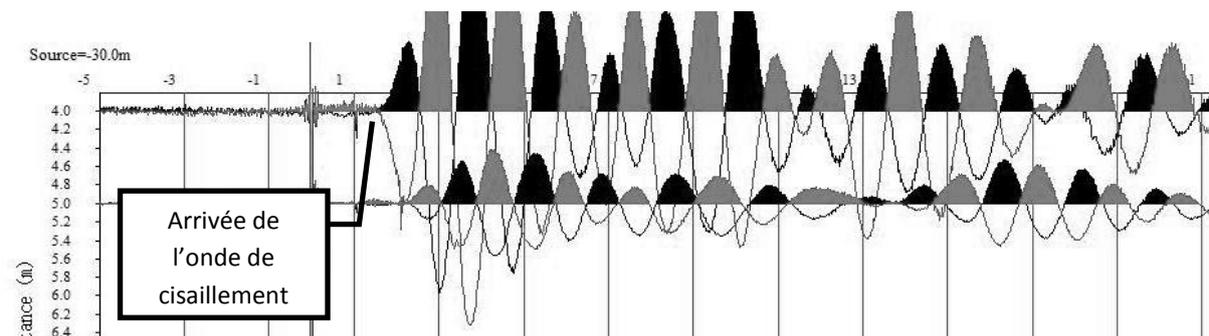


Figure 6. Acquisition ondes de cisaillement source Sparker S (calcaire).

3.2. Méthodes géophysiques complémentaires

Les méthodes géophysiques complémentaires mises en œuvre par INNOGEO® permettent d'apporter des informations pour aider au traitement des mesures Cross Hole. Ainsi, ces méthodes sont principalement :

- Down Hole : mesures pratiquées dans un ou plusieurs forages Cross Hole, elles visent à caractériser l'hétérogénéité des terrains ;
- Up Hole : mesures pratiquées lors des émissions Cross Hole et qui ont pour but d'identifier des hétérogénéités liées aux terrains de surface (présence de réseaux par exemple ou terrains remblayés) ;
- MASW : le calcul des paramètres dynamiques par la mesure des ondes de surface permet de contraindre les modèles calculés en Cross Hole ;
- Tomographie sismique : établissement de la répartition des vitesses des ondes de compression entre le forage émetteur et le ou les forages récepteurs.

Il est à noter que les différentes méthodes citées ci-dessous ne mesurent pas exactement les mêmes paramètres dans le cas de terrains anisotropes. Le traitement et l'interprétation doit donc être réalisé avec discernement.

4. Traitement des essais Cross Hole

Les traitements Cross Hole se basent sur le calcul de la vitesse de l'onde directe entre le forage émetteur et les deux forages récepteurs ainsi qu'entre les deux forages récepteurs. Afin d'approcher au plus près les vitesses sismiques, la déviation du forage est prise en

compte dans les calculs. Le calcul entre les deux forages récepteurs (uniquement dans le cas d'un triplet de forages) permet de s'affranchir de problèmes de calcul liés à un décalage du temps de déclenchement des acquisitions.

Cependant, se baser sur le calcul de l'onde directe conduit à ne pas prendre en compte d'éventuels phénomènes de réfraction des ondes au niveau des interfaces. Ces phénomènes se produisent lorsque les vitesses sismiques présentent des contrastes forts mais aussi pour un espacement entre forages important.

La norme américaine ASTM D 4428/D 5528 M (Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing) propose une méthode empirique basée sur l'analyse des variations de vitesse en fonction de la géologie pour corriger ces phénomènes de réfraction, cependant il apparaît plus judicieux d'utiliser un logiciel d'inversion sismique afin de calculer les vitesses vraies des terrains niveau par niveau et de vérifier l'existence ou non de réfraction. L'inversion est réalisée avec comme modèle d'entrée les vitesses calculées pour les trajets directs. Le logiciel inverse ces données et par itération se rapproche du modèle de vitesse réaliste (voir Figure 7).

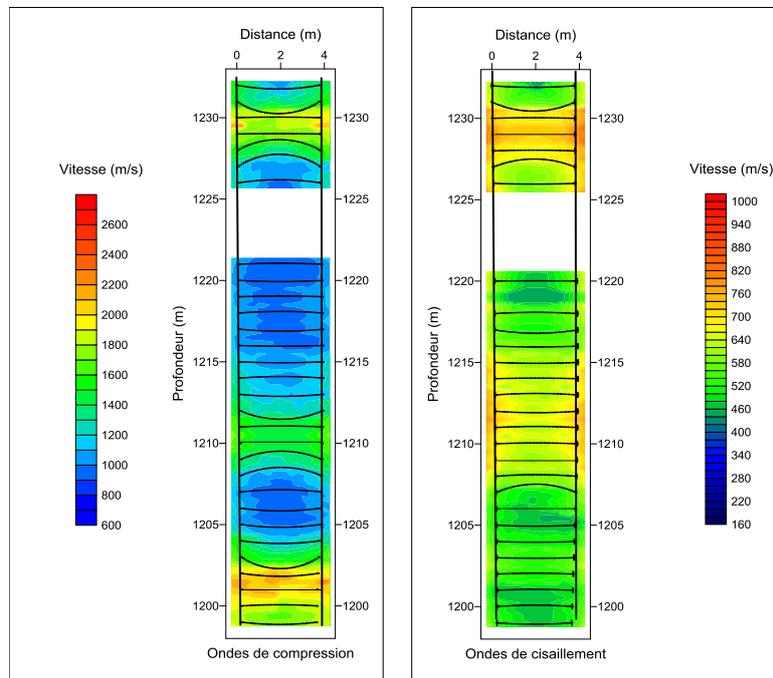


Figure 7. Exemple d'inversion tomographique de données Cross Hole.

Les autres méthodes interviennent afin d'apporter des données supplémentaires qui permettent d'ajuster le modèle de vitesse.

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, les mesures Up hole et MASW vont permettre de compléter les informations en subsurface, et le Down Hole, réalisé sur l'ensemble de la hauteur des forages, permet de confirmer la loi de vitesse déterminée par Cross Hole et de caractériser l'hétérogénéité des sols.

De même, le premier traitement Down Hole correspond à une détermination graphique des vitesses des terrains rencontrés (voir Figure 6). Cette détermination présente néanmoins l'inconvénient d'obtenir des vitesses non corrigées des phénomènes de réfraction aux interfaces, par analogie avec le Cross Hole. Pour corriger ces phénomènes, INNOGEO® a développé en interne un logiciel (DH_refrac) permettant d'inverser les temps d'arrivées des ondes sur la base du modèle obtenu graphiquement.

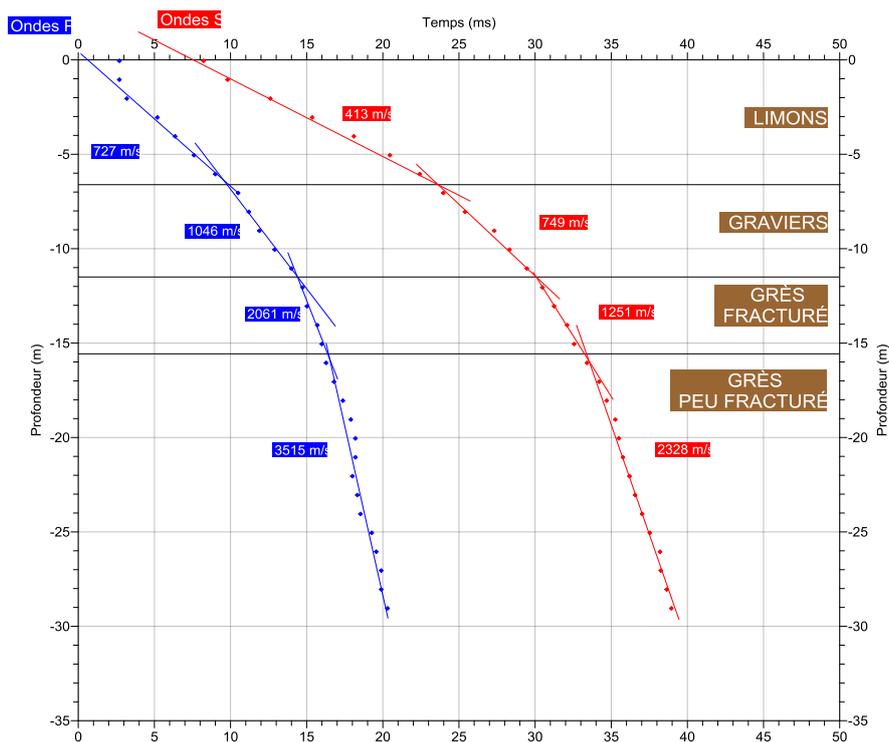


Figure 8. Interprétation graphique Down Hole.

Les deux modèles ainsi obtenus (Cross Hole et Down Hole) sont ensuite comparés et affinés afin d'obtenir le profil de vitesse du site. C'est ce profil de vitesse qui est utilisé ensuite dans le calcul des paramètres dynamiques (E_d et G_d), du coefficient de Poisson et de la vitesse harmonique $V_{S,30}$ définie par l'Eurocode 8.

5. Conclusion

Les acquisitions et l'interprétation des méthodes Cross Hole et sismiques associées ont évolué ces dernières années par l'intégration de nouveaux matériels, tout particulièrement les sources, d'une nouvelle approche d'interprétation multi méthodes (Cross Hole, Down Hole, Up Hole, Masw) et de nouveaux traitements (inversion tomographique, modélisation Down Hole ...) grâce au développement d'algorithmes performants.

Ces avancées développées et mise en œuvre par INNOGEO® permettent aujourd'hui d'améliorer et de fiabiliser les résultats d'une étude sismique afin d'apporter une solution adaptée au besoin du client, c'est-à-dire un modèle de terrain synthétique utilisable directement dans les calculs géotechniques liés à la prise en compte du risque de liquéfaction des sols et plus généralement de l'interaction sol-structure sous sollicitation dynamique (séisme, vibration).