

## **Utilisation de la nouvelle méthode d'imagerie 3D du sous-sol par sismique dite « passive » pour la détermination des Vs sur un site industriel – Analyse comparative des résultats avec les méthodes Cross Hole, H/V et AVA**

***Use of the new « passive » seismic 3D underground imaging method for the Vs determination on an industrial site – Comparative analysis of the results with the Cross-hole, H/V and AVA methods.***

O. MAGNIN<sup>1</sup>, A. TOURETTE<sup>1</sup>, A. LAVOUE<sup>2</sup>, S. UNTERSEH<sup>3</sup>, JF. TISSANDIER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EGIS,

<sup>2</sup> Sisprobe,

<sup>3</sup> Total Energies

**RÉSUMÉ** – La nouvelle méthode de reconnaissance géophysique par sismique dite « passive » est particulièrement bien indiquée pour l'obtention d'un modèle 3D de vitesses des ondes de cisaillement, ceci afin de mieux maîtriser le risque sismique sur les sites industriels sensibles. Contrairement à l'imagerie par sismique active, qui utilise une source artificielle de type chute de poids ou explosif, l'imagerie par sismique passive exploite la propagation des ondes sismiques générées par des sources naturelles (vent, houle ...) ou anthropiques (bruits d'origine urbaine ou industrielle). Nous présentons dans cet article les résultats particulièrement prometteurs obtenus sur un site industriel du groupe Total Energies, sur lequel nous avons pu tester différents protocoles d'acquisition. Le modèle 3D de Vs obtenu à l'échelle de l'ensemble du site, sur une profondeur de plus de 250 m, est corrélé avec les résultats des sondages géologiques disponibles, ainsi qu'avec les résultats des mesures H/V effectuées sur le site. Une analyse comparative des résultats est aussi présentée, au regard des valeurs de Vs obtenues avec des méthodes plus classiques de mesures sismiques Cross Hole (mesures effectuées sur un triplet de forages jusqu'à 30 m de profondeur), et de mesures sismiques de type AVA (Ambient Vibration Array), également effectuées sur le site.

**ABSTRACT** – The recent development in passive seismic method is particularly well suited for the 3D Vs characterization, especially for seismic hazards study of sensible industrial site. In opposition to active seismic studies, which are performed using weight drop source or explosives, passive seismic method uses the propagation of surface waves generated by natural or anthropic ambient noises. We present in this paper, the promising results obtained at an industrial site near Lyon (France), where we had the opportunity to test different acquisition procedures. The 3D Vs model obtained at a large and continuous scale over the entire area, with 250 m investigation depth, is correlated with a simple geological model obtained from existing drillhole data, respectively with H/V seismic measurements results performed on the same site. A comparative analysis is also performed with Vs values obtained using more classical seismic Cross Hole measurements (between 3 boreholes until 30 m depth), and Vs values obtained using an Ambient Vibration Array (AVA) analysis to characterize a Vs profile on the first 40 m.

### **1. Introduction**

Le développement récent de capteurs sismiques autonomes, permettant l'enregistrement en continu de données sismiques sur des durées de plusieurs semaines, a permis en particulier de développer une nouvelle méthode de prospection géophysique dite de « sismique passive ».

Cette nouvelle approche repose sur l'enregistrement du bruit sismique ambiant sur un grand nombre de capteurs autonomes. Elle permet ainsi une investigation non destructive permettant de réaliser une imagerie 3D des caractéristiques physiques du sous-sol, sur des profondeurs

importantes de plusieurs centaines de mètres, profondeurs accessibles jusqu'à présent uniquement par la méthode de sismique réflexion nécessitant des sources actives de type explosif ou camions vibrateurs de plusieurs tonnes.

Cette nouvelle technique utilise le bruit sismique ambiant provenant de sources naturelles (vent, houle ...) ou anthropiques (bruits d'origine urbaine ou industrielle). Le traitement effectué repose sur l'analyse de la dispersion des ondes de surface, qui permet de reconstruire un modèle 3D de la distribution des vitesses des ondes de cisaillement ( $V_s$ ).

Les résultats peuvent être utilisés seuls ou conjointement avec d'autres données géophysiques ou géologiques, ou utilisés pour améliorer l'imagerie des données de sismique active.

Sur le site test étudié, 3 modèles de  $V_s$  ont été obtenus à partir d'un réseau élargi recouvrant l'ensemble du site avec 200 capteurs espacés en moyenne de 60m, et de 2 réseaux plus haute résolution localisés au Sud et au Nord du site, comprenant chacun une centaine de capteurs espacés en moyenne de 20 m.

L'objectif de cet article est de comparer les 3 modèles de  $V_s$  obtenus par ANSWT (Ambient Noise Surface Wave Tomography) avec les résultats obtenus avec les méthodes de caractérisation des  $V_s$  classiquement utilisés en géotechnique, à savoir les mesures de type Cross-hole et AVA (Ambient Vibrating Array). Nous comparons aussi les résultats d'ANSWT avec les résultats obtenus en interprétation H/V, méthode utilisée pour la caractérisation de la fréquence naturelle de résonance d'un site pour les problématiques d'aléa sismique.

L'objectif est d'évaluer si les résultats ANSWT associés aux informations géologiques sont suffisants pour avoir une bonne compréhension du sous-sol, et une bonne caractérisation de ses  $V_s$  jusqu'à grande profondeur.

## 2. Présentation des méthodes géophysiques

L'ANSWT utilise le bruit sismique ambiant provenant de sources naturelles et anthropiques pour l'imagerie et la surveillance du sous-sol. La corrélation croisée entre les paires de récepteurs est utilisée pour extraire la fonction de Green (Bensen et al., 2007, Lecocq et al., 2014), et pour analyser la dispersion des ondes de surface, et générer ainsi un modèle de vitesse (Mordret et al., 2013, Boué et al., 2016, Shapiro et al. 2004). Le modèle de vitesse des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) est obtenu avec une inversion conjointe des ondes de Rayleigh et de Love à l'aide de l'algorithme de voisinage (Sambridge, 1999), décrit en détail par Mordret et al. (2014).

Trois modèles de vitesses ont été obtenus en utilisant trois réseaux de stations autonomes 3 composantes. Un réseau de 200 nodes élargi à l'ensemble de la raffinerie (zone de 3 km x 0,6 km), de distance interstation de 60 m, a été déployé pour étudier la profondeur du substratum rocheux (profondeur minimale d'investigation d'environ 30 m). Deux réseaux denses de 100 nodes chacun avec des distances interstations de 20 m ont été déployés dans la partie nord et sud du site pour une meilleure résolution à faible profondeur (profondeur d'investigation minimale d'environ 10 m).

La méthode H/V (Nakamura, 1989) calcule un rapport spectral du bruit ambiant enregistré sur les composantes horizontale et verticale. Le rapport spectral H/V est basé sur le contraste d'impédance, comme par exemple la présence de sédiments meubles sur un substratum rocheux. Pour un contraste d'impédance élevé, le rapport H/V présente un pic prononcé proche de la fréquence fondamentale ( $F_0$ ) de résonance de l'onde S, correspondant à la fréquence de résonance propre du site ( $F_0 = V_s/4H$ ).

80 mesures H/V réparties sur l'ensemble du site ont été réalisées à l'aide de sismomètres tridirectionnels Lennartz 1 seconde. Les résultats de ces mesures H/V ont été fournis par Total Energies.

La méthode Ambient Vibrating Array (AVA, Wathelet et al., 2008) utilise les caractéristiques de dispersion des ondes de surface pour récupérer la vitesse des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur. Cette méthode calcule les courbes de dispersion à l'aide d'une analyse FK d'un

réseau de capteurs, placés généralement sur des cercles concentriques de diamètre croissant, pour ensuite inverser cette courbe pour obtenir un modèle 1D des Vs du sol. Pour cette étude, plusieurs réseaux en forme de cercle, constitués de 7 stations sismologiques Lennartz 1 seconde, de différentes tailles (cercle de 10, 20, 20 et 50 mètres de rayon), ont été successivement déployés pour permettre une analyse à différentes profondeurs. L'objectif principal de cette méthode était de calculer un profil Vs jusqu'à une cinquantaine de mètres de profondeurs. Ces résultats AVA ont été fournis par Total Energies.

La méthode Cross-hole (ASTM D4428 - 2007) mesure le temps de parcours des ondes de compression et de cisaillement entre plusieurs forages. Elle permet de déterminer Vp et Vs en fonction de la profondeur en considérant la déviation des forages. Dans cette étude, l'essai Cross-hole a été réalisé dans trois forages distant de 5 m, avec une mesure tous les mètres, de 1 à 29 mètres de profondeur. Les ondes S ont été identifiées sur toute la hauteur du forage. Le modèle 1D de Vs final jusqu'à 30 m de profondeur a été fourni par Total Énergies.

### 3. Présentation du site

Le site se situe dans la vallée du Rhône au sud de Lyon. La géologie est impactée en profondeur par l'épisode d'incision Messinienne et en surface par la sédimentation fluviale du Rhône. La géologie est ainsi dominée par 3 grandes unités : Le socle granitique en profondeur, la molasse intermédiaire et les alluvions récentes en surface. Les sondages de la banque du sous-sol disponibles (BSS), consultable sur le portail Infoterre du BRGM, confirme cette géologie sans préciser la profondeur du socle granitique par l'absence de forage profond proche.

La figure 1 localise les différentes méthodes. La profondeur d'investigation est différente selon les méthodes et dépend principalement de la géométrie d'acquisition (ouverture du réseau) et du contenu fréquentiel du bruit ambiant. Ainsi, les deux réseaux denses ont une profondeur d'investigation de 100 m, le réseau élargi atteint 250 mètres de profondeur. Les mesures AVA ont une profondeur d'investigation d'environ 50 mètres, et le Cross-Hole de 30 mètres. Les mesures H/V donnent des valeurs de fréquence correspondant au contraste couverture/socle rocheux.

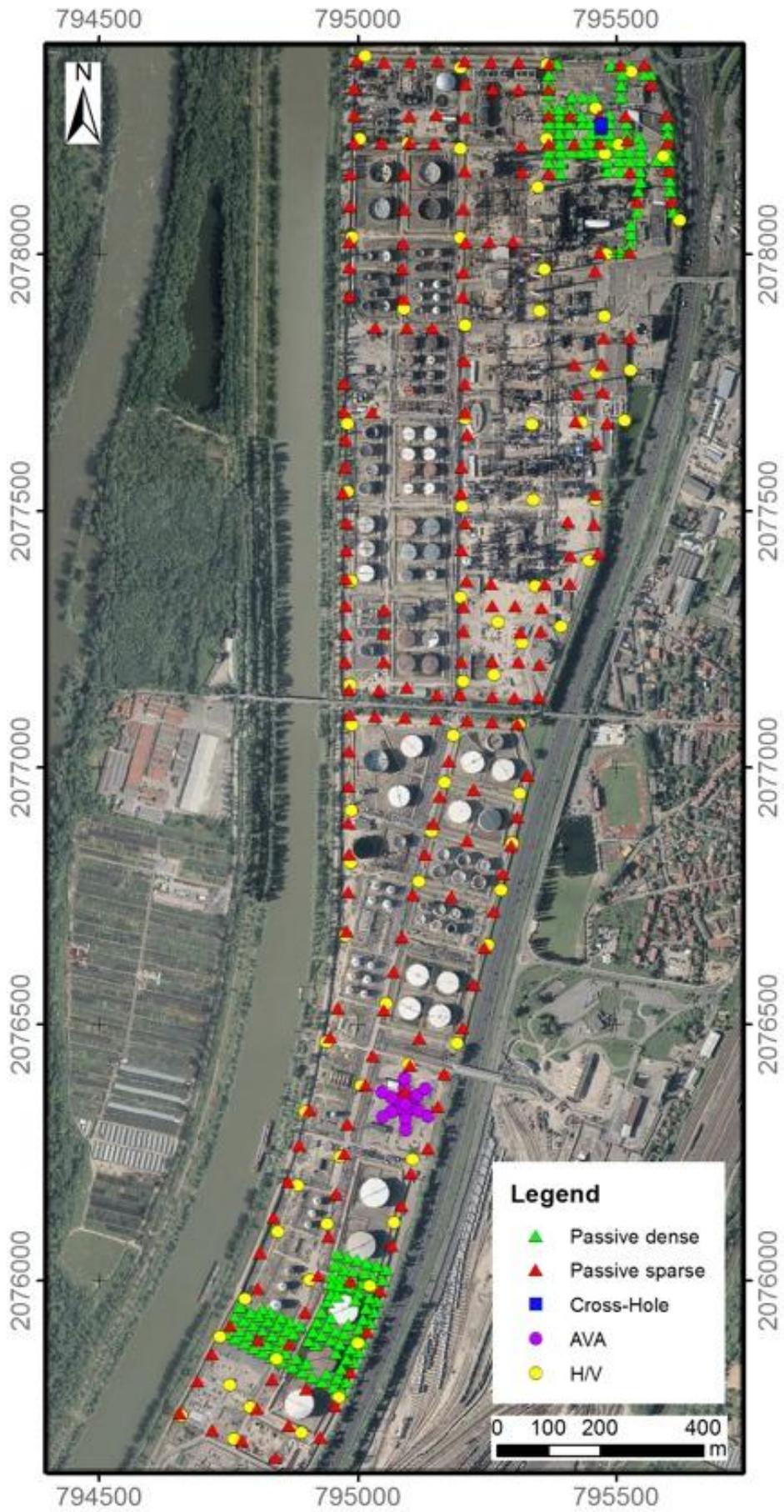


Figure 1: Localisation des différentes méthodes utilisées.

#### 4. Résultats et comparaison des différentes méthodes

Nous présentons, ci-dessous, les comparaisons des modèles 1D de Vs obtenus avec les méthodes Cross-hole et AVA, avec les modèles obtenus par sismique passive. Cette comparaison permet d'évaluer les vitesses moyennes du site que nous utiliserons pour calculer les profondeurs du socle granitique à partir des données H/V. Enfin, nous comparons ces résultats de profondeur du socle avec le modèle 3D Vs obtenu à partir de la sismique passive réalisée sur l'ensemble du site.

##### Comparaison du cross-hole, AVA et sismique passive

La figure 2 présente, à gauche, les modèles 1D Vs obtenus à partir de la sismique passive au droit du Cross-hole. Les 2 modèles, obtenus à partir du réseau dense et du réseau élargi, sont représentés respectivement en vert et en bleu. Le modèle obtenu à partir de la méthode Cross-Hole donne des valeurs Vs similaires à celles du réseau dense jusqu'à 10-14m ( $V_s = 400$  m/s). La transition nette de vitesse de 400 m/s à 600 m/s se produit à 20 m de profondeur pour le Cross-Hole et à 14 m de profondeur pour la sismique passive dense. Le modèle Vs obtenu avec le réseau élargi correspond bien à une moyenne de ces vitesses (500 m/s), ce qui s'explique par la résolution plus faible liée à la géométrie du réseau et au contenu fréquentiel exploitable. Les vitesses à partir de 40m de profondeur, deviennent équivalentes (750 m/s) pour les 2 réseaux.

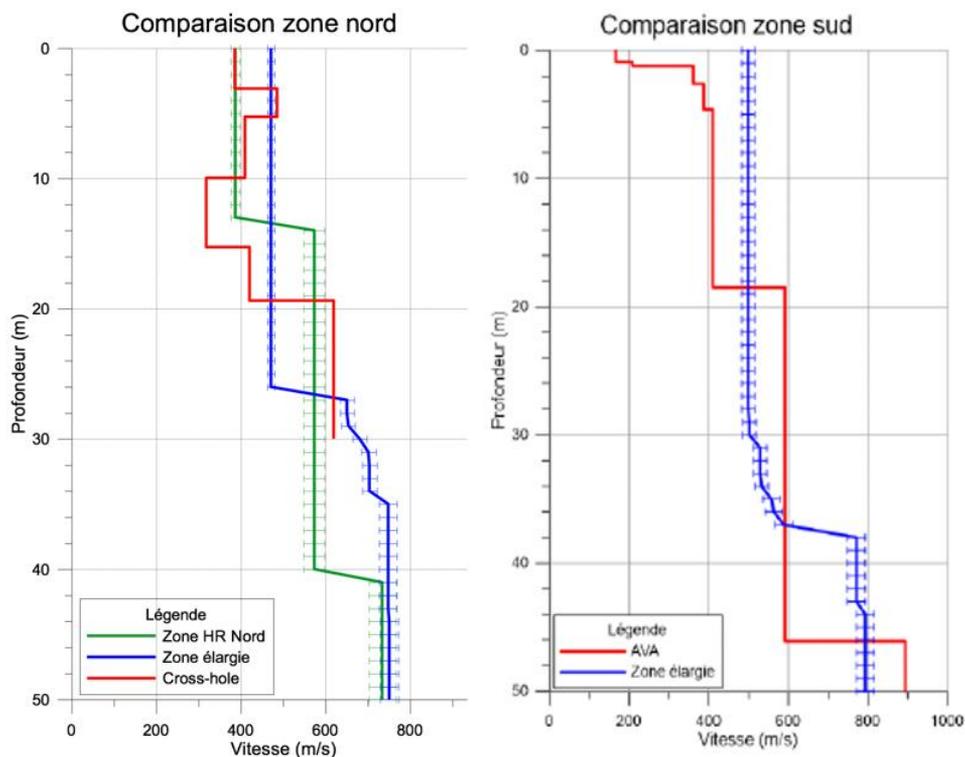


Figure 2 : À gauche, Résultats du Cross-hole comparés aux résultats de la passive des réseaux dense et élargi ; à droite, résultats des mesures AVA comparés aux résultats de la passive du réseau élargi .

La figure 2 compare, à droite, les modèles 1D de Vs obtenus à partir des mesures AVA et à partir du réseau élargi de sismique passive au même point. De nouveau, les vitesses trouvées avec le réseau élargi jusqu'à 40 m correspondent bien à la moyenne des vitesses récupérées avec la méthode AVA, cette correspondance qui s'observe sur la moyenne s'explique par la plus faible résolution en surface de la sismique passive. Les vitesses obtenues avec la méthode AVA sont bien en accord avec l'essai Cross-Hole situé plus au nord, jusqu'à 30 m de profondeur. Au-delà de 40 mètres de profondeur, les résultats obtenus par la méthode AVA sont en limite de profondeur d'investigation compte tenu de la taille du plus grand cercle mesurée.

Ainsi, sur les 30-40 premiers mètres, les mesures Cross-hole et AVA restent plus précises mais la méthode ANSWT fournit une approximation cohérente et fiable bien que sa résolution diminue en très proche surface. Cette résolution dépend directement de la géométrie du réseau et du contenu fréquentiel exploitable.

### Comparaison H/V et sismique passive

Il est possible de calculer la profondeur théorique du socle granitique à partir des résultats H/V (Figure 3) en utilisant la vitesse moyenne déduite des modèles obtenus par ANSWT. La profondeur théorique du socle rocheux peut être calculée par  $H = V_s/(4F_0)$ . Pour les fréquences  $F_0 = 1\text{ Hz}$  (couleur bleue) et  $F_0 = 2\text{ Hz}$  (couleur rouge), on trouve respectivement des profondeurs d'environ 190 m et 90 m, pour une  $V_s$  moyenne de 750 m/s. Cette  $V_s$  moyenne correspond à la vitesse moyenne des molasses obtenues avec le réseau élargi jusqu'à l'iso-vitesse 900 m/s, interprétée comme l'interface entre la molasse et le toit du socle granitique.

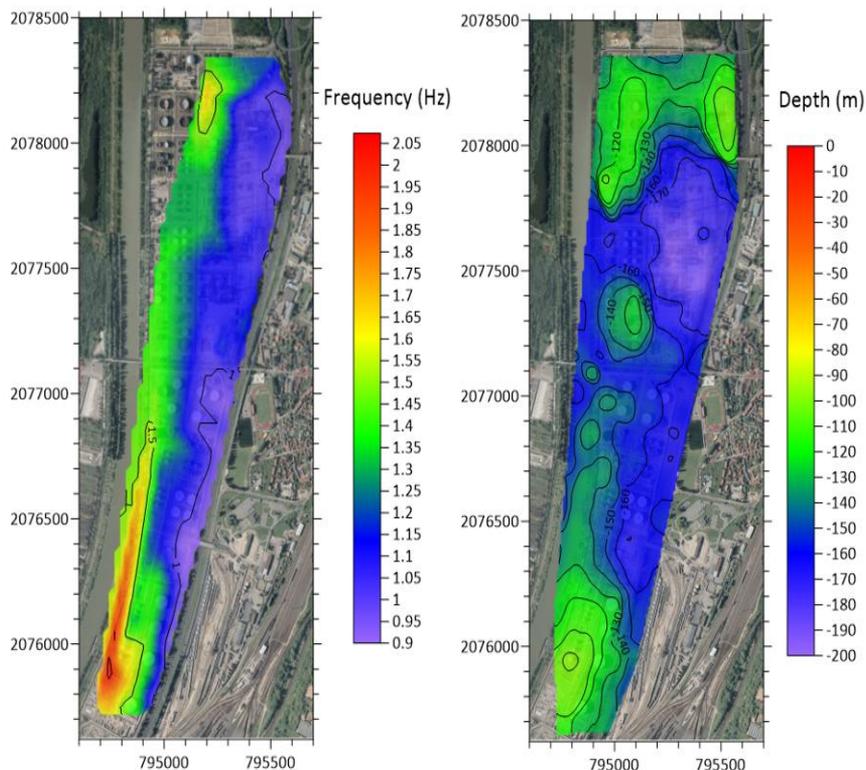


Figure 3: A gauche, résultats des mesures H/V, et à droite, iso-vitesse du 900 m/s obtenue à partir du modèle de vitesses du réseau élargi.

L'iso-vitesse du 900 m/s présenté sur la Figure 3 est extraite du modèle 3D de  $V_s$  obtenu par le réseau élargi de sismique passive (Figure 4). Comme on peut le constater sur le modèle 3D, le fort gradient de vitesse passant de 800 m/s à plus de 1500 m/s sur toute la zone de l'étude, permet d'interpréter l'iso-vitesse 900 m/s comme l'interface entre la molasse et le toit du socle granitique.

Cette iso-surface de 900 m/s évolue entre 110 et 190 m de profondeur, ce qui correspond aux profondeurs obtenues en H/V. Cette bonne correspondance confirme l'hypothèse de fréquences H/V liées à la résonance naturelle sur l'interface molasse/granite. On retrouve l'approfondissement du socle granitique vers l'est, et les zones moins profondes au nord et au sud. Seule l'extrémité de la zone nord-est présente des résultats différents, qui pourraient être expliqués par des effets de bord de l'imagerie ANSWT ou par des spectres un peu plus bruités en H/V.

On ne dispose pas de forages sur le site ayant été réalisés jusqu'à une profondeur permettant d'atteindre les granits, mais on dispose de plusieurs données de forage effectués à proximité.

On citera en particulier :

- un forage effectué à 500 m à l'ouest du Rhône qui l'a trouvé à 40 m de profondeur
- un forage réalisé à Solaize à 2 km au Sud qui l'a touché à 110 m
- un forage situé à Corbas, à 4 km à l'est de la zone d'étude, qui n'a pas atteint le substratum rocheux à 130 m de profondeur.

Les profondeurs obtenues au droits du site sont donc tout à fait réalistes. En effet, le socle granitique est quasi-affleurant à l'ouest du Rhône et plonge rapidement vers l'est sous le Rhône.

Ainsi, les résultats de sismique passive est en concordance avec les mesures H/V qui décrivent l'évolution du toit du socle granitique. L'ANSWT permet donc d'obtenir un modèle 3D des Vs fiable jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

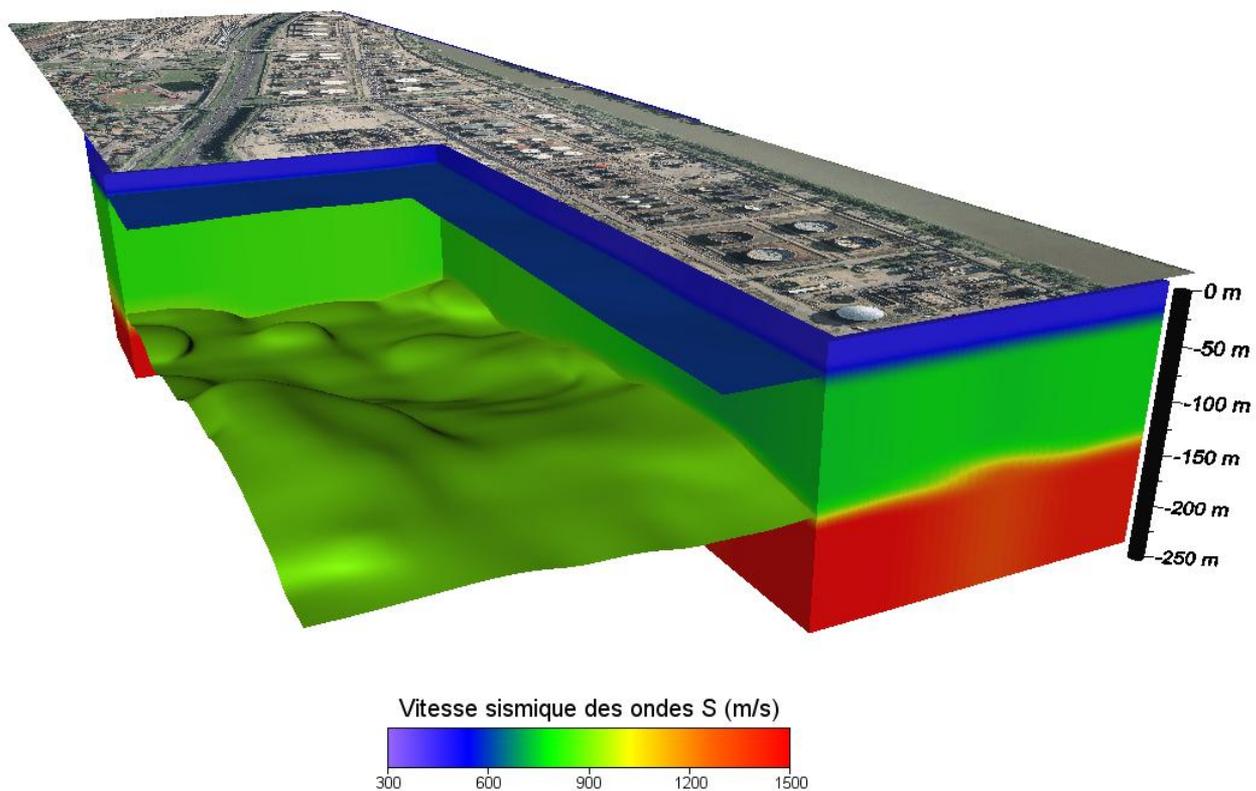


Figure 4 : Modèle 3D de Vs obtenu par le réseau élargi avec la représentation de l'iso-surface 900 m/s.

## 5. Conclusions et applications

La comparaison des résultats de l'ANSWT est en bonne concordance avec les méthodes de caractérisation des Vs habituellement mises en oeuvre (Cross-hole, AVA). Les différences observées s'expliquent par les différences de résolution propres à chacune des méthodes utilisées.

L'ANSWT est donc une méthode fiable pour caractériser les Vs du sous-sol, bien que sa résolution diminue en très proche surface. L'ANSWT permet de caractériser les vitesses jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Obtenir de tels résultats avec des essais Cross-hole seraient compliqués et onéreux à mettre en oeuvre. D'autre part, l'ANSWT caractérise le sous-sol dans les

3 dimensions et peut donc être utilisée non seulement comme une méthode d'imagerie structurale apportant une meilleure connaissance géologique d'un site, mais aussi pour caractériser mécaniquement les matériaux du sous-sol.

Dans la présente étude, l'ANSWT du réseau élargi à l'ensemble de la raffinerie a permis d'imager la profondeur du socle granitique entre 110 et 190 mètres de profondeur. Elle permet également d'obtenir un cube 3D des Vs, qui peut être utilisé pour les études d'aléa sismique. En effet, il est possible de calculer la Vs30, vitesse moyenne des 30 premiers mètres définie par la formule suivante :

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_i^N \frac{h_i}{V_i}}$$

La figure 5, ci-dessous, présente le résultat du calcul de la Vs30 à partir des résultats des blocs 3D obtenus sur la zone élargie et les 2 zones denses. Le Cross-Hole réalisé sur la zone Nord (voir localisation sur la Figure1) donne une Vs30 de 440 m/s qui concorde parfaitement avec la carte de Vs30 obtenue sur la zone nord avec des valeurs comprises entre 460-480 m/s. Les valeurs obtenues sur le réseau élargi sont légèrement plus élevées (500 – 520 m/s) du fait de la plus faible résolution en surface.

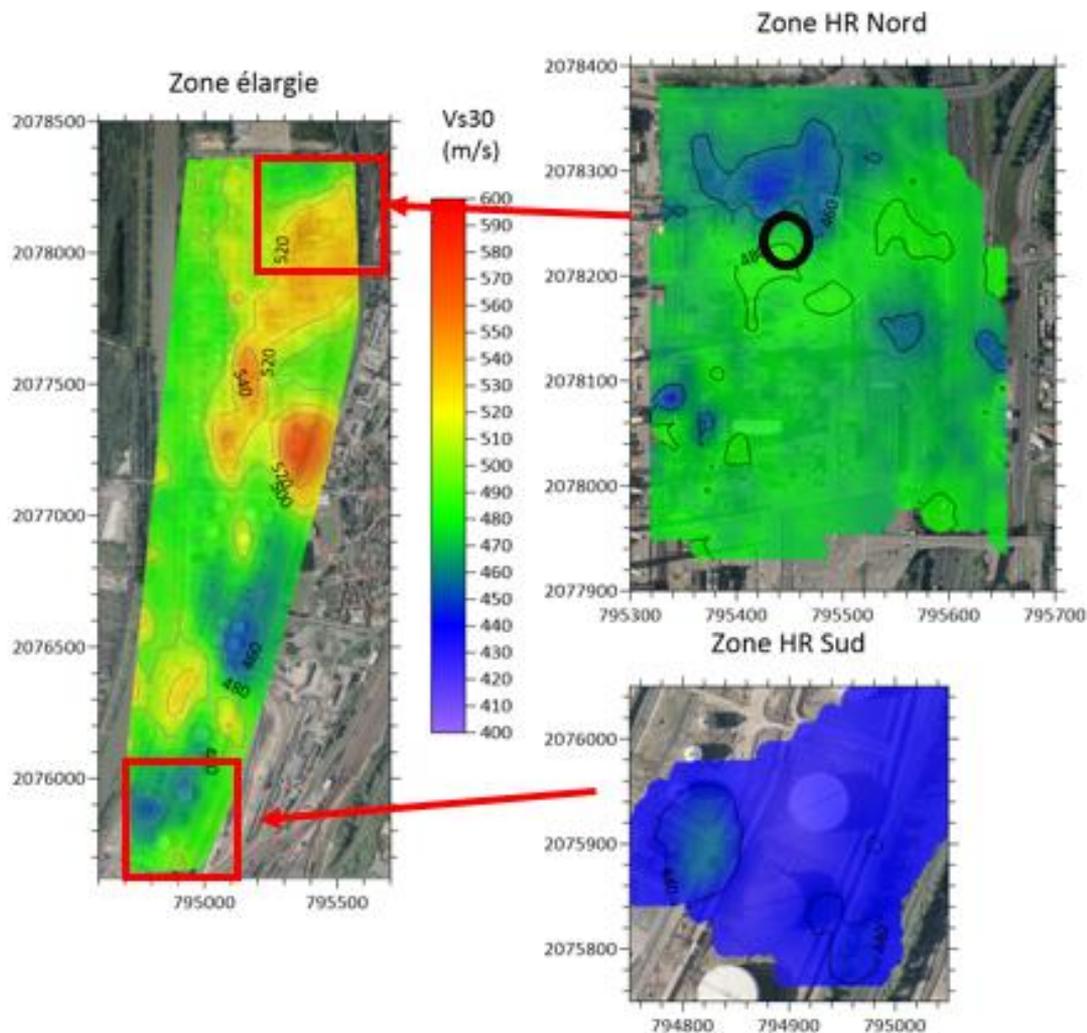


Figure 5: Comparaison Vs30 obtenue à partir des différents réseaux.

La caractérisation des Vs par sismique passive, dans les 3 dimensions, peut ainsi être utilisée pour calculer une Vs30 et donc pour estimer les classes de sol tel que définies par l'Eurocode 8. Ce modèle 3D de Vs peut également être utilisé pour des études d'aléa sismique prenant en compte les effets de site, ou pour obtenir des paramètres tel que la H800, profondeur à partir de laquelle une Vs de 800 m/s est rencontrée.

## 6. Références bibliographiques

- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., ... & Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1239-1260.
- Boué, P., Denolle, M., Hirata, N., Nakagawa, S., & Beroza, G. C. (2016). Beyond basin resonance: characterizing wave propagation using a dense array and the ambient seismic field. *Geophysical Journal International*, 206(2), 1261-1272.
- Lecocq, T., Caudron, C., Brenguier, F. (2014). MSNoise, a Python Package for Monitoring Seismic Velocity Changes Using Ambient Seismic Noise, *Seismological Research Letters*, 85 (3): 715-726.
- Mordret, A., Landes, M., Shapiro, N., Singh, S., and Roux, P. (2014). Ambient noise surface wave tomography to determine the shallow shear velocity structure at Valhall: depth inversion with a Neighbourhood Algorithm. *Geophysical Journal International*, 198(3), 1514-1525.
- Mordret, A., Landès, M., Shapiro, N. M., Singh, S. C., Roux, P., & Barkved, O. I. (2013). Near-surface study at the Valhall oil field from ambient noise surface wave tomography. *Geophysical Journal International*, 193(3), 1627-1643.
- Nakamura Y (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quart Rep RTR* 30(1):25–33
- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighborhood algorithm—i. searching a parameter space, *Geophysical Journal International*, 138(2), 479–494.
- Shapiro, N. M., & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31(7).
- Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M. *et al.* Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over  $V_s$  inversion. *J Seismol* **12**, 1–19 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9067-x>