

Tomographie 3D par bruit ambiant pour des études géologiques préliminaires à haute résolution des barrages hydroélectriques - Étude de cas Rhonergia (France)

3D ambient noise tomography for high-resolution preliminary geological investigations of hydroelectric dams – Rhonergia case study (France)

Maria SAADE ^{1,2*}, Clément MOGENIER ³, Romain GRANJON ⁴

1 Sixense Monitoring, 21 rue du Port, 92000 Nanterre - France

2 Institut de Physique du Globe de Paris, IPGP, Paris, France, SIXENSE

3 Sixense Monitoring, 9 Blvd. des Droits de l'Homme, 69120 Vaulx-en-Velin – France

4 CNR, Compagnie Nationale du Rhône (CNR), 2, rue André Bonin, 69004 Lyon - France

**maria.saade@vinci-construction.com*

RESUME : La tomographie 3D par bruit ambiant (ANT) est une méthode non invasive et à haute résolution pour l'imagerie du sous-sol. Dans ce projet, cette solution a été appliquée sur trois zones situées à proximité du Rhône, avec pour objectifs principaux l'évaluation géologique et géotechnique des sites, la caractérisation hydrogéologique des dépôts sédimentaires, et l'estimation du risque sismique à partir de la cartographie du paramètre Vs30.

Plus de 1 100 capteurs sismiques autonomes ont été déployés, dont plusieurs directement placés dans le lit du Rhône, illustrant l'adaptabilité de la méthode à des environnements mixtes (terrestres et subaquatiques). Les capteurs sont restés en enregistrement entre 168 et 192 heures par site, permettant d'obtenir plus de 300 000 mesures d'inter-corrélations. L'exploitation du bruit sismique naturel et anthropique à partir de l'interférométrie sismique a permis de reconstruire un modèle 3D de vitesse des ondes de cisaillement (Vs) jusqu'à environ 60 mètres de profondeur. Ce modèle révèle la variabilité latérale et verticale des couches sédimentaires, précise la géométrie des transitions quaternaire-tertiaire et met en évidence l'extension de paléo-chenaux glaciaires au sein du substratum molassique tertiaire. Ces informations constituent des données clés pour les premières phases de modélisation géologique, de sélection de sites géothermiques, ou encore d'analyse du risque sismique.

En réduisant fortement le recours aux forages et aux carottages, l'ANT offre une alternative sécurisée, économique et non destructive aux méthodes géophysiques classiques. L'intégration réussie de capteurs sous-marins confirme la robustesse du dispositif et son applicabilité dans les vallées fluviales, deltas et zones hydro-géologiquement sensibles, typiques des projets d'aménagement et d'infrastructure tels que les barrages hydroélectriques.

ABSTRACT: Three-dimensional Ambient Noise Tomography (ANT) is a non-invasive, high-resolution method for subsurface imaging. In this project, the technique was applied to three areas located near the Rhône River, with the main objectives of geological and geotechnical site assessment, hydrogeological characterization of sedimentary deposits, and seismic hazard estimation through mapping of the Vs30 parameter.

More than 1,100 autonomous seismic sensors were deployed, several of which were installed directly within the Rhône riverbed, demonstrating the adaptability of the method to mixed environments (terrestrial and subaqueous). The sensors recorded continuously for 168 to 192 hours per site, yielding more than 300,000 cross-correlation measurements.

By exploiting natural and anthropogenic seismic noise through seismic interferometry, a three-dimensional shear-wave velocity (Vs) model was reconstructed down to approximately 60 meters depth. This model reveals both lateral and vertical variability of sedimentary layers, refines the geometry of Quaternary, Tertiary transitions, and highlights the extent of glacial paleo-channels within the Tertiary molasse bedrock. These results provide key inputs for early-stage geological modeling, geothermal site selection, and seismic risk analysis.

By significantly reducing the need for drilling and coring, ANT offers a safe, cost-effective, and non-destructive alternative to conventional geophysical methods. The successful integration of underwater sensors further confirms the robustness of the approach and its applicability in fluvial valleys, deltas, and hydro-geologically sensitive areas, which are typical settings for development and infrastructure projects such as hydroelectric dams.

Mots-clés : Ambient Noise Tomography ; Sismique passive ; Exploration géothermique ; Géophysique non invasive ; Analyse du risque sismique

1 CONTEXTE ET OBJECTIF

Une étude géophysique a été lancée à Saint-Romain-de-Jalionas (France), dans le cadre d'un projet de construction d'un nouveau barrage doté d'une centrale hydroélectrique sur le Rhône, entre Lyon et le Haut-Rhône. Cette étude est fondée sur la tomographie de bruit ambiant 3D et porte sur la caractérisation du sous-sol le long du Rhône, une région présentant à la fois une stratigraphie sédimentaire complexe et une dynamique hydrogéologique marquée. Les objectifs principaux étaient de :

- Cartographier les formations alluviales quaternaires et identifier les transitions vers le substratum tertiaire ;
- Évaluer l'épaisseur et la variabilité latérale des couches de sédiments fins ;
- Identifier des zones fracturées ou mécaniquement faibles indiquant des chemins de circulation des fluides ou des aléas géotechniques.

Pour atteindre ces objectifs, une tomographie 3D par bruit ambiant (ANT) a été réalisée, en déployant des capteurs à la fois à terre et dans le lit du fleuve, incluant notamment 4 capteurs directement immergés, afin d'assurer une couverture spatiale complète.

2 TECHNIQUE ET MESURES

La tomographie sismique passive exploite le bruit ambiant pour sonder le sous-sol [Brenquier et al. 2007a, Brenquier et al. 2007b, Mordret et al. 2013, Sabra et al. 2005, Shapiro et al. 2005, Olivier et al. 2015].

La méthode repose sur le calcul d'inter-corrélation des signaux de bruit sismique continu enregistrés par deux capteurs différents. Ce bruit sismique est dominé par des ondes de surface se propageant dans la croûte superficielle [Roux et al. 2011, Shapiro et al. 2004]. Si le bruit est homogènement distribué dans le milieu, la inter-corrélation entre deux capteurs A et B représente la fonction de Green du milieu [Duvall et al. 1993, Gouédard et al. 2008, Wapenaar et al. 2004, Weaver et al. 2001], représente la réponse impulsionnelle du milieu entre ces 2 capteurs. Par conséquent, la fonction de Green est utilisée pour extraire les courbes de dispersion des ondes de surface et donc la vitesse sismique dans la zone entre A et B.

Les courbes de dispersion des ondes de surface se présentent sous forme d'un diagramme représentant les variations de la vitesse (ordonnée) en fonction de la fréquence (abscisse). En effet, la vitesse de propagation des ondes de surface dépend majoritairement de la vitesse des ondes de cisaillement

Vs. Leur profondeur de pénétration est proportionnelle à leur longueur d'onde. Dans un milieu où la vitesse Vs varie verticalement, les ondes de surface de différentes longueurs d'ondes se propagent à des vitesses différentes : elles sont dites « dispersives ». Cette dispersion est alors représentée par ce diagramme appelé « courbe de dispersion ».

Le choix de la bande de fréquence est important pour la tomographie. Elle dépend du type de capteurs utilisés, du milieu mais aussi du nombre et de l'emplacement des capteurs dans la zone d'étude.

Cette méthode mise en œuvre sur 3 sites distincts en rive droite du Rhône (fig. 1) permet de caractériser les terrains en place en termes de vitesses sismiques Vs:

Site des Clavelières

Un réseau de 391 capteurs a été répartis selon un maillage de 7 m x 8 m soit 176 m de long par 112 m de large.

Site du Vernay

Un réseau de 597 capteurs a été répartis selon un maillage de 8 m x 9 m soit 224 m de long par 180 m de large. 4 capteurs nommés GPR ont été positionnés dans le Rhône et 3 capteurs ont été mis dans la continuité des GPR côté rive gauche.

Site de Buyatte

Un réseau de 209 capteurs a été répartis selon un maillage de 7 m x 8 m soit 144 m de long par 70 m de large.

Une surface totale de 70112 m² a donc été prospectée.

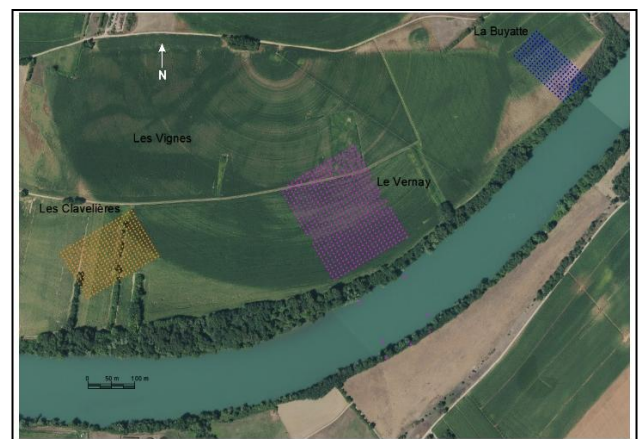


Figure 1. Réseaux de capteurs. Points jaunes : 391 capteurs sur le site de Clavelières ; points violets : 604 capteurs sur le site de Vernay incluant des nœuds subaquatiques dans le Rhône ; points bleus : 209 capteurs sur le site de Buyatta.

Les capteurs sont des géophones autonomes qui enregistrent du signal dans la bande de fréquence de 5 Hz (fréquence de coupure des géophones) à 125 Hz (fréquence de Nyquist, égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage paramétrée).

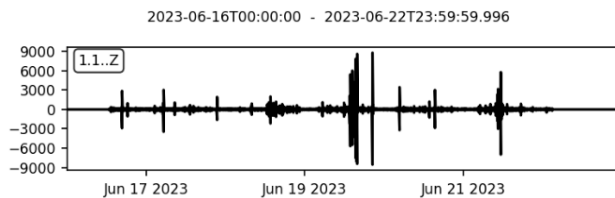


Figure 2 : Composante verticale des données brutes continues, enregistrées par un capteur choisis aléatoirement, site du Vernay.

La géométrie du réseau (notamment la distance entre les capteurs et les dimensions du réseau) définit la résolution horizontale du modèle 3D final de Vs et la profondeur d'investigation estimée.

La durée d'enregistrement variait entre 168 et 192 heures par site. Le jeu de données final comprend plus de 300 000 mesures d'inter-corrélations (fig. 3).

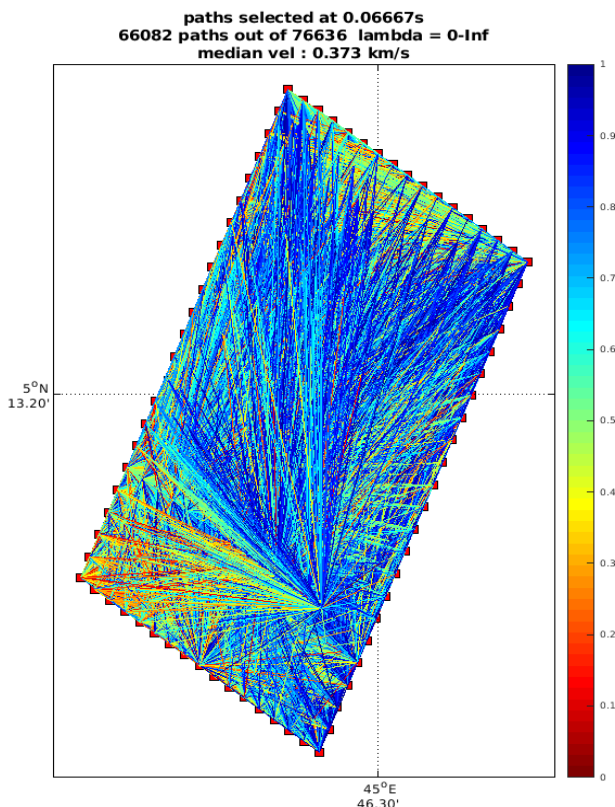


Figure 3 : Un exemple de carte des paires de capteurs sélectionnés à 15 Hz. Le nombre de paires de capteurs équivaut aux nombres de mesures de vitesse, Site des Clavières

Sur les images de dispersion calculées par pair de capteur (à partir des inter-corrélations), on s'intéresse uniquement au mode fondamental de l'onde de Rayleigh à partir de laquelle on obtient la vitesse de cisaillement.

Les courbes de dispersion de l'onde de Rayleigh sont pointées entre 2 et 25 Hz (fig. 4). Au-delà de 25 Hz les courbes sont bruitées et le mode fondamental est perturbé par la présence des modes supérieurs. En prenant en compte cette bande de fréquence et les valeurs de vitesses sur les courbes de dispersion on estime, à cette étape de traitement, pouvoir investiguer le milieu jusqu'à 60 m de profondeur au maximum.

Les courbes de dispersion sont régionalisées dans la zone d'étude et ensuite inversées dans la bande de fréquences 2–25 Hz. Le modèle de référence de l'inversion est inspiré des données géologiques obtenues grâce aux sondages carottés faits dans la zone d'étude. Un profil 1D de variations de vitesse des ondes de cisaillement (Vs) en profondeur est obtenu à partir de l'inversion, dans chaque maille de la zone. L'ensemble des modèles 1D de Vs juxtaposés reconstruit le modèle 3D de Vs.

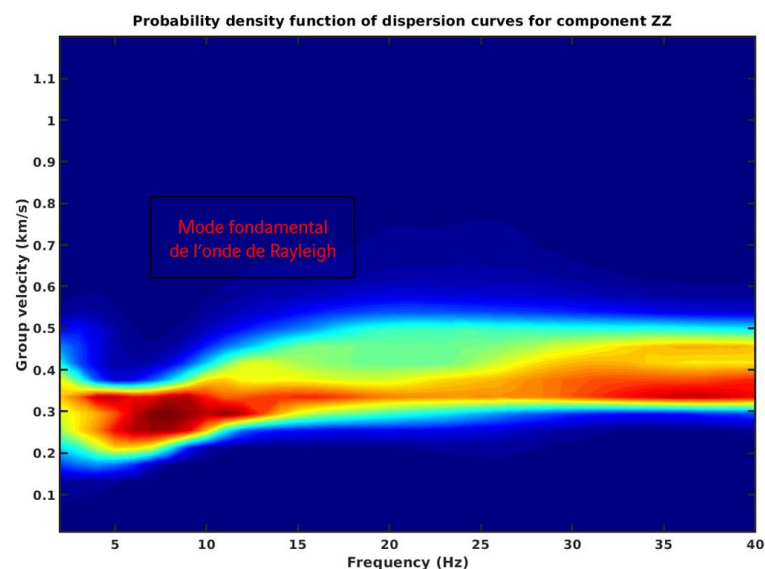


Figure 4 : Courbe de dispersion moyenne. Site du Vernay (zone de 600 capteurs).

Les modèles 3D finaux fournissent une représentation continue de la vitesse des ondes de cisaillement dans les 60 premiers mètres de profondeur, offrant des informations clés sur la structure du sous-sol, les transitions lithologiques ainsi que les zones de perméabilité potentielle ou de faiblesse mécanique.

Dans ce projet, la profondeur moyenne de l'eau dans le Rhône est d'environ 5 mètres. Aux hautes fréquences, lorsque la longueur d'onde devient comparable ou inférieure à deux fois la profondeur d'eau, les vitesses des ondes de surface enregistrées près de la surface peuvent être légèrement biaisées en raison de la présence de la couche d'eau. En effet, dans ces conditions, les vitesses de groupe mesurées peuvent correspondre à des ondes de Scholte plutôt qu'à des ondes de Rayleigh [Boiero et al. 2010, Zheng et al. 2018, Scholte et al. 1947]. Les ondes de Scholte, qui se propagent le long de l'interface eau-sédiment, se déplacent généralement à des vitesses légèrement inférieures à celles des ondes de Rayleigh. Toutefois, cette différence est en général de l'ordre de quelques pourcents, comparable à l'erreur d'inversion, et peut donc être considérée comme négligeable. De plus, la profondeur d'eau restant relativement constante sur l'ensemble du site, les variations latérales de Vs sont préservées et demeurent fiables.

3 RESULTATS ET INTERPRETATION

Les figures 5 et 6 représentent des coupes 2D extraites du modèle 3D de Vs. Dans la figure 5 les coupes latérales sont aux profondeurs des fondations du barrage et de l'usine hydroélectrique. La figure 6 représente des coupes transverses aux intersections de sondages géotechniques dans la zone.

La résolution horizontale du modèle 3D de vitesses est équivalente à la distribution des capteurs en surface et donc égale à la distance entre les capteurs (étant donné qu'on extrait une mesure de Vs entre 2 capteurs). Dans une zone moins dense en capteurs, la résolution du modèle est moindre. La résolution verticale est de l'ordre d'un mètre et diminue en profondeur.

On rappelle qu'un horizon sismique ne correspond pas forcément à un horizon géologique. Les vitesses sismiques signalent des contrastes de densité et de résistance de cisaillement ($G_{max} = \rho V_s^2$) des matériaux. Deux horizons géologiques peuvent avoir une même densité. Un contraste de vitesse inférieur au misfit (moyenne de 5 à 7% selon ce site) n'est pas forcément interprétable.

Dans cette étude, les modèles 3D de vitesse des ondes de cisaillement (Vs) révèlent la structure interne du sous-sol sur les trois zones d'étude :

- **Clavelières** présente une hétérogénéité latérale marquée, avec des Vs atteignant jusqu'à 600 m/s, et des zones de faibles vitesses particulièrement prononcées à l'est et à l'ouest.
- **Vernay** se caractérise par des Vs plus élevées (jusqu'à 700 m/s) et une stratification plus homogène au-delà de 10 m de profondeur.
- **Buyatte** montre des vitesses globalement plus faibles (environ 450 m/s au maximum), suggérant des dépôts plus récents ou plus meubles.

Les valeurs de Vs30 (fig. 7) varient entre 250 et 510 m/s, en cohérence avec les classifications de l'Eurocode 8. Les zones présentant des Vs supérieures à 450 m/s aux profondeurs cibles de fondation indiquent des conditions favorables à l'implantation d'infrastructures, tandis que les zones à faibles Vs peuvent signaler des couches à risque ou hydrauliquement actives.

Les figures illustrant l'implantation des capteurs et les coupes de vitesse apportent une validation visuelle de la précision de la méthode.

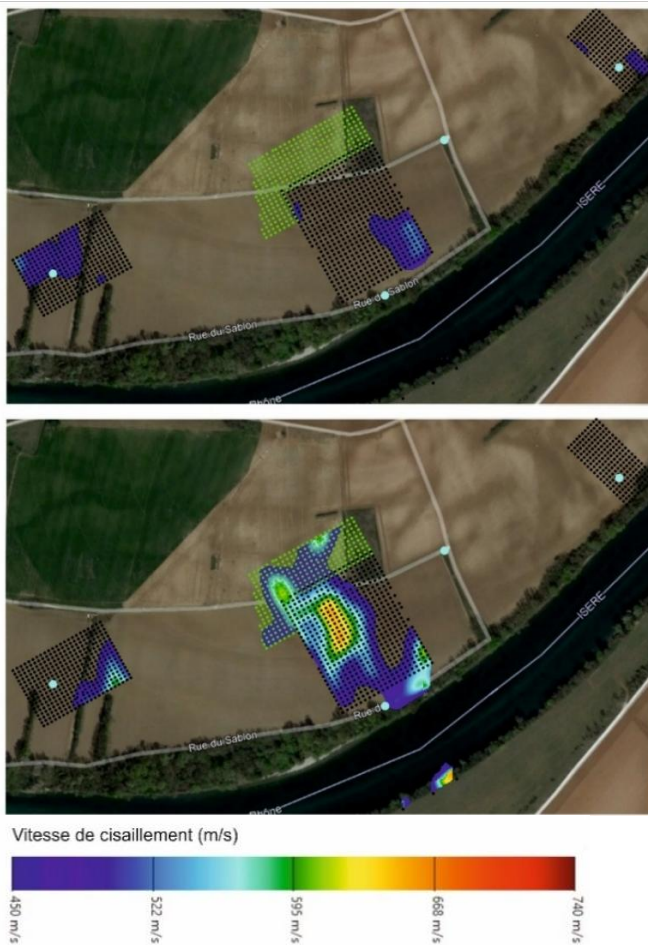


Figure 5. Coupes 2D de la vitesse V_s à différentes profondeurs (extraites du modèle 3D), avec un focus sur les zones de faibles vitesses, centrées sur la fondation du barrage, site de Clavelières. Figures du haut : coupes à la profondeur correspondant au niveau de fondation du barrage (180.25 mNGFO, en moyenne 5m de profondeur) ; figures du bas : coupes à la profondeur correspondant au niveau de fondation de l'usine hydroélectrique (163.25 mNGFO, en moyenne 22m de profondeur).

Une analyse comparative entre les coupes géologiques issues des sondages et les résultats du modèle 3D de vitesse des ondes de cisaillement (V_s) a été réalisée au droit de quatre forages géotechniques. Un exemple de comparaison des résultats du modèle 3D de V_s obtenu par ANT et les coupes géologiques est présenté dans la figure 6. Les figures correspondantes présentent, pour ce point, une coupe 2D du modèle V_s corrélée au sondage considéré, ainsi que deux vues 3D permettant de situer spatialement la coupe dans le modèle global. Sur l'ensemble du site, les vitesses V_s varient entre environ 210 m/s et 740 m/s.

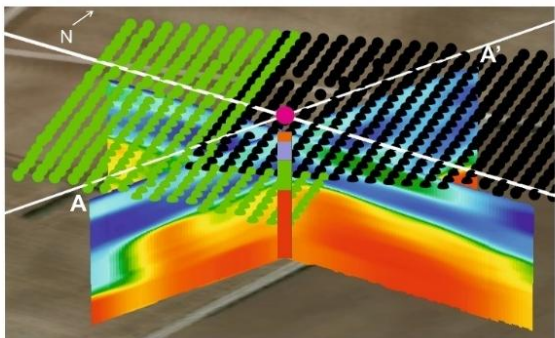
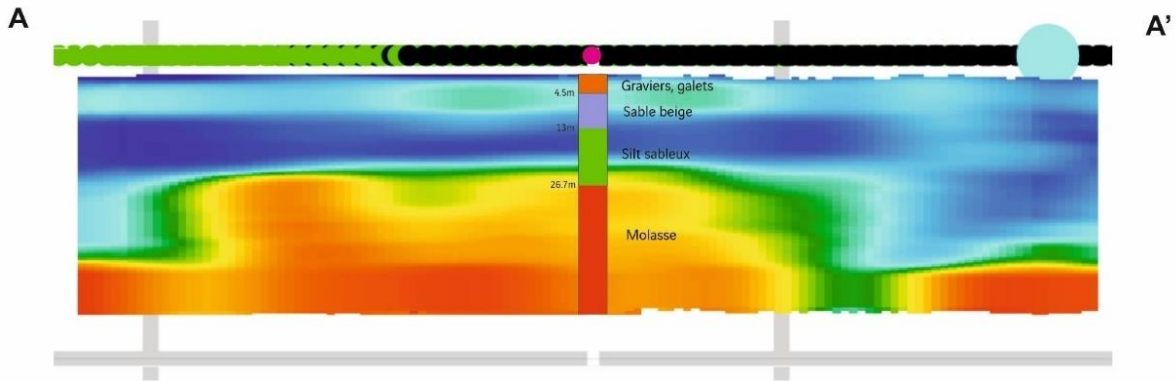
Au site des Clavelières, les résultats du modèle 3D de V_s apparaissent globalement cohérents avec les données du sondage. Les coupes montrent des vitesses

relativement élevées en surface, suivies d'une diminution intermédiaire puis d'une augmentation en profondeur. Cette succession de niveaux plus rigides, moins rigides puis de nouveau plus rigides est en accord avec la stratigraphie décrite au sondage. La couche superficielle à vitesses élevées correspond aux niveaux de sables et graviers, ainsi qu'aux sables à passées limoneuses jusqu'à environ 15-16 m de profondeur. Les vitesses plus faibles observées en dessous peuvent être associées à des sables limoneux à passées argileuses. Vers 43 m de profondeur, l'augmentation des vitesses traduit le passage à des matériaux plus denses, compatibles avec les silts limono-argileux identifiés dans le forage.

Au site du Vernay, le modèle 3D de V_s est également cohérent avec le sondage. Les coupes mettent en évidence une augmentation progressive des vitesses avec la profondeur. Les vitesses faibles de la couche superficielle correspondent aux graves sableuses et sables grossiers jusqu'à environ 10 m. Des vitesses similaires mais légèrement plus élevées entre 10 m et 23 m sont compatibles avec des sables fins. Entre environ 23 m et 38 m de profondeur, les vitesses correspondent à des silts et argiles grises, puis à des marnes argileuses. En dessous, l'augmentation des vitesses ($> 480-500$ m/s) traduit l'entrée dans le substratum altéré (calcaire gréseux), conformément au sondage.

Au site de Buyatte, le modèle 3D de V_s montre une alternance de couches rapides et lentes en accord avec le sondage dans la zone. La couche superficielle à vitesses relativement élevées correspond aux sables et graviers jusqu'à environ 15-16 m. Les vitesses plus faibles observées jusqu'à environ 46 m peuvent être reliées à l'alternance de sables fins, silts et argiles décrite au forage. Il est toutefois à noter que la coupe géotechnique ne distingue pas d'horizon particulier entre 36,5 m et 46 m de profondeur, alors que le modèle V_s met en évidence une augmentation progressive des vitesses dans cet intervalle. Cette évolution pourrait traduire une zone de transition mécanique au sein d'un même horizon lithologique, non individualisée dans la description géologique.

Dans l'ensemble, la comparaison entre les modèles 3D de V_s et les sondages géotechniques montre une bonne cohérence entre les variations de vitesse et la stratigraphie, confirmant la capacité de la méthode ANT à imager les contrastes mécaniques du sous-sol et à restituer la structure interne des formations superficielles.



Site du Vernay

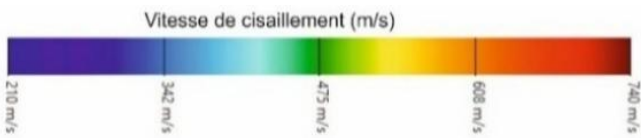
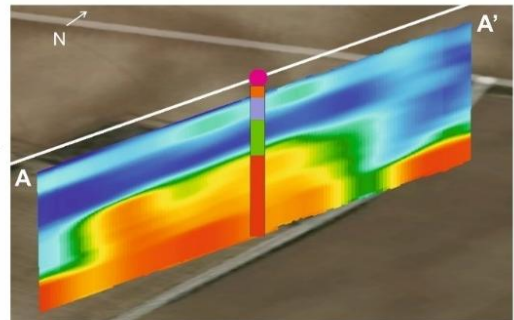


Figure 6. Comparaison des valeurs de V_s obtenues par ANT (de la surface à 60m de profondeur) à l'intersection d'un forage dans la zone, site de Vernay. Les points représentent l'emplacement des capteurs de surface.

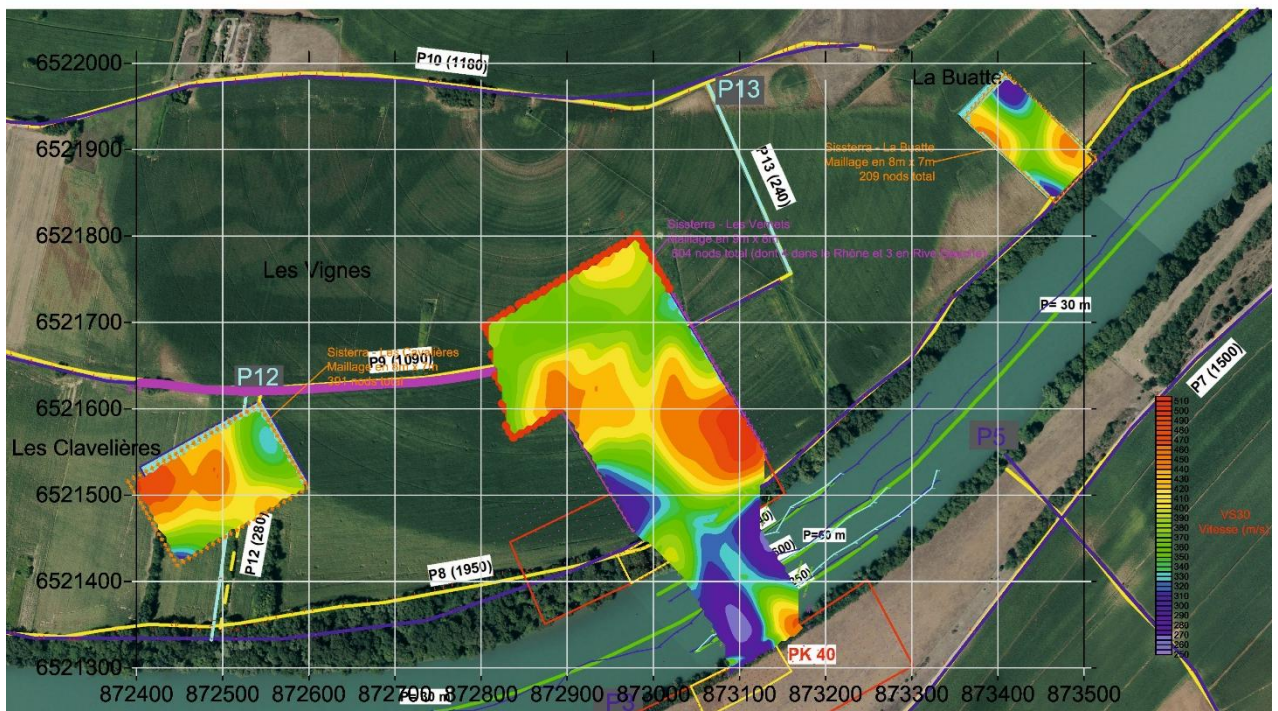


Figure 7. Cartes de V_{s30} (vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres).

4 CONCLUSION

Ce projet a démontré la valeur ajoutée de la tomographie 3D par bruit ambiant (ANT) pour la prospection géologique et géothermique dans des environnements complexes. Au-delà de la production de modèles haute résolution de vitesse des ondes de cisaillement, la stratégie de déploiement, incluant un ensemble de capteurs sismiques placés directement dans le Rhône, a mis en évidence l'adaptabilité de la méthode dans des contextes mixtes terre-eau. Cela a permis d'assurer une couverture latérale continue, condition clé pour une interprétation fiable des structures du sous-sol dans des zones hydro-géologiquement sensibles.

Grâce à son caractère passif et non intrusif, l'ANT a fourni des données spatialement cohérentes sur des terrains variés tout en limitant au maximum l'impact environnemental. La présence d'une couche d'eau peu profonde et relativement uniforme n'a introduit qu'un biais limité et bien compris près de la surface, sans affecter la fiabilité des contrastes de vitesse en profondeur ni des variations latérales.

Les modèles de Vs obtenus ont permis d'identifier les transitions entre faciès sédimentaires, les zones de faible cohésion des matériaux et les voies potentielles de circulation préférentielle de l'eau, des informations essentielles tant pour le ciblage des ressources géothermiques que pour l'évaluation des risques géotechniques.

Ce cas confirme la pertinence de l'ANT 3D comme solution pratique et efficace pour la caractérisation de sites en phase préliminaire, notamment dans les zones où les méthodes traditionnelles sont limitées par les conditions de surface, l'accès ou la sensibilité environnementale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Brenguier, F., N. M. Shapiro, M. Campillo, A. Nercessian, and V. Ferrazzini, 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02305, doi:10.1029/2006GL028586 (2007a).
- Brenguier, F., N. M. Shapiro, M. Campillo, A. Nercessian, and V. Ferrazzini, 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02305, doi:10.1029/2006GL028586 (2007b).
- Duvall, T., Jefferies, S., Harvey, J. & Pomerantz, M. Time–distance helioseismology, *Nature*, 362, 430–432 (1993).
- Gouédard, P. et al. Cross-correlation of random fields: mathematical approach and applications, *Geophys. Prospect.*, 56(3), 375–393 (2008).
- Mordret, A., N. M. Shapiro, S. Singh, P. Roux, and O. I. Barkved, Helmholtz Tomography of ambient noise surface wave data to estimate Scholte wave phase velocity at Valhall Life of the Field, *Geophysics*, 78(2), WA99–WA109. doi: 10.1190/geo2012-0303.1 (2013).
- Roux, P., Antoine Roueff and Marc Wathelet, The San Andreas Fault revisited through seismic-noise and surface-wave tomography, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13319, (2011).
- Sabra, K., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. & Fehler, M. Surface wave tomography from microseisms in Southern California, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14311, doi:10.1029/2005GL023155 (2005).
- Shapiro N.M., and M. Campillo, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophys. Res. Letters*, VOL. 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491 (2004).
- Shapiro, NM, M. Campillo, L. Stehly and M. Ritzwoller, High Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise, *Science*, 307, 1615-1618 (2005).
- Olivier, G., F. Brenguier, M. Campillo, P. Roux, N. M. Shapiro, R. Lynch, Investigation of co- and post-seismic processes with in-situ measurements of seismic velocity variations in an underground mine, *Geophys. Res. Letters* (2015).
- Wapenaar, K. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation, *Phys. Rev. Lett.*, 93(25), 254301, doi:10.1103/PhysRevLett.93.254301 (2004).
- Weaver, R. & Lobkis, O. Ultrasonics without a source: thermal fluctuation correlations at MHz frequencies, *Phys. Rev. Lett.*, 87(13), 134301, doi:10.1103/PhysRevLett.87.134301. Webb, S., 1998. Broadband seismology (2001)
- Boiero, D. & Socco, L.V. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models, *Established approaches and new perspectives, Geophysics*, 75(5), 75A83–75A102, doi:10.1190/1.3479491. 2010.
- Zheng, Y., Hu, H. & Zeng, C. Effects of the water layer on surface wave dispersion curves and inversion results, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2018, 2998–3002, doi:10.1190/segam2018-2998146.1.
- Scholte, J.G. The range of existence of Rayleigh and Stoneley waves, *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 5(3), 120–126 (1947).