

RAILWAVES 1.0 toolbox: toward intelligent integration of geotechnical and hydrogeological data for the diagnosis and monitoring of railway embankments with surface waves

Boîte à outils RAILWAVES 1.0 : vers une intégration intelligente des données géotechniques et hydrogéologiques pour le diagnostic et la surveillance des plateformes ferroviaires à l'aide d'ondes de surface

Ludovic Bodet^{1*}, *Audrey Burzawa*^{1,2}, *José Cunha Teixeira*^{1,2}, *Marine Dangeard*², *Amélie Hallier*², *Joséphine Boisson Gaboriau*², *Amine Dhemaied*²

¹ Sorbonne Université, 4 place Jussieu, 75252 Paris, France

² SNCF Réseau, 6 avenue F. Mitterrand 93574 La Plaine Saint-Denis, France

Abstract. In a context where low-carbon transportation is increasingly essential, the diagnosis and maintenance of railway infrastructures have become critical challenges. Current assessment techniques still rely heavily on destructive testing of embankments, sublayers, and underlying soils. These structures are also exposed to more frequent and less predictable extreme climatic events, threatening their mechanical integrity and long-term stability. High-density, high-resolution geophysical methods therefore offer a compelling non-destructive alternative, particularly for characterizing and monitoring soil mechanical properties. Over the past decade, major advances have been made in seismic acquisition, processing, and interpretation. We present an overview of our recent contributions, primarily based on surface-wave methods, which require low-energy sources and are well adapted to railway environments. We developed high-yield acquisition strategies using landstreamers, combined with classic active and passive (train) sources. Stacking and interferometry-based approaches extract multimodal dispersion images, enabling detection of lateral variations within embankments and continuous site monitoring. Deep learning supports semi-automatic picking and interpretation, while Bayesian inversion and physics-aware AI models integrate geotechnical and hydrogeological data to rapidly infer petro- and hydro-facies and track water-table dynamics. We conclude with a roadmap for future developments, including the integration of distributed acoustic sensing.

* Corresponding author: ludovic.bodet@sorbonne-universite.fr

Résumé. Dans un contexte où les transports bas carbone deviennent indispensables, le diagnostic et la maintenance des infrastructures ferroviaires constituent aujourd'hui des enjeux majeurs. Les techniques d'évaluation courantes reposent encore largement sur des tests destructifs des plateformes ferroviaires, des sous-couches et des sols sous-jacents. Ces structures sont en outre exposées à des événements climatiques extrêmes, plus fréquents et moins prévisibles, qui menacent leur stabilité. Les méthodes géophysiques à haute densité et haute résolution offrent une alternative non destructive particulièrement adaptée pour caractériser et suivre les propriétés mécaniques des sols. Au cours de la dernière décennie, la communauté a réalisé des avancées majeures en acquisition, traitement et interprétation sismiques. Nous présentons ici une synthèse de nos développements récents basés sur l'analyse des ondes de surface, méthodes nécessitant des sources peu énergétiques et bien adaptées au contexte ferroviaire. Nous avons conçu des stratégies d'acquisition à haut rendement avec *landstreamers* déployés le long des voies, utilisant des sources classiques actives et passives (trains). Des approches de sommation et d'interférométrie permettent d'extraire des images de dispersion multimodales pour détecter les variations latérales et assurer un suivi continu. L'apprentissage profond facilite le pointé et l'interprétation, tandis que l'inversion bayésienne et des modèles d'IA intégrant des données géotechniques et hydrogéologiques permettent d'inférer rapidement les pétro- et hydro-faciès et de suivre la nappe. Nous concluons par une feuille de route incluant l'intégration de mesures acoustiques distribuées.

1 Introduction

La conception, la régénération et la maintenance des lignes ferroviaires exigent une évaluation et un contrôle régulier (qualitatifs comme quantitatifs) de l'état mécanique des structures d'assises et du sol support. L'accessibilité au sol support, ainsi qu'à la sous-couche et la couche de forme pour les lignes à grande vitesse (LGV), ou bien la couche intermédiaire pour les lignes classiques (LC), demeure particulièrement difficile en raison des contraintes d'exploitation du réseau ferroviaire. Le paramètre standard considéré pour leur dimensionnement est très souvent la portance, obtenue par sollicitation mécanique dynamique des couches. La mise en œuvre de ces essais nécessaires à son évaluation, pose cependant des difficultés lorsqu'ils doivent être déployés le long de grands linéaires (contraintes de rendements et donc de coûts). De même, les techniques complémentaires classiquement employées pour une évaluation avancée des plateformes ferroviaires (PF) sont destructrices (sondages géotechniques, carottages), ponctuelles, coûteuses (et à faibles rendements également).

La mise en place de techniques d'investigations non-destructives permettant une surveillance à l'avancement est donc d'un grand intérêt pour le perfectionnement du contrôle des PF. Outre les techniques de nivellement, le georadar (GPR) est par exemple employé pour l'auscultation des couches très superficielles (stratigraphie, état hydrique). Dans un rendement moindre, la micro-gravimétrie peut être utilisée pour localiser des cavités et/ou des zones décomprimées [1, 2]. Aucune de ces méthodes ne donne cependant d'information sur les modules mécaniques des PF et des sols supports associés. C'est pourquoi nous avons, ces dernières 10 dernières années, proposé de nombreux développements en géophysique (*i.e.*, non-destructifs) afin de : proposer des méthodes capables de caractériser mécaniquement les PF et les sols présents sous les voies ferrées ; discriminer les différents matériaux et sols constituant ces structures ; surveiller différents états d'un même matériau (teneur en eau, compactations/décompactations etc.) ; fournir des résultats avec des capacités de quantifications et des résolutions (verticales comme latérales) ainsi que des rendements

suffisants pour une aide décisionnelle, *i.e.* permettant d'orienter les choix en termes de conception, de surveillance et de maintenance.

2 Travaux préliminaires

A partir d'études en laboratoire, [3] a montré que la vitesse de cisaillement des ondes sismique (VS) pouvait être un bon critère d'évaluation de l'état mécanique des sols supports. Les techniques de mesures directes de VS par *bender elements* à l'échelle centimétrique peuvent ainsi être déployées pour le contrôle *in situ* et l'optimisation du dimensionnement [4]. Mais l'estimation indirecte de VS peut être également proposée grâce à la technique d'inversion de la dispersion des ondes sismiques de surface qui a émergé ces 10 dernières années en contexte ferroviaire [5, 6]. Des études de faisabilité de ces approches comme moyen de caractérisation *in situ* des VS de la PF en elle-même, quel que soit le type de voie ou le type de problématiques rencontrées [7, 8] ont permis de : 1, définir un dispositif, un protocole d'acquisition et une méthode de traitement adaptés à l'estimation *in situ* des variations de VS de la PF sur la base de la méthode de prospection sismique par ondes de surface ; 2, détecter et identifier l'origine de « défauts de la PF le long d'une LGV, simplement par l'extraction systématique du mode fondamental de propagation des ondes de surface ; 3, localiser des zones problématiques et en suggérer l'origine en profondeur dans le cas de LC, malgré de fortes hétérogénéités en surface et une implantation délicate des géophones.

Si ces avancées sont apparues très encourageantes, elles restent à déployer dans différents contextes ferroviaires et à être optimisées afin de proposer le développement d'une méthodologie opérationnelle, polyvalente (*i.e.*, adaptable à la variété du patrimoine des PF et la diversité des pathologies qu'il s'agit de surveiller) et efficace, associée à une boîte à outils bénéficiant notamment des plus récents progrès en termes d'acquisitions, traitements et interprétations sismiques.

3 Railwaves 1.0 : outil de diagnostic géotechnique

3.1 Mesures

L'utilisation de dispositifs ne nécessitant pas d'implantation des géophones et/ou dotés de sources automatiques a été évaluée dans le cadre de plusieurs campagnes de mesures sur LGV. [9] a en particulier comparé de façon systématique des données collectées avec un *landstreamer* à celles d'un dispositif d'acquisition traditionnel (*i.e.*, avec des géophones *plantés*). Une fois les résultats validés, le *landstreamer* a été déployé sur la voie et a permis une caractérisation plus étendue de la zone (plusieurs centaines de mètres) avec une augmentation de l'ordre de 50 % du rendement d'acquisition.

3.2 Traitements (données dites actives)

Les techniques et outils de sommation de la dispersion des ondes de surfaces développés par [10] ont été adaptées à l'environnement ferroviaire et aux optimisations citées *supra*, permettent de profiter de la redondance de données le long de profils faisant l'objet de tir multiples pour des positions de géophones similaires. Deux configurations ont été considérées avec : 1, un dispositif fixe (la position des géophones ne change pas, les tirs sont répartis le long du dispositif statique de mesures) ; 2, un dispositif *landstreamer* (un seul tir par dispositif puis déplacement latéral des géophones).

3.3 Traitements (données dites passives)

Des travaux ont également permis d'optimiser l'utilisation de trains comme sources sismiques [11] en implémentant des techniques de détection automatique, d'interférométrie et de sommation des signaux produit par plusieurs trains pour produire, grâce à l'énergie de telles sources, des images de dispersion de très bon rapport signal sur bruit [12].

3.4 Traitements (pointé automatique)

Malgré la qualité des images de dispersion mentionnée *supra*, les phases de pointés manuels restent particulièrement fastidieuses et nécessitent de l'expertise. Un outil d'aide au pointé de la dispersion basé sur un modèle de segmentation d'image (type U-Net) est donc en développement [13]. L'apprentissage a été réalisé sur des données issues de modélisations par différences finies de PF caractéristique du réseau ferrée national. Celui-ci doit être augmenté avec des données réelles et un niveau supérieur de complexité de structures (distribution de vitesse, présence de pendages de couches, etc.).

3.5 Inversion probabiliste

L'approche Bayésienne a été proposée par [9, 15] afin de proposer des modèles de VS (figure 1a) en termes de probabilité (figure 1b) pour une interprétation des incertitudes *a posteriori* sur les résultats fournis aux opérateurs. Un des points forts de cette méthode est sa capacité à profiter de très fortes connaissances *a priori* disponibles en contexte ferroviaire en général et le long de LGV en particulier (l'implémentation de recherche systématiques pour une inversion exhaustive peut même dans ce dernier cas être proposée).

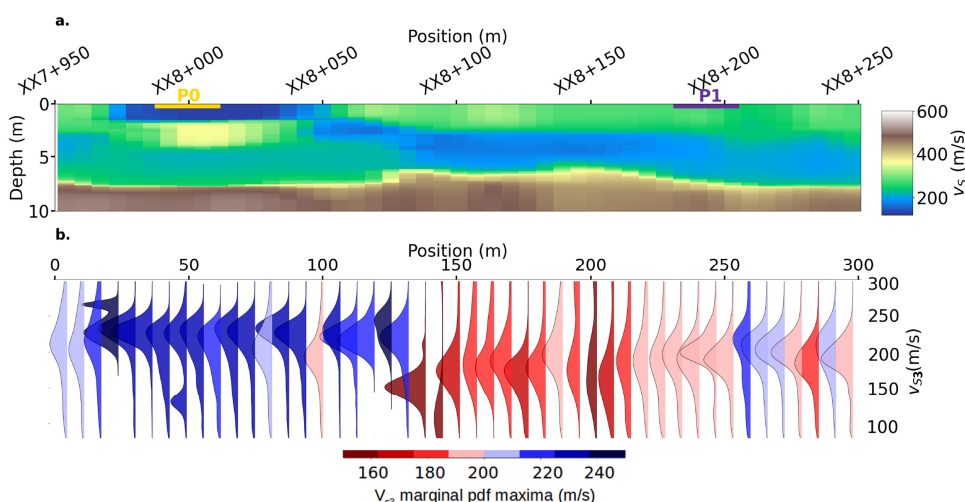


Fig. 1. a. Pseudo-section 2D VS construite en juxtaposant plusieurs inversions bayésiennes 1D le long d'un profil *landstreamer* (P0 et P1 sont des zones de validation présentées en détail dans [9] dont la figure est tirée). b. 1D marginal du paramètre VS dans la 3e couche identifiée le long de la ligne. L'échelle de couleurs est représentée en fonction du VS maximal estimé pour chaque inversion 1D. Résultats obtenus avec la boîte à outils développée par [19].

4 Railwaves 1.0 : outil de suivi temporel hydrogéophysique

Aller au-delà d'une caractérisation en termes de modules mécanique, la nature même des sols et leur contenu en eau [15, 16] influencent directement leur résilience et leur durabilité. Cela est particulièrement vrai dans les zones urbaines à l'activité humaine concentrée en plus des événements climatiques extrêmes. Dans le cadre de ces études, nous avons exploré le potentiel de l'intelligence artificielle (IA) pour proposer une caractérisation intégrée des propriétés des sols, mariant géomécanique et hydrogéologie. Nous avons montré dans un premier temps que de simples réseaux de neurones peuvent extrapoler efficacement des cartes de la nappe phréatique à partir de données de vitesse sismique 2D observées, en utilisant un nombre limité d'observations piézométriques spatiales [17]. Cependant, la dépendance à des mesures piézométriques directes limite l'applicabilité plus large de cette méthode.

Pour surmonter cette limitation, nous avons développé SILEX (Surface wave Inversion Lexicon, cf. figure 2) un modèle de langage, inspiré des architectures de traduction automatique neuronale et de reconnaissance vocale [18]. Conçu pour proposer une inversion pétrophysique, le modèle traduit les données de vitesse sismique en descriptions textuelles détaillées des propriétés de la proche surface, incluant la composition des sols, les paramètres géomécaniques et les conditions hydrogéologiques.

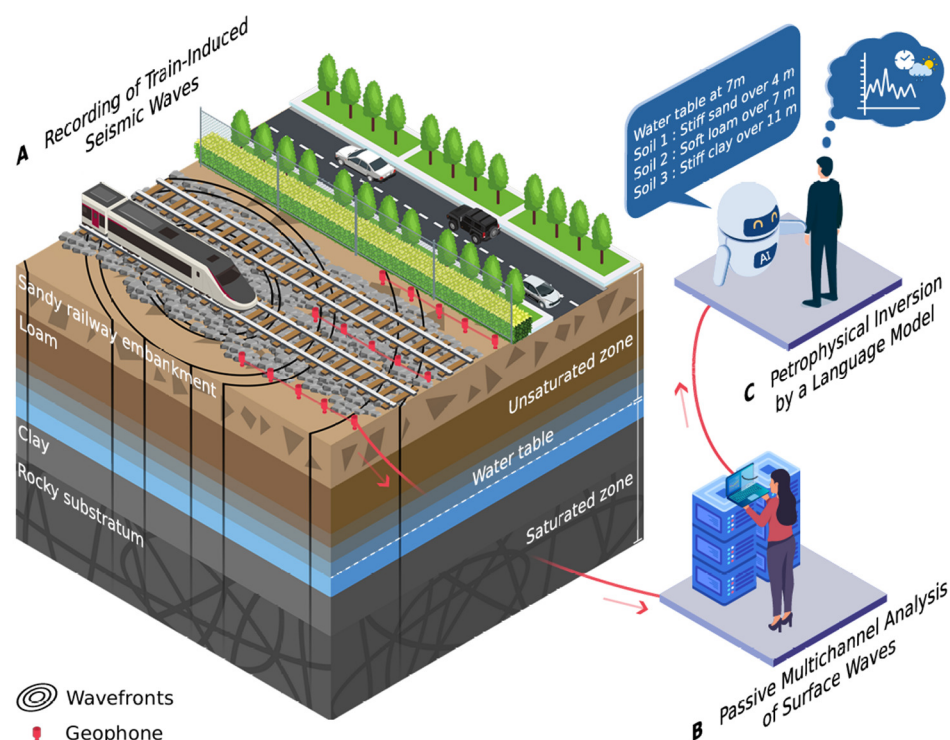


Fig. 2. Description conceptuelle schématique de SILEX tirée de [18]. (a) Les ondes sismiques induites par le train sont enregistrées le long de plusieurs lignes de géophones, en se concentrant sur les ondes de Rayleigh. (b) Ces signaux sont analysés à l'aide de la méthode passive-MASW, qui permet d'estimer une courbe de dispersion (vitesse de phase des ondes de Rayleigh en fonction de la fréquence) à chaque emplacement de géophone le long des lignes de géophones. (c) Chaque courbe de dispersion est ensuite inversée à l'aide d'un modèle de langage entraîné afin d'obtenir une description textuelle pétrophysique de la subsurface. À partir de ces descriptions, une image 3D de la subsurface peut être construite pour une meilleure visualisation. Cette procédure automatisée fonctionne quotidiennement, ce qui permet de surveiller en continu les conditions hydrogéologiques de la subsurface et les états géomécaniques au fil du temps, en fonction du forçage environnemental.

Ces approches ont été validées sur un site ferroviaire dans la région Grand Est [18], en France, une zone sujette à des affaissements de terrain affectant les infrastructures de transport. Une analyse des ondes sismiques de surface par les trains a permis de mesurer quotidiennement leur dispersion, le long de 5 profils et pendant plusieurs mois, en parallèle à un suivi piézométrique. Les résultats montrent que SILEX peut interpréter ces données en hydrofacies et hauteur de nappe avec une erreur quadratique moyenne normalisée de 8 %. SILEX égale ainsi la précision des méthodes conventionnelles d'inversion, tout en offrant un flux de travail 2000 fois plus rapide et des informations adaptées sur la proche surface (résultats validés grâce au suivi piézométrique et à plusieurs forages sur le site, cf. figure 3).

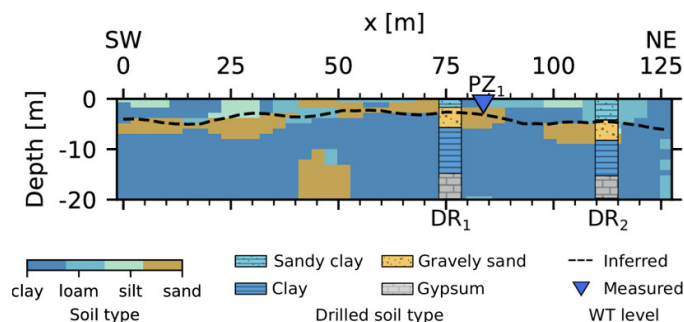


Fig. 3. Représentation en coupe des résultats de l'inversion pétrophysique à l'aide du modèle SILEX, tirée de [18], pour une ligne de géophone sur une journée. Les natures de sol identifiées à partir des forages à DR1 et DR2, ainsi que le niveau de la nappe phréatique mesuré au piézomètre PZ1. Ces résultats peuvent être produits très rapidement, en 1D, pseudo 2D ou 3D et de façon journalière.

5 Conclusions and perspectives

5.1 Inversion pour une aide décisionnelle

L'application de l'intelligence artificielle à l'inversion de données sismiques représente une voie prometteuse. Bien que les modèles mentionnés *supra* soient dépendants du type de PF ou d'ouvrages via leurs bases d'apprentissage (données réelles ou modélisations), ils montrent des fortes performances de généralisation. Il reste cependant important de les adapter à la boîte à outils pour en faire de véritables instruments d'aide à la décision pour les praticiens ou opérationnels non familiers des contextes théoriques et méthodologiques sous-jacents. De la même façon que SILEX propose l'intégration de données géotechniques, hydrologiques et sismiques, les outils d'inversion doivent être adaptés au PF plus anciennes ne fournissant que de faibles *a priori* sur leurs structures et états de dégradation dû au vieillissement. Dans ce sens les jeux de données acquises en GPR et pénétromètres dynamiques, presque systématiquement réalisées sur le réseau ferré national lors de la phase diagnostic des PF, pourraient être associées aux données sismiques dans des approches d'inversion jointe.

5.2 Vers des mesures opérationnelles le long de grands linéaires

La fibre optique et les systèmes de type *distributed acoustic sensing* sont notamment utilisés pour évaluer les interactions sol-structure, le monitoring d'ouvrages tel que les ponts et pour caractériser la proche surface par approche sismiques actives ou passive. Les perspectives offertes par l'utilisation de la FO installée aux abords des voies pour identifier les zones de désordres et/ou surveiller les phénomènes dynamiques sont donc prometteuses. Il reste

essentiel d'évaluer si cette méthode est capable de détecter les mêmes variations que les dispositifs placés en surface, en termes de profondeur d'investigation et de résolution notamment.

5.3 Phénomènes dynamiques et surveillance hydrogéophysique

Il est essentiel de poursuivre la caractérisation des phénomènes dynamiques, tels que l'effet de pompage au passage des trains, et de mieux comprendre le lien entre la vitesse des trains et la détérioration des couches sous-ballast. Ces études permettront d'améliorer les modèles mécaniques des plateformes et d'assurer une meilleure gestion de la maintenance.

La capacité à fournir des descriptions pétrophysiques et hydrogéologiques au pas journalier, fait des méthodes développées dans ces études des outils puissants pour la surveillance de la proche surface dans des environnements dynamiques et sujets à aléas naturels. Au-delà des aspects ferroviaires, ces résultats soulignent le fort potentiel des techniques d'inversion sismique pilotées par l'IA pour faire face aux *géorisques*, améliorer la caractérisation des eaux souterraines et renforcer la résilience des infrastructures

Remerciements

Les traitements et inversions mentionnés dans ces études sont effectués à l'aide de la boîte à outils développée par Cunha Teixeira et coll. [19] disponible à <https://doi.org/10.5281/zenodo.17639980> et mise à disposition des praticiens et de la communauté à travers un ensemble de codes en accès libre et à l'interface d'utilisation simplifiée pour des utilisateurs moins familiers des méthodologies sous-jacentes. Les figures de cette revue sont tirées des travaux de Burzawa et coll. [9] disponible à <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.16491> ainsi que de Cunha Teixeira et coll. [18], disponible à <https://doi.org/10.1029/2025GL114852>. Ce travail a été financé par les contrats de recherche SNCF Réseau–CNRS–Sorbonne Université (C13/411, C15/0781, C21/1995, C21/1996, C24/2138) et les conventions de thèses de doctorat ANRT/CIFRE–SNCF Réseau 2021/1552 & 2021/0789.

Références

1. Talfumiere, V., Nebieridze, S., Detection of cavities using ambient noise as seismic source – gare de l'est. In: Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG'08 - Nantes, 18-20 juin 2008 (2008)
2. Nebieridze, S., Leroux, P., Geotechnics, geophysics; a help to the earthworks diagnosis example: The excavation of Versigny. In: Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012–Bordeaux 4-6 juillet 2012 (2012)
3. Dhemaied, A., Cui, Y.J., Tang, A.M., Nebieridze, S., Terpereau, J.M., Leroux, P., Effet de l'état hydrique sur la raideur mécanique des sols. In: Symposium International Géorail 2014, Paris, France (2014)
4. Byun, Y. H., Qamhia, I. I. A., Feng, B., Tutumluer, E., Embedded shear wave transducer for estimating stress and modulus of As-constructed unbound aggregate base layer. *Constr. Build. Mater.* 183, 465–471 (2018)
5. Donohue, S., Gunn, D. A., Bergamo, P., Hughes, E., Dashwood, B., Uhlemann, S., Chambers, J. E., Ward, D., Assessing climate effects on railway earthworks using MASW. In: Near Surface Geoscience 2014-20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (2014)

6. Bergamo, P., Dashwood, B., Uhlemann, S., Swift, R., Chambers, J., Gunn, D., Donohue, S., Time-lapse monitoring of climate effects on earthworks using surface waves. *Geophysics* 81(2), EN1–EN15 (2016)
7. Bodet, L., A. Dhemaied, S. Pasquet, Q. Vitale, F. Rejiba, R. Guérin, Caractérisation mécanique de la plateforme ferroviaire par méthodes géophysiques : estimation des vitesses de cisaillement par ondes de surface. Rapport d'activités de recherche, SNCF Infra - CNRS – UPMC (2014)
8. Bodet, L., Pasquet, S., Dhemaied, A., Boisson-Gaboriau, J., Cui, Y.J., Leroux, P., Nebieridze, S., Tang, A.M., Terpereau, J.M., Vitale, Q., Seismic surface-wave analysis for railway platform auscultation. In: *Near Surface Geoscience 2015 – 21th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. EAGE, Turin, Italy (2015)
9. Burzawa, A., Bodet, L., Dangeard, M., Barrett, B., Byrne, D., Whitehead, R., Chaptal, C., Cunha Teixeira, J., Cárdenas, J., Sanchez Gonzalez, R., Eriksen, A., Dhemaied, A.. Efficient mechanical evaluation of railway earthworks using a towed seismic array and Bayesian inference of MASW data. arXiv preprint <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.16491> (2025)
10. Pasquet, S., Bodet, L., SWIP: An integrated workflow for surface-wave dispersion inversion and profiling. *Geophysics*, 82(6), WB47–WB61 (2017)
11. Tarnus, R., Bardainne, T., Michel, L., Deladerriere, N., Cai, C., Hallier, A., Boisson-Gaboriau, J., A Case Study for Underground Imaging Using Trains as Seismic Signal to Investigate Subsidence Phenomena. In: 2022. *European Association of Geoscientists & Engineers*, 1–5 (2022)
12. Cunha Teixeira, J., Bodet, L., Dangeard, M., Gesret, A., Hallier, A., Rivière, A., Burzawa, A., Chapellín, J.J.C., Fonda, M., Gonzalez, R.S., Dhemaied, A., Non-destructive testing of railway embankments by measuring multi-modal dispersion of surface waves induced by high-speed trains with linear geophone arrays. *Seismica*, 4(1), <https://doi.org/10.26443/seismica.v4i1.1150> (2025)
13. Cárdenas J., Burzawa A., Radic N., Bodet L., Vidal R., Diop K., Dangeard M., Dhemaied A., Deep learning contribution to the automatic picking of surface-wave dispersion for the characterization of railway earthworks. *Computer and Geoscience*, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2025.105883> (2025)
14. Burzawa, A., Bodet, L., Dhemaied, A., Dangeard, M., Pasquet, S., Vitale, Q., ... & Cui, Y. J., Detecting mechanical property anomalies along railway earthworks by Bayesian appraisal of MASW data. *Constr. Build. Mater.*, 404, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133224> (2023)
15. Dangeard M., Rivière A., Bodet L., Schneider S., Guérin R., Jougnot D., Mainault A., River corridor model constrained by time-lapse seismic acquisition. *Water Resources Research*, 57 (10), <https://doi.org/10.1029/2020WR028911> (2021)
16. Solazzi, S. G., Bodet, L., Holliger, K., Jougnot, D., Surface-wave dispersion in partially saturated soils: The role of capillary forces. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(12), e2021JB022074. <https://doi.org/10.1029/2021JB022074> (2021)
17. Cunha Teixeira, J., Bodet, L., Rivière, A., Hallier, A., Gesret, A., Dangeard, M., Dhemaied, A., Boisson Gaboriau, J., Physics-guided deep learning model for daily groundwater table maps estimation using passive surface-wave dispersion. *Water Resources Research*, 61, e2024WR037706. <https://doi.org/10.1029/2024WR037706> (2025)
18. Cunha Teixeira, J., Bodet, L., Rivière, A., Solazzi, S.G., Hallier, A., Gesret, A., El Janyani, S., Dangeard, M., Dhemaied, A., Boisson Gaboriau, J., Neural machine

translation of seismic ambient noise for soil nature and water saturation
characterization. *Geophysical Research Letters*, 52(13)
<https://doi.org/10.1029/2025GL114852> (2025)

19. Cunha Teixeira, J., Burzawa, A., Bodet, L., Hallier, A., Decker, B., Lin, F., Dangeard, M., Boisson Gaboriau, J., Dhemaied, A., Passive and Active Computation of MASW (PAC). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17639980> (2025)