



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTY OF SCIENCE
Department of Earth Sciences



Master in Earth Sciences

by

HENRY Michaël Gérard

Seismic velocity changes within the Swiss Jura using ambient noise interferometry

Under the supervision of:

Prof. LUPI Matteo

Dr. SAVARD Geneviève

University of Geneva

June 11, 2024

STATEMENT

I certify that all statements in this text, that are not the result of my personal reflection, are attributed to the appropriate literature and that any passage copied from another source is placed in quotes.

DISCLAIMER

The information contained in this report is part of an academic exercise and represents the work of the author and neither the ELSTE nor the University of Geneva. The author and the ELSTE disclaim any liability in connection with the use of this information.

COPYRIGHT

Quotations from this memoire are permitted only if they serve as a comment, reference or demonstration to the user. The quote must imperatively mention the source and the author's name. The Swiss federal law on copyright and Neighbouring Rights (LDA) are applicable.

Abstract

In recent decades, major advancements have been achieved in near-surface studies through a non-invasive geophysical method derived from ambient seismic noise. The discovery that Green's functions between two sensors can be reconstructed from the cross-correlation of ambient seismic records has yielded outstanding results in imaging the Earth's interior. This progress has expanded to seismic interferometry, where changes in Green's functions can be linked to velocity changes in the medium, particularly in the coda of Green's function due to the scattering of the ambient noise wavefield. The coda's heightened sensitivity to minor changes in the medium compared to direct waves makes it particularly relevant for noise-based time-lapse monitoring.

This study employs ambient noise interferometry to investigate seismic velocity fluctuations in the Swiss Jura, specifically in the vicinity of the Haute-Sorne enhanced geothermal system. This study estimates the medium's impulse response by cross-correlating seismic signals from four broadband stations. The seismic velocity changes are then computed using two noise interferometry techniques, the stretching method and Moving-Window Cross-Spectral Analysis.

The results indicate that seismic velocity changes at the targeted frequencies do not show any discernible seasonal patterns associated with precipitation or temperature fluctuations. Instead, the velocity changes are more stable than anticipated, contrasting with prior studies that consistently reported seismic velocity changes correlated with various seasonal driving factors.

The study confirms that variations in ambient noise characteristics can significantly affect waveform stability and correlation coefficients, emphasising the importance of understanding noise source distribution in seismic monitoring. The results are influenced by the different processing steps and parameters chosen in the interferometry. Therefore, a comprehensive evaluation of these parameters is essential to ensure accurate and reliable conclusions. Hence, this study could be the starting point of an exhaustive baseline of natural seismic velocity variations, essential for accurately detecting human-induced seismic velocity changes in the future enhanced geothermal system.

The significance of investigating subsurface seismic characteristics is well-established in geophysical research and seismic hazard assessment. In combination with the seismic interferometry study, we also performed a Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) study to analyse microtremor data from a passive seismic campaign in the Haute-Sorne region.

Using seismic recordings from a dense nodal array, the HVSr results reveal significant variations in S-wave structures at different depths, mapping the distinct geological features and hydrological setting of Delémont's basin. The resonance frequencies obtained indicate

potential local soil amplification. Moreover, the HVSR-derived inversion provides depth estimates of the Tertiary sedimentary cover.

Our findings align with previous studies, highlighting the effectiveness of the HVSR method in near-surface geophysical exploration enhancing the understanding of subsurface geology in the basin and providing the basis of a high-resolution seismic microzonation. Future research should focus on improving the data quality and the accuracy of the retrieved HVSR, along with integrating HVSR with other geophysical methods to achieve a more comprehensive analysis and validate results with actual earthquake data to refine the seismic hazard assessment.

Keywords: Seismic interferometry, seismic traveltime changes, moving window cross-spectral analysis, waveform stretching, noise-based monitoring, horizontal-to-vertical spectral ratio, HVSR, H/V

Résumé

Au cours des dernières décennies, des avancées majeures ont été réalisées dans la géophysique de surface grâce à une méthode géophysique non invasive dérivée du bruit sismique ambiant. La découverte que les fonctions de Green entre deux capteurs peuvent être reconstruites à partir de la corrélation croisée des enregistrements sismiques ambiants a donné des résultats remarquables pour l'imagerie de l'intérieur de la Terre. Ce progrès s'est étendu à l'interférométrie sismique, où les changements dans les fonctions de Green peuvent être liés à des changements de vitesse du milieu, en particulier dans la coda de la fonction de Green en raison de la diffusion du champ d'ondes de bruit ambiant. Cette sensibilité accrue de la coda aux changements mineurs du milieu par rapport aux ondes directes la rend particulièrement pertinent pour le monitoring temporelle basée sur le bruit.

Cette étude utilise l'interférométrie sismique à partir du bruit ambiant pour quantifier les fluctuations de vitesse sismique dans le Jura suisse, spécifiquement à proximité du site de géothermie profonde de Haute-Sorne. Cette étude estime la réponse impulsionnelle du milieu en corrélant les signaux sismiques de quatre stations à large bande. Les changements de vitesse sismique sont ensuite calculés en utilisant deux techniques d'interférométrie de bruit : la méthode dites "d'étirement" et celle dite "d'analyse spectrale croisée par fenêtre mobile".

Les résultats indiquent que les variations de vitesse sismique aux fréquences ciblées ne montrent aucune saisonnalité discernable associé aux précipitations ou aux fluctuations de température. Au contraire, les variations de vitesse sont plus stables que prévu, alors que la plupart des études sur le sujet ont constamment démontré des variations de vitesse sismique corrélées avec divers facteurs saisonniers.

L'étude confirme que les variations des caractéristiques du bruit ambiant peuvent affecter de manière significative la stabilité des formes d'onde et les coefficients de corrélation, soulignant l'importance de comprendre la distribution des sources de bruit dans le monitoring à partir de bruit sismique. Les résultats sont influencés par les différentes étapes de traitement et les paramètres choisis dans l'interférométrie. Par conséquent, une évaluation complète de ces paramètres est essentielle pour garantir des conclusions précises et fiables. Ainsi, cette étude pourrait constituer le point de départ d'une référence exhaustive des variations naturelles de vitesse sismique, essentielle pour détecter avec précision les variations induits par l'homme dans le futur site géothermique.

L'importance d'enquêter sur les caractéristiques sismiques souterraines est bien établie dans l'exploration et l'évaluation des risques sismiques. En combinaison avec l'étude interférométrie, nous avons également réalisé une étude du rapport spectral horizontal/vertical (HVSR) pour analyser les données de microtreblements d'une campagne sismique passive dans la région de Haute-Sorne. La technique HVSR fournit des informations précieuses sur les variations des ondes S en subsurface, les fréquences de résonance et la profondeur du principale contraste d'impédance.

En utilisant un ensemble de données de 700 enregistrements sismiques provenant d'un réseau nodal dense, les résultats révèlent des variations significatives des structures d'ondes S à différentes profondeurs, cartographiant les caractéristiques géologiques distinctes et le contexte hydrologique du

bassin de Delémont. Les fréquences de résonance obtenues indiquent des amplifications locales potentielles du sous-sols cruciales pour l'évaluation des risques sismiques. De plus, l'inversion des données obtenues par la HVSR fournit des estimations de la profondeur de la couverture sédimentaire tertiaire.

Nos résultats s'alignent avec les études précédentes, mettant en évidence l'efficacité de la méthode HVSR dans l'exploration géophysique de surface et améliorant la compréhension de la géologie souterraine du bassin, offrant un outil peu coûteux pour l'évaluation des risques sismiques. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'amélioration de la qualité des données et la précision des HVSR obtenus, ainsi que sur l'intégration d'étude HVSR avec d'autres méthodes géophysiques pour réaliser une analyse plus complète et valider les résultats avec des données réelles de tremblements de terre.

Mots-clés: Interférométrie sismique, changements de temps de parcours sismique, analyse spectrale croisée par fenêtre mobile, étirement d'onde, monitoring basé sur le bruit ambiant, rapport spectral horizontal/vertical