

Suivi temporel haute-résolution des variations hydrologiques par corrélation du bruit ambiant enregistré par un réseau sismologique dense

Thomas Gaubert-Bastide^{1,2}, Stéphane Garambois¹, Clarisse Bordes², Philippe Roux¹, Christophe Voisin¹

¹ ISTerre, Université Grenoble Alpes, France

² LFCR, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

RESUME

Face aux enjeux sociétaux liés à l'accès et la gestion des ressources en eau, le développement d'outils pour le monitoring des fluides dans la croûte terrestre reste un défi de la géophysique moderne. Nous proposons dans cette étude un suivi sismo-hydrologique à haute résolution par suivi de bruit de fond sismique. L'étude utilise un jeu de données de bruit de fond enregistré par un réseau de 100 capteurs sismiques déployés autour d'un bassin d'infiltration du champ captant de Crémieux-Charmy (Rhône, projet RESOLVE). Cette méthode non intrusive permet un suivi des variations des masses de fluides avec une résolution spatiale et temporelle exceptionnelle.

Mots clés : Hydrogéophysique, Inter-corrélation de bruit de fond sismique, Beamforming, Inversion

TEMPORAL MONITORING OF HYDROLOGICAL VARIATIONS BY SEISMIC NOISE MONITORING

ABSTRACT

Facing the societal issues related to water resources management, the development of geophysical tools for monitoring fluids in the earth's crust remains a challenge of modern geophysics. In this study, we propose high-resolution seismo-hydrological monitoring by seismic ground noise monitoring. The study uses a dataset recorded by a network of 100 seismic sensors settled close to an infiltration basin of the Crémieux-Charmy well-field (Rhône, RESOLVE project). This non-intrusive method enables the monitoring of water content with excellent spatial and temporal resolution.

Key words: Hydrogeophysics, Seismic ground noise crosscorrelation, Beamforming, Inversion

INTRODUCTION

La caractérisation et le suivi temporel des réservoirs géologiques sont cruciaux pour la compréhension d'un grand nombre de processus géologiques, que ce soit pour la gestion des ressources naturelles que pour les risques naturels. Au-delà des forages, les méthodes géophysiques offrent un large éventail de moyens de reconnaissance, qui diffèrent par leur sensibilité aux paramètres physico-chimiques du sous-sol, leur résolution et profondeur de pénétration et leur capacité opérationnelle en termes de suivi temporel. En terme de gestion de ressources en eau, les champs captant localisés à proximité des centres urbains sont sous la menace quasi-constante de pollution, en général d'origine anthropique. Un moyen de les protéger consiste en la mise en place d'une barrière hydraulique. Celle-ci va modifier les écoulements dans la nappe et par exemple, faire en sorte que le fleuve contaminé draine la nappe au lieu que la nappe ne draine celui-ci. Le suivi et la compréhension de la circulation des fluides passent par un suivi temporel et spatial de haute définition.

Le monitoring par inter-corrélation de bruit sismique a connu depuis une quinzaine d'années un essor considérable pour l'étude de différents processus géologiques se produisant à des échelles

très différentes. Ce suivi est réalisé à l'aide de l'enregistrement continu du bruit sismique ambiant entre 2 stations sismologiques, permettant une reconstruction continue de la fonction de transfert entre celles-ci par inter-corrélation. On pourra citer Sens-Schönfelder et Wegler (2006) qui ont utilisé cette méthode afin de détecter des variations de vitesse des ondes sismiques très fines au sein d'un volcan, associées à des circulations de fluides très profondes. Cette méthode, également appelée « interférométrie sismique » a permis de mesurer la diminution de la contrainte crustale après un événement sismique important [Wegler et al., 2009], et de mettre en relation la charge hydrologique et les variations de vitesse sismique [Ugalde et al., 2014]. Enfin le monitoring des vitesses corrélées avec des variations de pression de pores dans un glissement de terrain [Voisin et al., 2016] et plus récemment avec un réservoir hydrologique à grande échelle [Clements and Denolle, 2018] ont démontré le très fort potentiel de cette méthode pour des applications hydrogéologiques. L'étude présentée ici a été réalisée sur le champ captant de Crémieux-Charmy (Rhône, projet RESOLVE) où le bruit de sismique de cette zone très urbanisée a été enregistré sur 19 jours (456 h) par un réseau de 100 capteurs 3 composantes, Figure (1) en bénéficiant de cycles contrôlés de remplissage/drainage du bassin.

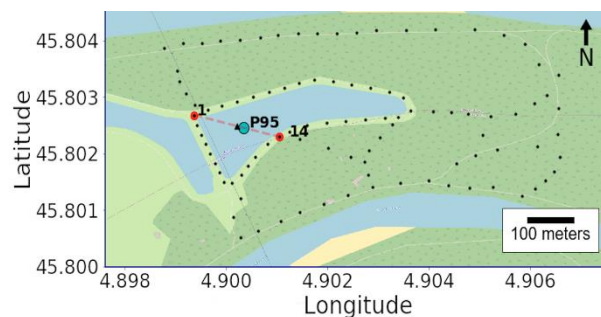


Figure 1 Schéma du réseau de capteurs 3C déployé dans le cadre du projet RESOLVE sur le champ captant de Crémieux-Charmy (Rhône). Le point P95 fait référence à un piézomètre de contrôle.

ANALYSE AUTOUR DU LAC 5-2

Homogénéité des sources

Le réseau dense a permis une première analyse consistant à étudier les variations azimutales des ondes issues du bruit ambiant, leurs lenteurs apparentes [Rost and Thomas, 2002] ainsi que leur stabilité. La Figure 2 met en évidence la disparité des sources impactant notre réseau. La composante N-S répond à une origine E-W avec une vitesse associée de 500 m/s (a), la composante E-O à une origine NE avec une vitesse de 500 m/s (b) et la composante verticale est beaucoup plus homogène avec des vitesses dans le même ordre de grandeur que les deux autres composantes (c).

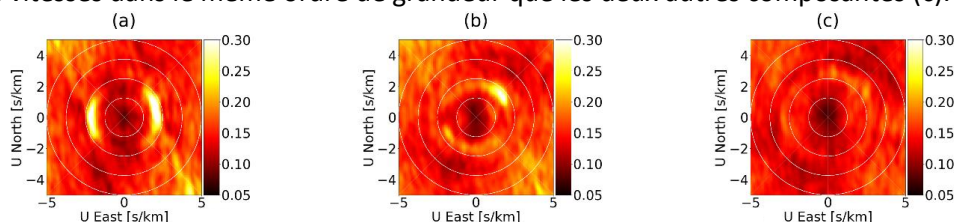


Figure 2 Beamforming entre 2.5 et 5 Hz sur les données entre 12h00 et 13h00 le 20/09/2018. De gauche à droite : Composante Nord (a), Est (b) et Verticale (c).

Traitement des données

Plusieurs étapes classiques sont réalisées pour chaque paire de stations : i) les spectres des enregistrements ont été blanchis en normalisant l'amplitude du spectre : cette opération permet d'éliminer des événements très ponctuels et d'égaliser l'énergie du bruit sur la bande de fréquence [Karpfinger et al., 2009, Shapiro et al., 2005] ; ii) les inter-corrélations sont ensuite calculées par bloc d'une heure après projection des composantes N-S et E-O vers des composantes transverse et

radiale [Stehly et al., 2009]. Le champ d'onde reconstitué (dominé par les ondes de surface) permet alors de déterminer la fenêtre temporelle dans laquelle nous pouvons appliquer le calcul des variations fines, ici par méthode de stretching (Voisin et al. [2016], Mordret et al. [2010]). Cette méthode consiste à observer les variations des formes d'onde dans un corrélogramme par rapport à une référence, elle-même calculée par la moyenne du corrélogramme sur la durée de l'expérience.

RESULTATS

Les variations de vitesse enregistrées entre deux capteurs montrent une corrélation évidente avec les niveaux piézométriques conformément aux observations de Schönfelder and Wegler [2006], Voisin et al. [2016], et Garambois et al. [2019]. La multitude de paires offertes par ce jeu de données permet d'envisager ici une spatialisation par tomographie à l'échelle du déploiement. Nous avons inversé les variations de vitesse mesurées entre chaque paire avec la méthode de Barmin et al. (2001), en considérant des rais droits. La fonction de régularisation y est constituée d'un lissage gaussien et d'une contrainte sur l'amplitude de la perturbation en fonction de la densité de rais (Mordret et al. 2010). Chaque heure du monitoring est inversée de façon indépendante afin de pouvoir reconstruire une dynamique spatiale comme illustrée par la Figure (3). Il est très clair qu'à partir du moment de remplissage du bassin d'infiltration, les vitesses sont fortement impactées sous l'effet de l'infiltration de l'eau, mais aussi du drainage progressif. Les cartes de vitesse produites montrent la géométrie du dôme avec une remarquable résolution spatiale comme temporelle, en totale cohérence avec les variations piézométriques observées sur le point P95 (Figure 1).

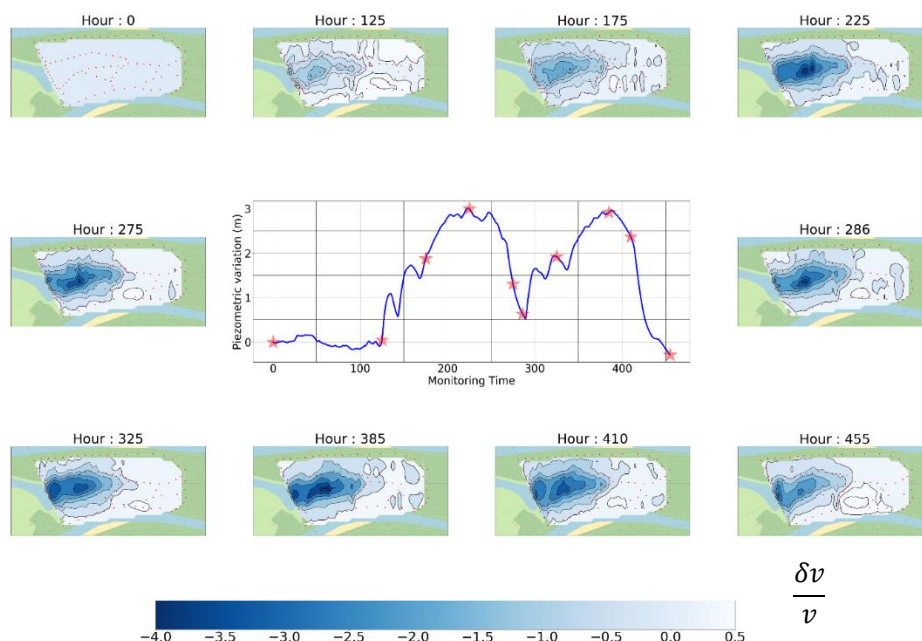


Figure 3 Evolution des modèles de variation de vitesse et du niveau piézométrique au cours du suivi. Les variations piézométriques du capteur P95 sont représentées en partie centrale. Les étoiles correspondent aux heures sélectionnées pour le suivi de l'évolution du modèle.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'enregistrement continu du bruit sismique par un réseau dense de capteurs déployés autour d'un lac a permis de reconstruire de manière dynamique les champs d'ondes par inter-corrélation de bruit ambiant entre 2 stations. L'analyse fine des variations des ondes de surface dominant le champ d'onde a permis de reconstruire les variations temporelles de la vitesse de ces ondes, qui sont parfaitement anti-corrélées avec les variations de la nappe, comme le prédit la théorie poro-élastique (Garambois

et al., 2019). En bénéficiant de la couverture apportée par le réseau dense en terme de rais, il a été possible de spatialiser ces variations par tomographie et ainsi de cartographier les dômes liés aux 2 cycles de remplissage du lac avec un maximum très fort au centre et une pente plus douce entre les deux bras du Rhône. La vision en profondeur des variations reposant sur le noyau de sensibilité des ondes de surface en fonction d'un modèle de vitesse, une étude d'imagerie sera menée afin d'établir celui-ci en 3D. Ces études seront poursuivies sur des données similaires acquises dans des dynamiques de pompage beaucoup plus rapide et grâce à des expériences de laboratoire portant sur l'influence de la saturation et l'impact de sources distribuées de façon homogène ou non avec des bruits blanc et coloré.

Remerciements

Les auteurs remercient la plateforme recherche du champ-captant de Crépieux-Charmy, le projet Interfaces, P. Boué (Isterre) pour ses conseils concernant le Beamforming, A. Mordret, (Isterre) pour l'inversion ainsi que l'équipe Pyrene (UPPA) pour les moyens de calcul mis à disposition.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Clements T. and M.A Denolle.** Tracking groundwater levels using the ambient seismic field. *Geophysical Research Letters*, 45(13) :6459–6465, 2018.
- Garambois S., C Voisin, MA Romero Guzman, D Brito, Bertrand Guillier, and A Réfloch.** Analysis of ballistic waves in seismic noise monitoring of water table variations in a water field site : added value from numerical modelling to data understanding. *Geophysical Journal International*, 219(3) : 1636–1647, 2019.
- Karppinger F., Tobias M Müller, and Boris Gurevich.** Green's functions and radiation patterns in poroelastic solids revisited. *Geophysical Journal International*, 178(1) :327–337, 2009.
- Mordret A., AD Jolly, Z Duputel, and N Fournier.** Monitoring of phreatic eruptions using interferometry on retrieved cross-correlation function from ambient seismic noise : Results from mt. ruapehu, new zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191(1-2) :46–59, 2010.
- Rost S. and C. Thomas.** Array seismology : Methods and applications. *Reviews of geophysics*, 40(3) :2–1, 2002.
- Sens-Schönfelder S. and U. Wegler.** Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at merapi volcano, indonesia. *Geophysical research letters*, 33(21), 2006.
- Shapiro N., M. Campillo, L. Stehly, and M. H Ritzwoller.** High-resolution surface- wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715) :1615–1618, 2005.
- Stehly L., B Fry, M. Campillo, NM Shapiro, J Guilbert, L Boschi, and D Giardini.** Tomography of the alpine region from observations of seismic ambient noise. *Geophysical Journal International*, 178(1) :338–350, 2009.
- Ugalde A., Beatriz Gaité, and Antonio Villaseñor.** Temporal variations of seismic velocity at paradox valley, colorado, using passive image interferometry. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3) :1088–1099, 2014.
- Voisin C., S. Garambois, C. Massey, and R. Brossier.** Seismic noise monitoring of the water table in a deep-seated, slow-moving landslide. *Interpretation*, 4(3) :SJ67–SJ76, 2016.
- U Wegler, Hisashi Nakahara, C. Sens-Schönfelder, M Korn, and K Shiomi.** Sudden drop of seismic velocity after the 2004 mw 6.6 mid-niigata earthquake, japan, observed with passive image interferometry. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 114(B6), 2009.