

Mesure du charriage à l'échelle d'un bassin versant de montagne à l'aide d'un réseau de capteurs sismiques

Bedload transport monitoring in an Alpine watershed with a network of seismic sensors

Gilles ANTONIAZZA* (Université de Lausanne, Suisse), Michael **DIETZE** (Université de Göttingen, Allemagne), **Davide MANCINI** (Université de Lausanne, Suisse), **Jens M. TUROWSKI** (GFZ Potsdam, Allemagne), Dieter **RICKENMANN** (WSL Birmensdorf, Suisse), Tobias **NICOLLIER** (WSL Birmensdorf, Suisse), **Stefan BOSS** (WSL Birmensdorf, Suisse) et Stuart N. **LANE** (Université de Lausanne, Suisse).

*auteur correspondant

Résumé

L'amélioration des équations de prédiction du charriage dans les cours d'eau de montagne nécessite une prise en compte des changements dans le temps de la fourniture sédimentaire grossière, en particulier pour les systèmes où cette dernière est temporairement ou variablement limitée (Piton and Recking, 2017; Gomez and Soar, 2022). La quantification de la fourniture sédimentaire grossière requiert un monitoring de la dynamique spatiale du charriage, dans l'idéal à l'échelle du bassin versant. A ce jour, peu de systèmes de mesure permettent d'acquérir de manière abordable (en termes de temps et de coûts) des séries temporelles de charriage continues en de multiples points d'un bassin versant donné (Vericat et al., 2017; Rickenmann, 2017; Vázquez-Tarrio et al., 2019). Cela limite d'une part notre capacité à prédire correctement le charriage dans ces environnements, mais également notre compréhension de la manière avec laquelle les matériaux grossiers sont mobilisés, transportés et stockés dans les bassins versants de montagne (Recking, 2012; Dell'Agnese et al., 2015; Rainato et al., 2017; Comiti et al., 2019; Rickenmann, 2020).

Depuis une décennie environ, la sismique environnementale (Cook and Dietze, 2022) offre dans ce contexte une alternative à haut potentiel. En effet, il a été démontré (Burtin et al., 2008; Tsai et al., 2012) que l'énergie sismique émise par les particules grossières en transport dans les cours d'eau peut être mesurée à l'aide de capteurs sismiques, le charriage se manifestant dans une bande de fréquences différente, bien que se chevauchant en partie, d'autres sources d'énergie sismique comme les turbulences (Tsai et al., 2012; Gimbert et al., 2014). Via l'application de modèles d'inversion physique appropriés (Tsai et al., 2012; Gimbert et al., 2014), il devient donc possible d'obtenir des séries temporelles de charriage par la mesure en continu de l'énergie sismique émise par un cours d'eau, en valeurs absolues si les paramètres du modèle d'inversion – lié à la morphologie de la rivière, à sa granulométrie et à la propagation des ondes sismique dans le substrat notamment – peuvent être contraints correctement (Bakker et al., 2020; Lagarde et al., 2021). Les capteurs sismiques requis étant relativement bon marché, facilement installables et ne requérant que peu de maintenance, il devient envisageable d'en déployer plusieurs simultanément afin de monitorer les dynamiques spatiales du charriage (Cook et al., 2018; Coviello et al., 2019; Chmiel et al., 2022; Piantini et al., 2022), possiblement à l'échelle du bassin versant.

Dans cette contribution, nous avons déployé un réseau de 24 capteurs sismiques dans le Vallon de Nant – un bassin versant de montagne de 13.4 km² à régime hydrologique nivo-pluvial situé sur la façade nord-ouest des Alpes suisses – afin de quantifier la dynamique spatiale du charriage pendant un événement de transport relativement important (temps de retour 1-2 ans). Dans un premier temps, nous avons évalué la performance du modèle d'inversion en comparant une série temporelle de charriage mesurée par sismique avec une série temporelle indépendante obtenue à l'aide d'un réseau de capteurs acoustiques calibrés (un système 'Swiss Plate Geophone - SPG'; Rickenmann et al., 2012, 2014; Antoniazza et al., 2022), localisés à proximité directe. Les résultats obtenus (Figure 1) sont encourageant dans la mesure où la dynamique de l'événement de charriage dérivée du modèle sismique est comparable – en termes de temporalité et de magnitude – à la série temporelle mesurée par les capteurs acoustiques indépendants. En moyenne, l'inversion sismique surestime le charriage mesuré par les capteurs acoustiques par un facteur 4, performance comparable ou meilleure que celles reportées jusqu'ici dans la littérature

(Bakker et al., 2020; Lagarde et al., 2021). L'erreur résiduelle peut être attribuée à des hypothèses erronées dans le modèle d'inversion sismique, ou une estimation imprécise des paramètres nécessaires à l'inversion, mais peut également en partie être due à des erreurs dans la mesure acoustique du charriage.

Dans un deuxième temps, une fois la performance du modèle d'inversion sismique évaluée, la même procédure d'inversion a été appliquée aux 23 autres capteurs sismiques distribués dans le Vallon de Nant, en mesurant localement les paramètres requis par le modèle d'inversion. Les 24 séries temporelles de charriage obtenues révèlent l'inefficacité relative de cet événement de charriage à évacuer les importantes masses de matériaux grossiers mobilisées dans le haut du bassin versant. En effet, seuls 2.5 % de ces masses sont – en comparaison – exportées à l'exutoire. L'atténuation du signal du charriage est notamment visible dans la transition entre des chenaux hydrauliquement efficaces (pente raide, grand rayon hydraulique, chenaux uniques) et des chenaux hydrauliquement moins efficaces (pente plus faible, rayon hydraulique faible, chenaux multiples) au niveau des cônes alluviaux et des sections d'écoulement en tresses. A plus long terme, les résultats de cette étude suggèrent que des périodes multiples de débit critique sont nécessaires à l'évacuation des matériaux grossiers mobilisés pendant des événements de charriage individuels.

Les résultats de cette étude soulignent le potentiel de la sismique environnementale pour obtenir des séries temporelles de charriage à l'échelle d'un bassin versant de montagne. Ces jeux de données ouvrent la voie à une meilleure compréhension de la dynamique spatiale du transport grossier et à l'évaluation de la variabilité temporelle dans la fourniture sédimentaire : une condition requise pour l'amélioration des équations de prédiction du charriage. La recherche future devra néanmoins s'employer à tester systématiquement, dans différentes conditions hydrauliques, la validité des hypothèses sur lesquelles le modèle d'inversion sismique est basé, et devra fournir des procédures optimisées pour l'estimation sur le terrain des paramètres requis par le modèle.

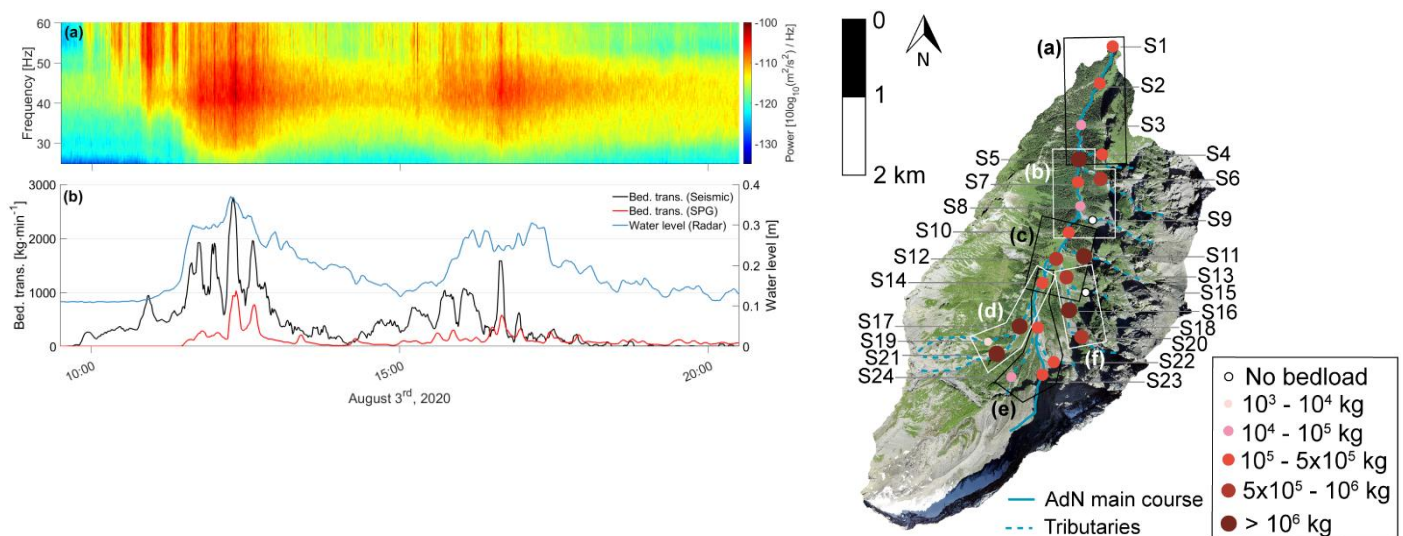


Figure 1 : A gauche, en (a), spectrogramme de l'énergie sismique mesurée par un capteur sismique durant l'événement de charriage étudié du 3 août 2020. En (b), la hauteur d'eau de la rivière mesurée par radar (en bleu), la série temporelle de charriage mesurée avec le système acoustique SPG (en rouge), et la série temporelle de charriage dérivée du modèle d'inversion sismique (en noir), pour le même événement de charriage. A droite, variation spatiale de la masse de matériaux grossiers mobilisés durant l'événement de charriage du 3 août 2020 aux 24 positions où un capteur sismique (numéroté S_i) était installé. Les figures sont reproduites de Antoniazza et al. (en revue, JGR-Earth Surface).

REFERENCES

- [1] Antoniazza, G., Dietze, M., Mancini, D., Turowski, J. M., Rickenmann, D., Nicollier, T., Boss, S. & Lane, S. N. (under review). Anatomy of an Alpine bedload transport event: a watershed-scale seismic-network perspective. *Authorea Preprints*. Submitted to JGR – Earth Surface.
- [2] Antoniazza, G., Nicollier, T., Boss, S., Mettra, F., Badoux, A., Schaepli, B., Rickenmann, D., Lane, S.N., 2022. Hydrological Drivers of Bedload Transport in an Alpine Watershed. *Water Resources Research* 58, e2021WR030663. <https://doi.org/10.1029/2021WR030663>
- [3] Bakker, M., Gimbert, F., Geay, T., Misset, C., Zanker, S., Recking, A., 2020. Field Application and Validation of a Seismic Bedload Transport Model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 125, e2019JF005416. <https://doi.org/10.1029/2019JF005416>
- [4] Burtin, A., Bollinger, L., Vergne, J., Cattin, R., Nábělek, J.L., 2008. Spectral analysis of seismic noise induced by rivers: A new tool to monitor spatiotemporal changes in stream hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JB005034>
- [5] Chmiel, M., Godano, M., Piantini, M., Brigode, P., Gimbert, F., Bakker, M., Courboux, F., Ampuero, J.-P., Rivet, D., Sladen, A., Ambrois, D., Chapuis, M., 2022. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22, 1541–1558. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1541-2022>
- [6] Comiti, F., Mao, L., Penna, D., Dell'Agnese, A., Engel, M., Rathburn, S., Cavalli, M., 2019. Glacier melt runoff controls bedload transport in Alpine catchments. *Earth and Planetary Science Letters* 520, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.05.031>
- [7] Cook, K.L., Andermann, C., Gimbert, F., Adhikari, B.R., Hovius, N., 2018. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. *Science* 362, 53–57. <https://doi.org/10.1126/science.aat4981>
- [8] Cook, K.L., Dietze, M., 2022. Seismic Advances in Process Geomorphology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 50, 183–204. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-085133>
- [9] Coviello, V., Arattano, M., Comiti, F., Macconi, P., Marchi, L., 2019. Seismic Characterization of Debris Flows: Insights into Energy Radiation and Implications for Warning. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 124, 1440–1463. <https://doi.org/10.1029/2018JF004683>
- [10] Dell'Agnese, A., Brardinoni, F., Toro, M., Mao, L., Engel, M., Comiti, F., 2015. Bedload transport in a formerly glaciated mountain catchment constrained by particle tracking. *Earth Surface Dynamics* 3, 527–542. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-527-2015>
- [11] Gimbert, F., Tsai, V.C., Lamb, M.P., 2014. A physical model for seismic noise generation by turbulent flow in rivers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 119, 2209–2238. <https://doi.org/10.1002/2014JF003201>
- [12] Gomez, B., Soar, P.J., 2022. Bedload transport: beyond intractability. *Royal Society Open Science* 9, 211932. <https://doi.org/10.1098/rsos.211932>
- [13] Lagarde, S., Dietze, M., Gimbert, F., Laronne, J.B., Turowski, J.M., Halfi, E., 2021. Grain-Size Distribution and Propagation Effects on Seismic Signals Generated by Bedload Transport. *Water Resources Research* 57, e2020WR028700. <https://doi.org/10.1029/2020WR028700>
- [14] Piantini, M., Gimbert, F., Bakker, M., Recking, A., Nanni, U., 2022. Using a dense seismic array to study fluvial processes in a braided river reach under flood conditions. *LHB* 0, 2053314. <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2053314>
- [15] Piton, G., Recking, A., 2017. The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation in mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 42, 1505–1519. <https://doi.org/10.1002/esp.4105>
- [16] Rainato, R., Mao, L., García-Rama, A., Picco, L., Cesca, M., Vianello, A., Preciso, E., Scussel, G.R., Lenzi, M.A., 2017. Three decades of monitoring in the Rio Cordon instrumented basin: Sediment budget and temporal trend of sediment yield. *Geomorphology, SEDIMENT DYNAMICS IN ALPINE BASINS* 291, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.012>
- [17] Recking, A., 2012. Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport. *Geomorphology* 175–176, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.005>
- [18] Rickenmann, D., 2020. Effect of Sediment Supply on Cyclic Fluctuations of the Disequilibrium Ratio and Threshold Transport Discharge, Inferred From Bedload Transport Measurements Over 27 Years at the Swiss Erlenbach Stream. *Water Resources Research* 56, e2020WR027741. <https://doi.org/10.1029/2020WR027741>
- [19] Rickenmann, D., 2017. Bedload transport measurements with geophones, hydrophones and underwater microphones (passive acoustic methods). *Gravel Bed Rivers and Disasters*, Wiley & Sons, Chichester, UK 185–208.

- [20] Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Klaiber, A., Ludwig, A., 2012. Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth Surface Processes and Landforms* 37, 1000–1011.
- [21] Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Wyss, C., Laronne, J., Barzilai, R., Reid, I., Kreisler, A., Aigner, J., Seitz, H., Habersack, H., 2014. Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 928–942. <https://doi.org/10.1002/esp.3499>
- [22] Tsai, V.C., Minchew, B., Lamb, M.P., Ampuero, J.-P., 2012. A physical model for seismic noise generation from sediment transport in rivers. *Geophysical Research Letters* 39. <https://doi.org/10.1029/2011GL050255>
- [23] Vázquez-Tarrió, D., Recking, A., Liébault, F., Tal, M., Menéndez-Duarte, R., 2019. Particle transport in gravel-bed rivers: Revisiting passive tracer data. *Earth Surface Processes and Landforms* 44, 112–128. <https://doi.org/10.1002/esp.4484>
- [24] Vericat, D., Wheaton, J.M., Brasington, J., 2017. Revisiting the Morphological Approach, in: *Gravel-Bed Rivers*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 121–158. <https://doi.org/10.1002/9781118971437.ch5>