

# Suivi par sismique passive d'un système karstique : approche et perspectives méthodologiques

## Passive seismic monitoring of a karst system : methodological approach and prospects

Axelle PANTIGA<sup>\*1</sup>, Vincent ALLEGRE<sup>2</sup>, Thierry GAILLARD<sup>1</sup>, Alain DENIS<sup>2</sup>, Roland LASTENNET<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CPGF-Horizon, 49 Avenue Franklin Roosevelt, 77210, Avon, France

<sup>2</sup>I2M – UMR 52995, 351 Cours de la Libération, 33400, Talence, France

**Résumé.** Alors que l'hétérogénéité et la complexité des systèmes karstiques rendent leur fonctionnement hydrogéologique difficile à appréhender, la sismique passive offre une alternative non invasive pour détecter les variations d'écoulement et de stockage. Cette étude explore le potentiel de cette méthode sur la source karstique de Glane (Dordogne, France), un site présentant une forte amplitude hydrodynamique, un conduit terminal connu et un bassin d'alimentation de 75 km<sup>2</sup>. Un réseau de quatre sismomètres Raspberry Shake a enregistré en continu pendant plus de deux ans le bruit sismique afin d'analyser au cours du cycle hydrologique les variations d'amplitude du signal ainsi que les fluctuations relatives de vitesse de propagation des ondes dans le sol, déduites des corrélations croisées. Les résultats montrent que la bande 7–12 Hz permet d'identifier 29 crues au cours de trois cycles hydrologiques, avec des augmentations d'énergie atteignant +3 dB lors des pics de débit jusqu'à 9 m<sup>3</sup>/s. Les corrélations de bruit sismique révèlent par ailleurs des variations de vitesse atteignant  $\pm 2$  % dans la bande 0,1–0,5 Hz, présentant une relation inverse avec les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe du Bathonien, suggérant une réponse mécanique du milieu à la charge hydraulique.

**Abstract.** While karst systems are difficult to understand because of their heterogeneity and complexity, passive seismic methods can offer a non-invasive alternative for detecting variations in flow and storage. This study explores the potential of this method at the Glane karst spring (Dordogne, France), a site with high hydrodynamic amplitude, a known terminal conduit, and a 75 km<sup>2</sup> recharge area. A network of four Raspberry Shake seismometers continuously recorded seismic noise for more than two years in order to analyse signal amplitude variations and relative fluctuations in

---

\* Corresponding author: [axellepantiga@gmail.com](mailto:axellepantiga@gmail.com)

ground wave propagation velocity during the hydrological cycle, as deduced from cross-correlations. The results show that the 7–12 Hz band can be used to identify 29 floods over three hydrological cycles, with energy increases of up to +3 dB during peak flows of up to 9 m<sup>3</sup>/s. Seismic noise correlations also reveal velocity variations of up to ±2% in the 0.1–0.5 Hz band, which are inversely related to fluctuations in the piezometric level of the Bathonian aquifer, suggesting a mechanical response of the environment to hydraulic load.

## 1 Introduction

Le suivi des milieux karstiques constitue un enjeu majeur pour la compréhension des dynamiques de recharge, de stockage et de transfert, en particulier puisque ces systèmes contribuent à l'alimentation en eau potable pour 40% de la population mondiale [1].

L'objectif principal du suivi par sismique passive sur le site d'étude est de comprendre la dynamique des écoulements d'eau souterrains, cette méthode s'étant déjà révélée comme un outil puissant pour l'étude des dynamiques hydrologiques dans les environnements fluviaux et glaciaires [2–4].

Concernant l'analyse des variations de vitesse sismique associées à des changements de niveaux piézométriques, des résultats prometteurs ont déjà été révélés en contexte volcanique [5]. Dans le cadre de la gestion de la ressource en eau, plusieurs études ont montré que la diffusion thermique et les variations de stockage de l'eau souterraine pouvaient expliquer des changements de vitesse des ondes de surface, à partir de trente années d'enregistrements sismiques [6]. A l'échelle de la vallée de San Gabriel en Californie, la déplétion progressive des nappes phréatiques durant les périodes de sécheresse a été corrélée à la fois à une augmentation de  $\delta v/v$  et à des déplacements verticaux du sol mesurés par GPS [7]. L'extension spatiale de ces mesures permet de cartographier les variations de  $\delta v/v$ , dont les amplitudes les plus fortes se situent dans les zones où l'aquifère est le plus épais.

Dans les environnements karstiques, les applications sont encore assez rares. Sur le plateau du Larzac, une étude fondée sur un modèle de vitesse 1D issu de mesures de sismiques actives, a mis en évidence un décalage temporel entre les variations de vitesse sismique et les épisodes de précipitation, attribué aux processus d'infiltration [8]. Des variations de vitesse associées à des déplacements géodésiques dans les quatre premiers kilomètres de profondeur ont révélé des cycles de recharge et de décharge au sein d'un aquifère karstique en Italie [9]. Enfin, dans le karst du Jura, un réseau de 60 capteurs autonomes a enregistré des diminutions de  $\delta v/v$  – déduites des autocorrélations de signaux sismiques – lors des épisodes de pluie, interprétées comme le résultat d'une infiltration rapide au travers des zones fracturées [10].

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer la faisabilité du suivi sismique passif pour détecter les variations d'écoulement et de stockage dans un conduit karstique actif, sur la base d'enregistrements sismiques continus. Une analyse en amplitude est proposée pour étudier la signature sismique des variations d'écoulement lors des épisodes de crue et les variations relatives de vitesse associées aux changements de charge hydraulique sont étudiées.

## **2 Site d'étude**

### **2.1 Localisation**

Le site d'étude est la source de Glane, située à environ 30 km au nord-est de Périgueux, en Dordogne (France), à la limite nord-est du Bassin aquitain. Ce bassin est principalement constitué de formations carbonates du Jurassique au Crétacé supérieur, formant un système aquifère multicouche qui s'étend sur l'ensemble du département [11].

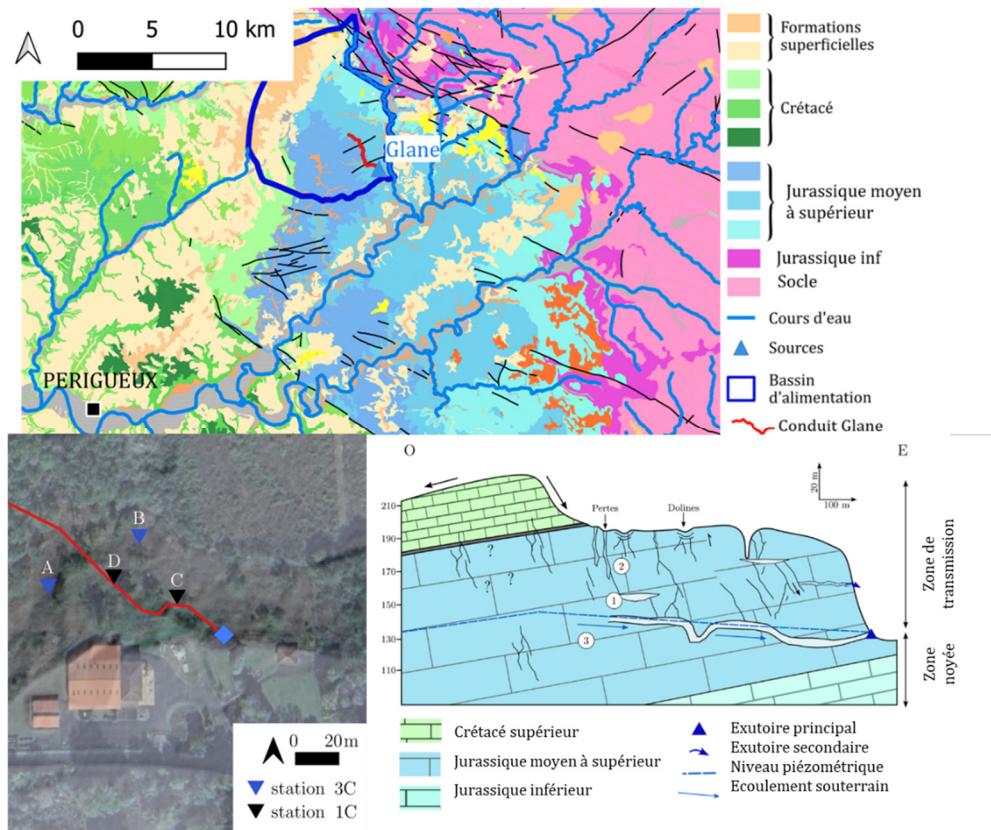
La source de Glane est l'une des principales sources de Dordogne captée pour l'alimentation en eau potable. Son bassin d'alimentation s'étend sur 75 km<sup>2</sup> (Figure 1) La source est l'exutoire d'un conduit souterrain accessible dans sa portion terminale, entièrement saturé et exploré par les spéléologues, offrant ainsi un contexte rare où la géométrie de l'exutoire est partiellement connue. Le débit moyen annuel est de l'ordre de 0,5 m<sup>3</sup>/s, mais présente une forte variabilité, avec des débits d'étiage inférieurs à 0,1 m<sup>3</sup>/s jusqu'à des crues dépassant 10 m<sup>3</sup>/s. Cette forte amplitude hydrodynamique, associée à la connaissance structurale du conduit terminal, constitue un cadre particulièrement pertinent pour tester des approches géophysiques visant à caractériser la dynamique des écoulements karstiques.

### **2.2 Fonctionnement hydrogéologique**

Le fonctionnement hydrogéologique de la source de Glane a été appréhendé grâce à un suivi continu de paramètres physico-chimiques complété par des analyses hydrochimiques mensuelles.

Les temps de réponse aux précipitations varient au cours du cycle hydrologique, de moins d'une journée en hiver à plusieurs jours en été, traduisant le rôle important de la zone non saturée en début de cycle et un drainage plus direct des eaux nouvellement infiltrées lors des crues hivernales (Figure 1). Les signatures géochimiques et isotopiques indiquent que les eaux drainées proviennent de la zone noyée, où un dégazage de CO<sub>2</sub> se produit en conditions biphasiques, et circulent majoritairement dans des conduits ouverts. Ces caractéristiques sont typiques d'un fonctionnement de type jurassien [12] malgré la mise en charge du conduit terminal.

Enfin, la source présente une contamination notable en nitrates, avec des concentrations variant entre 20 mg/L à l'étiage et jusqu'à 40 mg/L lors des crues. L'ensemble de ces éléments souligne un système réactif, bien développé et présentant des transitions hydrologiques marquées, constituant un site favorable à l'évaluation du potentiel de la sismique passive pour l'étude des écoulements karstiques.



**Fig. 1.** En haut : Carte géologique de localisation générale. Bas gauche : implémentation des sismomètres sur vue satellite du site de la source de Glane. Bas droite : Schéma du fonctionnement hydrogéologique du système karstique de Glane.

### 3 Suivi par sismique passive

#### 3.1 Instrumentation pour la sismique passive

Quatre sismomètres Raspberry Shake ont été installés sur le site afin d'assurer un suivi continu entre décembre 2021 et juillet 2024. Deux sismomètres à une composante (RS1D V7) ont été déployés directement au-dessus du conduit, tandis que deux sismomètres à trois composantes (RS3D V5) ont été installés de part et d'autre de celui-ci. Les capteurs étaient connectés à un serveur NTP assurant la synchronisation temporelle à partir de l'horloge GPS.

#### 3.2 Analyse en amplitude

La méthode de traitement a été appliquée sur les données de la première crue présentant une réponse significative en débit, qui a eu lieu entre les 28 et 31 décembre 2021 après un épisode pluvieux de 60 mm du 26 au 27 décembre. L'analyse du spectrogramme sur cette période a montré des phases d'énergie plus importantes coïncidant avec les pics de débit entre 7 et 12 Hz. Les données ont donc été moyennées dans cette bande de fréquence, cohérente avec les résultats de travaux ayant identifié un signal sismique associé à un écoulement d'eau [13,14].

Afin de limiter l'influence du bruit anthropique, encore présent dans la bande 7-12 Hz, l'enveloppe du signal moyenné a été extraite, sur la base de minimum locaux, permettant de se focaliser sur les contributions les plus faibles plutôt qu'au bruit issu des sources anthropiques.

La méthodologie a ensuite été appliquée à l'ensemble des données. Les données sont ensuite normalisées, indépendamment pour chaque composante afin de s'affranchir des effets de site. La normalisation est réalisée par rapport à une valeur de référence,  $P_{ref}$ , correspondant à la valeur moyenne de la PSD entre le 15 juillet et le 15 août 2022, période de stabilité hydrologique.

### **3.3 Calcul des corrélations croisées**

Les corrélations croisées ont été calculées à l'aide du logiciel MSNoise [15]. Après pré-traitement, les corrélations sont effectuées sur des fenêtres temporelles de 30 minutes pour chaque paire de station. Les corrélogrammes obtenus sont ensuite comparés à un corrélogramme de référence, déterminé en moyennant l'ensemble des corrélogrammes de chaque paire de station sur une période de référence. Cette période doit correspondre à une phase stable d'un point de vue hydrologique. La période utilisée est choisie du 15 août au 15 septembre 2023.

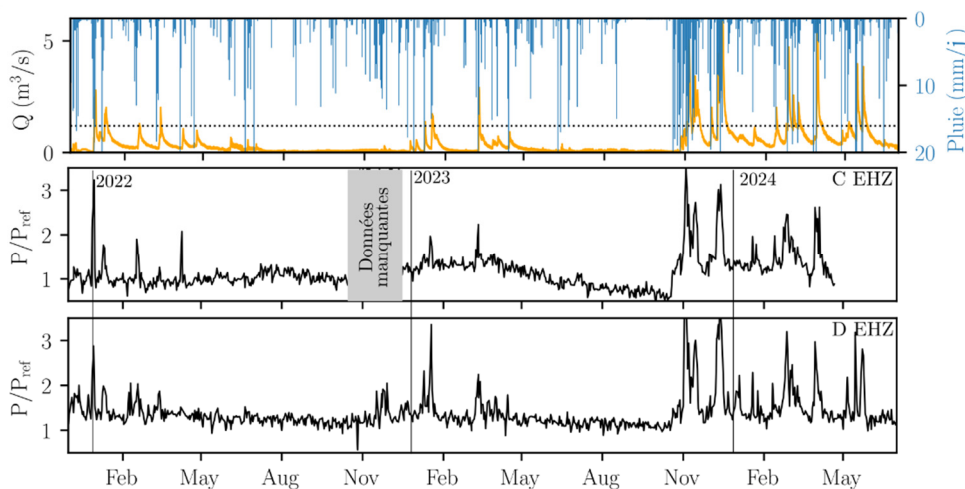
Pour extraire les variations de Vitesse, le logiciel MSNoise utilise la méthode MWCS (Moving Window Cross-Spectral) [16]. Cette méthode permet de déterminer le décalage temporel entre les corrélogrammes actuels et ceux de référence. En supposant que la perturbation de contrainte soit homogène sur la zone d'étude, le rapport  $\delta t/t$  est proportionnel à  $-\delta v/v$ .

## **4 Résultats et interprétations**

### **4.1 Variations en amplitude**

Sur les composantes verticales des sismomètres A et B, le niveau de bruit moyen entre 7 et 12 Hz est de 171,5 dB. Lors des trois cycles hydrologiques, vingt-neuf crues ont été enregistrées. Les crues les plus importantes, à l'automne 2023, les pics de débit ont atteint 9 m<sup>3</sup>/s et sont associés à des augmentations d'énergie sismique de 3 dB

La source du signal sismique en contexte fluviale et glaciaire peut être associée soit au transport sédimentaire, soit à la turbulence de l'eau [13,17,18]. Dans le conduit karstique de la source de Glane, les particules transportées sont uniquement sableuses, limitant les impacts pouvant engendrer du bruit sismique. La partie terminale du conduit est saturée en permanence, ce qui implique un rayon hydraulique constant. Par conséquent, l'augmentation du bruit sismique serait plutôt due à la modification du gradient de pression lors des crues [19].



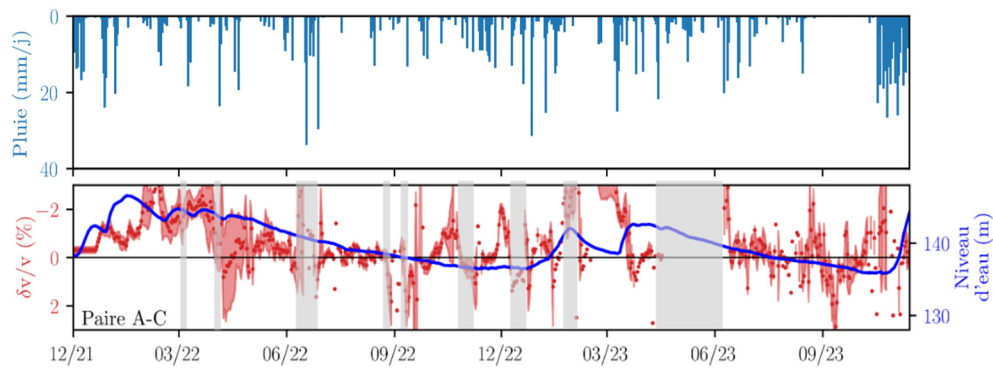
**Fig. 2.** Débits et pluies journaliers (respectivement en orange et bleu dans le graphe supérieur) et données sismiques extraites de l’enveloppe de la PSD normalisée entre 7 et 12 Hz de décembre 2021 à juillet 2024 sur l’ensemble des capteurs.

Par ailleurs, en supposant que le diamètre du conduit karstique souterrain de Glane mesure environ 2 mètres de diamètre, la vitesse d’écoulement peut descendre à 0,03 m/s en été et atteindre 1,6 m/s au maximum. Le réseau est capable de mesurer des pics d’énergie pour des crues atteignant 1,4 m<sup>3</sup>/s (mai 2022), ce qui correspond à une vitesse d’environ 0,45 m/s.

#### 4.2 Corrélations croisées des signaux sismiques

Les variations relatives de vitesse sont présentées en Figure 3 la paire de sismomètre A-C. Les zones grisées indiquent les périodes où les intercorrélations ne sont pas stables, rendant le calcul du  $\delta v/v$  bruité et peu fiable. Ces intervalles se caractérisent souvent par des fluctuations abruptes. En raison du faible rapport signal/bruit à haute fréquence, l’analyse s’est concentrée sur les variations à plus longue période, comparées aux changements du niveau piézométrique mesuré dans un forage de référence du Bathonien (courbe bleue).

Les résultats obtenus pour la paire AC mettent en évidence une variation d’environ 2% du  $\delta v/v$  au cours du cycle hydrologique. En 2022, la vitesse sismique (courbe rouge) augmente progressivement à mesure que le niveau piézométrique de la nappe du Bathonien (courbe bleue) diminue. En janvier 2023, une diminution marquée du  $\delta v/v$  coïncide avec une remontée rapide du niveau piézométrique. Ce comportement se répète à l’automne 2023, avec une nouvelle augmentation du  $\delta v/v$  accompagnant la baisse progressive du niveau d’eau. Ces observations suggèrent une relation inverse entre le niveau piézométrique et la vitesse sismique, les hausses de niveau d’eau se traduisant par une réduction de la vitesse.



**Fig. 3.** Variations relatives de vitesse (points rouges) et erreurs relatives (zones rouges) obtenues entre 0,1 et 0,5 Hz entre décembre 2021 et décembre 2023. La courbe bleue représente les niveaux piézométriques mesurés dans la nappe du Bathonien dans un forage à Lempzours. Les zones grisées correspondent aux périodes d'instabilité des intercorrélations, où le calcul des variations de vitesse est faussé. La pluviométrie est montrée dans le graphe supérieur.

## 5 Discussion

Les variations d'amplitude observées montrent que le bruit sismique passif contient une information directement liée aux écoulements dans le conduit drainant la source de Glane. Cette sensibilité est cohérente avec le fonctionnement hydrogéologique du système, caractérisé par des réponses rapides en période humide, une mise en charge de la zone noyée et une forte variabilité des débits. Ces résultats confirment que les signaux sismiques peuvent constituer un indicateur des fluctuations hydrodynamiques proches de l'exutoire, même avec un réseau réduit.

Les variations de vitesse  $\delta v/v$  suggèrent quant à elles que les processus de recharge, de stockage et de mise en pression du karst influencent les propriétés élastiques du milieu. La relation inverse observée entre  $\delta v/v$  et le niveau piézométrique est en accord avec un comportement de type relaxation de contraintes ou augmentation de saturation dans les zones fracturées. Toutefois, l'échelle spatiale d'investigation reste limitée par l'espacement maximal de 30 m entre capteurs, ce qui restreint la capacité à distinguer les contributions respectives de l'épikarst (zone plus superficielle) et de la zone noyée. La reconstitution des variations de vitesse par corrélations croisées dans différentes bandes de fréquences permettrait d'identifier des variations de stockage à différentes échelles dans le système : dans l'épikarst à l'échelle des crues ou dans la zone noyée à l'échelle saisonnière.

## 6 Conclusion et perspectives

Le site de la source de Glane a été instrumenté pour un enregistrement continu du bruit sismique ambiant pour ses caractéristiques hydrodynamiques et son réseau karstique développé. Les résultats permettent de définir une signature sismique mesurable des variations d'écoulement dans le conduit souterrain. L'analyse en amplitude du bruit sismique dans la bande 7–12 Hz met en évidence 29 crues enregistrées sur trois cycles hydrologiques, avec des augmentations d'énergie atteignant +3 dB lors des événements les plus intenses, associés à des débits pouvant atteindre 9 m<sup>3</sup>/s.

Les corrélations de bruit sismique révèlent des variations relatives de vitesse atteignant  $\pm 2$  % dans la bande 0,1–0,5 Hz, présentant une relation inverse avec les variations du niveau

piézométrique : la vitesse augmente lorsque la nappe du Bathonien s'abaisse, et diminue lors des phases de recharge rapide. Cette réponse mécanique suggère une sensibilité du milieu aux variations de charge hydraulique dans la zone noyée au cours du cycle hydrologique.

## 7 Références

1. D. Ford and P. Williams, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley&Sons Ltd (2007).
2. A. Burtin, L. Bollinger, J. Vergne, R. Cattin, and J. L. Nábělek, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **113**, (2008).
3. T. C. Bartholomäus, J. M. Amundson, J. I. Walter, S. O'Neel, M. E. West, and C. F. Larsen, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 6391 (2015).
4. U. Nanni, F. Gimbert, C. Vincent, D. Gräff, F. Walter, L. Piard, and L. Moreau, *The Cryosphere* **14**, 1475 (2020).
5. C. Sens-Schönfelder and U. Wegler, *Geophys. Res. Lett.* **33**, (2006).
6. T. Lecocq, L. Longuevergne, H. A. Pedersen, F. Brenguier, and K. Stammler, *Sci. Rep.* **7**, 14241 (2017).
7. T. Clements and M. A. Denolle, *Geophys. Res. Lett.* **45**, 6459 (2018).
8. B. Fores, C. Champollion, G. Mainsant, J. Albaric, and A. Fort, *Vadose Zone J.* **17**, 170163 (2018).
9. C. Almagro Vidal, L. Zaccarelli, F. Pintori, P. L. Bragato, and E. Serpelloni, *Geophys. Res. Lett.* **48**, e2021GL093191 (2021).
10. A. Abi Nader, *Development of an Integrated Approach in Hydrogeophysics for a Multi-Scale Study of Karst Reservoirs : The Case of the Fourbanne Watershed, Jura Mountains*, phdthesis, Université Bourgogne Franche-Comté, 2023.
11. G. Lorette, R. Lastennet, N. Peyraube, and A. Denis, *J. Hydrol.* **566**, 137 (2018).
12. B. Marsaud, *Structure et Fonctionnement de La Zone Noyee Des Karsts a Partir Des Resultats Experimentaux*, Phdthesis, Paris 11, 1996.
13. L. Hsu, N. J. Finnegan, and E. E. Brodsky, *Geophys. Res. Lett.* **38**, L13407 (2011).
14. B. Schmandt, R. C. Aster, D. Scherler, V. C. Tsai, and K. Karlstrom, *Geophys. Res. Lett.* **40**, 4858 (2013).
15. T. Lecocq, C. Caudron, and F. Brenguier, *Seismol. Res. Lett.* **85**, 715 (2014).
16. D. Clarke, L. Zaccarelli, N. M. Shapiro, and F. Brenguier, *Geophys. J. Int.* **186**, 867 (2011).
17. J. Barrière, A. Oth, R. Hostache, and A. Krein, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 2294 (2015).
18. D. L. Roth, N. J. Finnegan, E. E. Brodsky, D. Rickenmann, J. M. Turowski, A. Badoux, and F. Gimbert, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* **122**, 1182 (2017).
19. A. Pantiga, V. Allègre, R. Lastennet, N. Houillon, F. Naessens, S. Mateo, and A. Denis, *Environ. Process.* **12**, 11 (2025).