

Le *galet-tilt*, un galet artificiel pour reconstruire le déplacement haute-résolution (< seconde) des particules en rivière sur le long terme (mois-années).

Tilt-gravel, an artificial pebble to estimate the movement of particles in rivers at high resolution (<second) and over the long term (months-years).

Oldrich NAVRATIL*(CNRS-UMR5600 EVS, Lyon, France), **Franck PERRET** (CNRS-UMR5600 EVS, Lyon, France), **Léa TROUILLAS** (CNRS-UMR5600 EVS, Lyon, France), **Mathieu CASSEL** (CNRS-UMR5600 EVS, Lyon, France), **Hélène GUYARD** (IGE UMR252 UGA, Grenoble, France), **Alexandre PEETERS** (CNRS-UMR5600 EVS, Lyon, France), **Bastien BOURJAILLAT** (CNRS-UMR5600 EVS, Lyon, France)

*auteur correspondant

1. Comment tracer les galets en rivière ?

De nombreux travaux de recherche sur le charriage en rivière visent à mieux comprendre la dynamique de transfert des particules charriées individuellement et en groupe le long des cours d'eau. Ils visent à estimer leurs trajectoires, leurs vitesses en fonction des caractéristiques d'écoulement, ainsi que leur diffusion en aval en lien avec les fortes interactions avec les autres particules, les formes alluviales (eg. radiers/mouilles/bancs), la végétation et les nombreux ouvrages (eg. seuils, barrages, ponts) qui ponctuent les cours d'eau.

L'injection de particules marquées dans les cours d'eau et leurs suivis au fil des crues a été introduite par les travaux pionniers d'Einstein (1937) en canal et les technologies ont fortement évolué depuis (Hassan et Roy, 2016). L'utilisation de traceurs magnétiques ont permis par exemple à Haschenburger (2013) de caractériser les processus de diffusion vers l'aval de jeux de particules importants et sur plusieurs années. Le traçage RFID (identification par radiofréquence) à l'aide de transpondeurs passif (PIT-tag, eg. Liébault *et al.*, 2012), puis actif (aUHF-tag, eg. Cassel *et al.*, 2017) ont permis d'améliorer nettement le suivi particulaire d'un très grand nombre de particules ($>10^2$ à 10^3) afin d'estimer leurs distances de transfert et leurs vitesses virtuelles après chaque crue. Bien qu'elles aient également permis d'affiner les processus de dispersion de ces sédiments dans divers environnements, ces technologies ne permettent toutefois pas d'accéder au déplacement ou à la probabilité de mobilité/repos des particules pendant les crues. En poursuivant cet objectif, Oldine et Johnson (2015) ont équipés des galets artificiels avec des accéléromètres, permettant ainsi de définir toutes les 10-15 minutes si les particules ont bougé ou non. Cette technologie a permis d'évaluer la probabilité de mouvement des particules sur une année, sans toutefois pouvoir définir si les particules ont été transportées vers l'aval ou si elles ont seulement basculé sur elles-mêmes sans se déplacer. Pretzlav *et al.* (2020) ont repris ces « smartrock » afin d'affiner la probabilité de mobilité/stabilité de ces galets artificiels (en plastique haute densité) en crue grâce à des unités de mesure inertielle (IMU) à 9 axes avec une acquisition à 10Hz. Ces nouvelles données ont permis d'explorer la probabilité de mouvement des traceurs en fonction du débit et du temps. Compte tenu de la durée de vie restreinte des batteries, la période de suivi offerte par cette technologie reste restreinte à seulement quelques dizaines de jours (22 jours pour cette étude), limitant les chances d'observations de déplacement de particules lors des crues dont l'occurrence est difficile à prédire : rares (et fortes) et dans des environnements peu mobiles. Dans cette étude, nous présentons une expérimentation originale de galets-tilts qui devrait permettre de dépasser certaines des précédentes limitations afin de reconstituer le déplacement de particules à haute résolution (<seconde) sur le long terme (>mois-années).

2. Les premiers résultats des galets-tilts sur la Séveraisse (massif des Ecrins)

Nous avons couplé dans des galets artificiels (Cassel, 2017), deux transpondeurs - l'un actif (aUHF-tag), l'autre passif (PIT-tag) servant à la géolocalisation du traceur, ainsi qu'une métrologie embarquée basée sur l'utilisation i) d'un microcontrôleur Tinyduino® et ii) d'un montage de trois capteurs tilts permettant d'enregistrer et d'horodater le basculement complet des particules. Cette approche offre l'avantage de laisser le système « endormi » lorsqu'il n'y a pas de transport solide, optimisant ainsi la durée de vie des batteries.

Cinq galet-tilts (Fig. 1 A et B ; D50=128mm) ont été injectés dans le torrent de La Séveraisse (massif des Ecrins) en juin 2021 en période de hautes-eaux. Durant les premiers jours suivant l'injection, leurs positions après

déplacements sur près d'un kilomètre ont été horodatées. Ils ont finalement tous été récupérés en mars 2022 à des distances comprises entre 4.5km et 6.5km de leur point initial d'injection. Ces galets ont été transportés par des crues journalières de fonte pendant les deux premiers mois ($<30 \text{ m}^3/\text{s}$), puis par 9 crues estivales et automnales, dont une crue en octobre 2021 avec un pic $> 60 \text{ m}^3/\text{s}$.

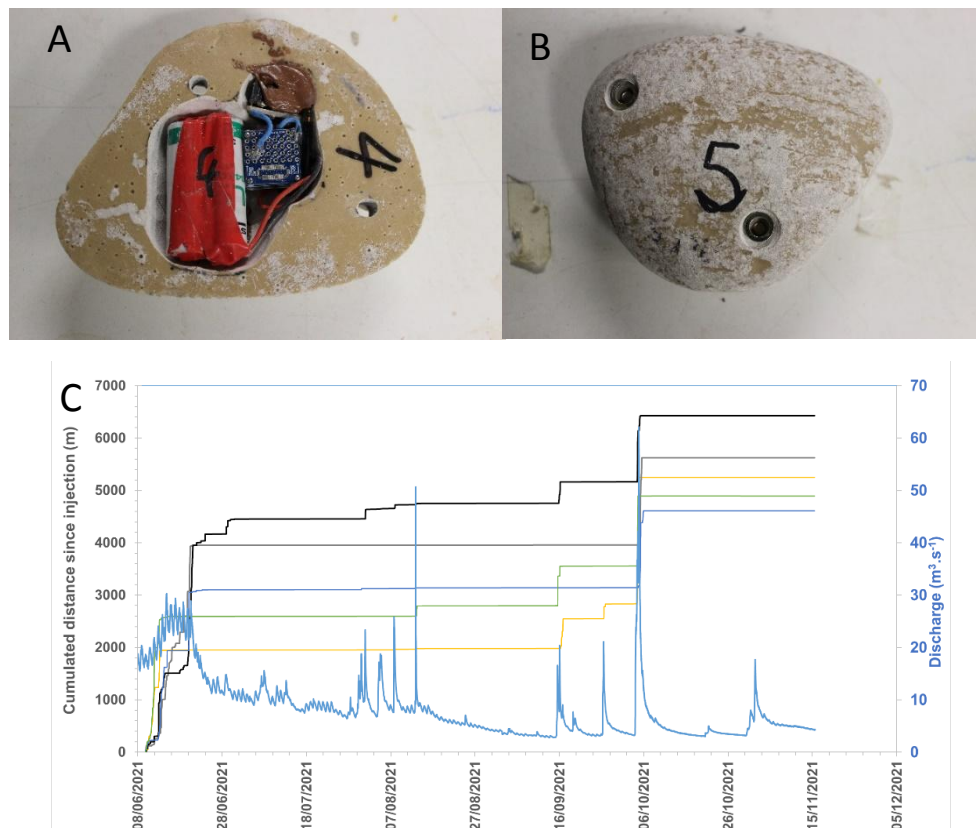


Figure 1 : (A et B) Tilt-gravel, un galet artificiel avec le microcontrôleur (Tinyduino ; <https://tinycircuits.com/pages/tinyduino-overview>), le capteur tilt et sa batterie ; un aUHF-tag et un pit-tag sont également logés dans le galet pour maximiser les probabilités de détection et géolocalisation à longue et courte portées. (C) Les distances de transport cumulées des 5 galets tilts (axe ordonné de gauche) au cours du temps (axe abscisse) en lien avec l'hydrologie du site (en bleu ; axe ordonnée de droite)

Les suivis des positions des particules combinant (i) une prospection pédestre avec une antenne RFID et un DGPS, ii) à l'aide d'un drone (Cassel *et al.*, 2019) et (iii) leurs passages horodatés au niveau d'une station RFID fixe surveillant en continu la rivière (Cassel *et al.*, 2021) ont servi de points de calage et nous ont permis de reconstituer le déplacement des 5 particules au fil des crues (Fig. 1C) avec une résolution métrique et ce pendant 9 mois. Les analyses en cours permettront d'évaluer la probabilité de mouvement et la diffusion de ces 5 galets en lien avec les facies d'écoulement (tronçons rectilignes, zones de tressage), ainsi que les ouvrages hydrauliques traversés. Une miniaturisation du système permettra également d'équiper des particules plus petites.

REFERENCES

- Einstein, AH. (1937) Bedload transport as a probability problem, Colorado State University.
- Cassel M et al. 2017. Caractérisation des particules dans les lits à galets: expérimentation, développements, méthodologiques et applications in situ, thèse de doctorat ; Géographie.UniversitédeLyon,2017.
- Cassel M et al. 2019. Comparison of ground-based and UAV a-UHF artificial tracer mobility monitoring methods on a braided river; DOI: 10.1002/esp.4777
- Cassel M et al. 2021. The e-RFIDuino: An Arduino-based RFID environmental station to monitor mobile tags; DOI: 10.1016/j.ohe.2021.e00210
- Hassan MA and Roy AG. 2016. Coarse particle tracing in fluvial geomorphology. In Tools in Fluvial geomorphology, Kondolf GM, Piégay H (eds). John Wiley and Sons : Chichester; 306-323
- Haschenburger JK. 2013. Tracing river gravels: Insights into dispersion from a long-term field experiment. Geomorphology 200: 121-131. DOI : 10.1016/geomorph.2013.03.033
- Liébault F et al. 2012. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream: bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. Earth Surface Processes and Landforms 37: 385–399. DOI: 10.1002/esp.2245
- Olinde L and Johnson J. 2015. Using RFID and accelerometer-embedded tracers to measure probabilities of bed load transport, step lengths, and rest times in a mountain stream. Water Resour. Res. 51: 7572–7589. DOI: 10.1002/2014wr016120
- Pretzlav K et al. 2020. Smartrock Transport in a Mountain Stream: Bedload Hysteresis and Changing Thresholds of Motion, Water Resour. Res., <https://doi.org/inee.bib.cnrs.fr/10.1029/2020WR028150>