



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI.

Granulométrie de surface des lits en tresses à partir d'images drone

Frédéric LIÉBAULT¹, Michaël DESCHÂTRES¹, Laurent BORGNIET², Gabriel MELUN³

¹ Université Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, Grenoble, France.

² Université Grenoble Alpes, INRAE, UR LESSEM, Grenoble, France.

³ Office français de la biodiversité (OFB), Direction de la recherche et de l'appui scientifique, Vincennes Cedex, France.

Correspondance : Frédéric LIÉBAULT, frederic.liebault@inrae.fr

La granulométrie de surface des lits fluviaux est un indicateur de première importance pour l'évaluation des conditions physiques qui contrôlent la qualité des habitats aquatiques. Une méthode spécifique aux lits en tresses a été développée et testée pour extraire la granulométrie de surface à partir d'images haute-résolution obtenues par drone. Cette note méthodologique présente les grandes lignes du protocole, les premiers résultats obtenus, ainsi que les perspectives offertes par ces premiers tests.

Introduction

La biodiversité des hydrosystèmes fluviaux est en grande partie conditionnée par l'hétérogénéité des conditions physiques qui définissent les habitats aquatiques et terrestres des lits fluviaux. Pour certains styles morphologiques de cours d'eau, comme les lits en tresses, le substrat alluvial constitue très souvent un élément majeur d'hétérogénéité spatiale. Établir un diagnostic des conditions physiques pour ce type de rivière nécessite de disposer d'une méthode permettant de retranscrire le plus fidèlement possible la granulométrie de surface des lits en tresses. Ceci est d'autant plus important que la granulométrie est un indicateur sensible aux modifications du régime sédimentaire de ces rivières, qui peuvent conduire à un basculement rapide vers un style morphologique dégradé de lit incisé à chenal unique. Dans les cas les plus extrêmes, la rivière s'incise dans ses propres alluvions et finit par mettre en affleurement le substratum rocheux, ce qui constitue une perte considérable d'habitats aquatiques (disparition des frayères et des habitats hyporhéiques¹).

Dans le cadre du protocole CarHyCE de l'Office français de la biodiversité (OFB) (Baudoin *et al.*, 2017), qui vise à établir un diagnostic physique à l'échelle d'un tronçon homogène, la granulométrie de surface est obtenue à partir d'un prélèvement au sol de type Wolman (100 particules prélevées de manière aléatoire et mesurées individuellement) réalisé sur un radier présentant la fraction granulométrique la plus grossière, et d'obser-

vations ponctuelles du type de substrat présent au droit des points de mesure de chaque transect. Dans le cas des lits en tresses, ce protocole n'offre qu'une image très partielle de la mosaïque granulométrique de surface, qui résulte de l'entrecroisement de macroformes sédimentaires multiples (seuils, mouilles, bancs, nappes de charriage). Les indicateurs qui en résultent restent donc limités pour des comparaisons inter-sites ou pour des suivis temporels.

Le développement parallèle des drones et des outils de restitution photogrammétrique offre aujourd'hui la possibilité d'obtenir une information spatiale très riche pour l'exploration par télédétection des états de surface des lits fluviaux. Une méthode spécifique aux lits en tresses a ainsi été développée et testée pour extraire la granulométrie de surface à partir d'images haute-résolution obtenues par drone. Cette note méthodologique présente les grandes lignes du protocole, les premiers résultats obtenus, ainsi que les perspectives offertes par ces premiers tests.

Protocole méthodologique

La méthode est fondée sur l'utilisation d'un drone (DJI Phantom 4 RTK) équipé d'une caméra haute-résolution (20 Mpxl) et d'un GPS embarqué en liaison avec une base GPS au sol pour la correction en cinématique temps réel (RTK)² du positionnement. Le géoréférencement direct du centre optique de chaque image obte-

1. Appliqué à un cours d'eau, ce terme se réfère à la zone sédimentaire saturée en eau, située au-dessous et à côté du lit de la rivière.
2. La cinématique temps réel (notée RTK pour *Real Time Kinematics*) est une technique de positionnement par satellite fondée sur l'utilisation de mesures de la phase des ondes porteuses des signaux émis par les différentes constellations de satellites. Une station de référence fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre (source : Wikipédia).

Encadré 1 – Photogrammétrie SfM (*Structure from Motion*).

La photogrammétrie SfM est une technique de restitution photogrammétrique par stéréoscopie qui consiste à obtenir une géométrie 3D d'un objet à partir d'une série d'images 2D superposées de cet objet. La différence fondamentale de la SfM par rapport aux approches photogrammétriques conventionnelles réside dans le fait que la géométrie 3D de l'objet imagé, la position et l'orientation de l'appareil de prises de vue sont résolues automatiquement, sans qu'il soit nécessaire de disposer de cibles préalablement géolocalisées. Cette résolution groupée repose sur un processus d'ajustement itératif (*bundle adjustment*) qui opère à partir d'objets communs automatiquement détectés sur les superpositions d'images. Cette technique est donc capable de restituer la structure 3D d'un objet à partir d'images superposées de l'objet prises selon différents angles, sans qu'il soit nécessaire de connaître la géométrie interne, la position et l'orientation de l'appareil de prises de vue. Cela s'apparente à reconstruire un objet en 3D à partir d'un capteur visuel en mouvement autour de cet objet, d'où le terme de *Structure from Motion*. L'origine de la SfM remonte aux années 1990 avec les développements issus de la vision assistée par ordinateur et de la reconnaissance automatique d'objets par traitement d'image. Son application en topographie s'est développée à partir des années 2010 avec l'apparition des premiers programmes SfM adaptés pour ce type d'usage (Westoby *et al.*, 2012).

nue avec cet équipement, de précision centimétrique, représente un avantage décisif pour les applications photogrammétriques, car il permet d'améliorer la qualité des restitutions topographiques, tout en réduisant le nombre de points de calage au sol. Les prises de vue sont traitées dans un programme (Agisoft Metashape 1.6.2) de restitution photogrammétrique de type *Structure from Motion* (SfM) (encadré 1) afin d'obtenir une ortho-image de haute-résolution (2-3 cm) et un nuage de points 3D de haute densité (1 500 points/m²), à partir duquel il est possible d'extraire la rugosité altimétrique de surface. Cette rugosité locale est ensuite utilisée comme un proxy de la granulométrie de surface, à partir d'une loi de calibration. Ce principe a déjà été éprouvé à partir de levés topographiques terrestres par laserscanning (Heritage et Milan, 2009), mais ces campagnes nécessitent un équipement onéreux et peu adapté lorsqu'il s'agit de couvrir un tronçon de plusieurs kilomètres de long. L'utilisation de données LiDAR aéroportées permet de couvrir rapidement de grandes surfaces, mais cela impose de passer par un prestataire pour l'acquisition et le traitement des données brutes. D'autre part, le coût de la prestation reste élevé et les densités de point au sol sont souvent

3. Les percentiles granulométriques sont des paramètres de description des distributions statistiques de tailles de grain qui permettent de diviser la distribution en 100 parts égales (la médiane correspond au percentile 50 %).

insuffisantes pour les applications granulométriques. Face à ces technologies, les drones offrent une solution avantageuse et pragmatique pour produire en autonomie et à moindre coût, sur des surfaces relativement importantes (environ 100 ha/jour), des nuages de points 3D de haute densité. Il est possible de couvrir des tronçons de 2 à 3 km à la journée. Nos premiers essais de cartographie granulométrique par drone ont été réalisés en 2015 sur le lit en tresses du Vénéon à partir de l'utilisation d'un quadricoptère équipé d'une caméra GoPro (5 Mpxl) de qualité standard (Vázquez-Tarrió *et al.*, 2017). Les résultats ont montré une bonne corrélation entre la rugosité altimétrique moyennée à l'échelle des bancs et les percentiles granulométriques³ mesurés sur ces mêmes bancs par des échantillonnages de type Wolman. Des résultats équivalents ont été obtenus sur une petite rivière à substrat grossier (Woodget et Austrums, 2017). Nous avons donc procédé à partir de 2020 à de nouvelles acquisitions avec le drone DJI Phantom 4 RTK, avec pour objectif d'optimiser la méthode de cartographie granulométrique des lits en tresses fondée sur la rugosité altimétrique locale.

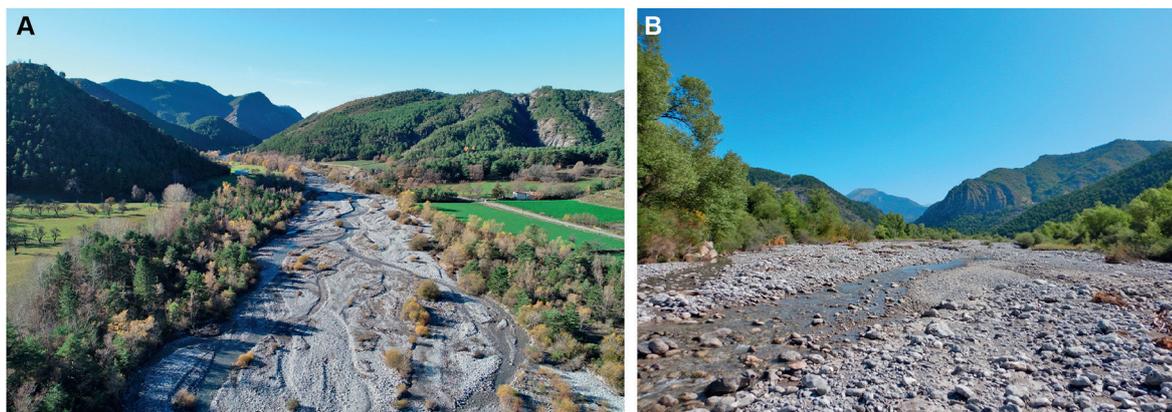
Les acquisitions ont été réalisées sur 12 rivières en tresses alpines aux caractéristiques hydrologiques et lithologiques (nature des roches) contrastées (figure 1, tableau 1). Les vols drone ont été réalisés en conditions d'étiage afin de minimiser les surfaces en eau et de bénéficier de conditions d'eau claire pour une bonne visibilité du substrat dans les chenaux en eau (printemps-été pour les rivières en régime méditerranéen, automne pour les rivières en régime nival ou nivo-glaciaire). Sur chaque rivière, un tronçon de longueur équivalente à 15 fois la largeur du lit actif a été sélectionné (conformément au protocole CarHyCE). Les vols drone ont été réalisés à une altitude relative de 70 m au-dessus du sol, de façon à obtenir des images de résolution centimétrique. Pour chaque tronçon, une soixantaine de points de calage au sol ont été matérialisés et mesurés avec un GPS différentiel de précision centimétrique (Leica Zeno, Trimble R2).

Afin d'obtenir une loi de calibration granulométrique (relation statistique entre la rugosité et la granulométrie

Tableau 1 – Sites d'étude sélectionnés pour le développement de la méthode de cartographie granulométrique de surface des lits en tresses à partir d'images drone.

| Sites d'étude et coordonnées WGS84 | Surface drainée (km ²) | Régime hydrologique | Lithologies dominantes du substrat alluvial | Longueur du tronçon (m) |
|--|------------------------------------|---------------------|---|-------------------------|
| Arigéol (44°11'13.50"N, 6°21'53.58"E) | 63 | Méditerranéen | Calcaires | 980 |
| Asse (43°53'35.45"N, 6°0'48.63"E) | 617 | Méditerranéen | Calcaires | 1 900 |
| Béoux (44°36'5.53"N, 5°51'20.69"E) | 43 | Méditerranéen | Calcaires | 1 735 |
| Bès (44°8'51.97"N, 6°14'32.87"E) | 230 | Méditerranéen | Calcaires, gypses | 2 410 |
| Bouinenc (44°8'12.13"N, 6°17'2.64"E) | 40 | Méditerranéen | Calcaires, marnes | 425 |
| Drac (44°39'8.75"N, 6°11'1.90"E) | 248 | Nival | Gneiss, grès, granites | 2 020 |
| Drôme (44°40'10.79"N, 5°24'30.91"E) | 260 | Méditerranéen | Calcaires | 910 |
| Ebron (44°44'46.19"N, 5°47'7.06"E) | 9 | Méditerranéen | Calcaires | 900 |
| Eygues (44°17'12.40"N, 5°0'17.07"E) | 876 | Méditerranéen | Calcaires | 1 680 |
| Galabre (44°9'21.46"N, 6°14'14.98"E) | 34 | Méditerranéen | Calcaires, gypses | 300 |
| Séveraisse (44°48'18.50"N, 6°6'3.03"E) | 173 | Nival | Gneiss | 1 120 |
| Torrent de Saint-Pierre (44°55'3.99"N, 6°25'13.94"E) | 35 | Glacio-nival | Gneiss, granites | 1 800 |

Figure 1 – Exemple d'un lit en tresses sélectionné pour la cartographie granulométrique de surface à partir d'images drone haute-résolution : l'Arigéol dans les Alpes-de-Haute-Provence. (A) Vue aérienne oblique de la bande de tissage ; (B) Vue au sol vers l'amont des différents faciès sédimentaires de la bande active.



de surface), une dizaine de parcelles a été sélectionnée et marquée à la peinture avant le survol drone du site (figure 2A). Ces parcelles ont été systématiquement positionnées sur des surfaces planes de granulométrie homogène. Les faciès granulométriques dominants de chaque site ont été échantillonnés, dans une gamme comprise entre les graviers fins (2-4 mm de diamètre) et les petits blocs (25-50 cm de diamètre). Des parcelles de 1 m x 1 m ont été utilisées pour les faciès granulométriques de type graveleux ou caillouteux. Pour les faciès les plus grossiers (cailloux grossiers et petits blocs), des parcelles de 2 m x 2 m ont été utilisées, de façon à augmenter la taille de l'échantillon de grains pour l'extraction de la distribution granulométrique. Les parcelles ont été photographiées avec un drone DJI Mavic 2 à une hauteur de 2-3 m au-dessus du sol (figure 2B). Les distributions granulométriques des parcelles ont été extraites automatiquement à partir d'un code de traitement d'image d'usage courant en sédimentologie (*Digital Grain Size*, DGS) (Buscombe, 2013). Conformément aux recommandations de la littérature, un filtre médian⁴ a été appliqué sur les images préalablement à leur traitement dans DGS, afin d'atténuer les effets des variations de tex-

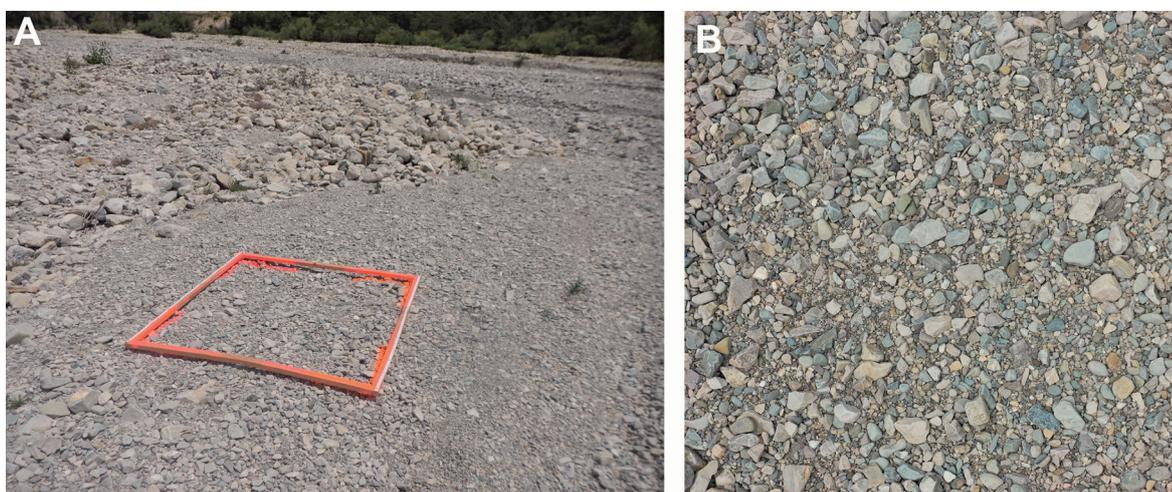
ture intra-grain (Chardon *et al.*, 2020). Une trentaine de parcelles ont été traitées en parallèle sur l'outil d'analyse d'image ImageJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>) pour l'extraction manuelle des distributions granulométriques, afin de contrôler la qualité des percentiles DGS. Cette étape de contrôle s'est révélée indispensable pour corriger un biais systématique sur les percentiles DGS, déjà observé sur d'autres jeux de données (Chardon *et al.*, 2020). Les percentiles DGS corrigés ont finalement été comparés à la rugosité altimétrique de surface des parcelles obtenue après extraction des nuages de points 3D de chaque parcelle, et mesure de la rugosité sur le logiciel de traitement de nuages de points CloudCompare (<https://www.danielgm.net/cc/>). Cette procédure est identique à celle que nous avons utilisé sur le Vénéon (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2017).

Premiers résultats

À partir des 119 placettes granulométriques collectées sur les 12 tronçons du jeu de données, il a été possible d'ajuster des régressions linéaires entre les percentiles usuels de la distribution granulométrique de surface et

4. Un filtre médian est une technique classique utilisée en prétraitement d'image pour réduire le bruit et améliorer la détection des bords des objets.

Figure 2 – Exemple de placette granulométrique utilisée pour établir une loi de calibration entre les percentiles de la distribution granulométrique de surface et la rugosité altimétrique locale. (A) Placette de 1 m x 1 m positionnée sur un banc de graviers fins ; (B) Extraction de l'image rapprochée de la placette obtenue à l'aide d'un drone DJI Mavic 2 en vol stationnaire à quelques mètres au-dessus du sol.



les percentiles équivalents calculés sur les distributions de rugosité des nuages de points SfM. La régression linéaire obtenue pour la médiane de la distribution (D_{50}) montre que la rugosité altimétrique locale est un très bon proxy de la taille médiane des grains en surface, avec un R^2 de 0,79 et une RMSE (erreur quadratique moyenne) de 8,5 mm (soit 24 % du D_{50} moyen du jeu de données, égal à 36 mm). La calibration du proxy a été obtenue pour des valeurs de D_{50} comprises entre 22 et 82 mm. Cette loi a été utilisée pour établir des cartes granulométriques distribuées sur l'ensemble des surfaces sédimentaires non végétalisées de la bande active, incluant les zones submergées. Les conditions d'eau claire lors des missions drone ont en effet permis l'extraction de points topographiques dans les chenaux en eau.

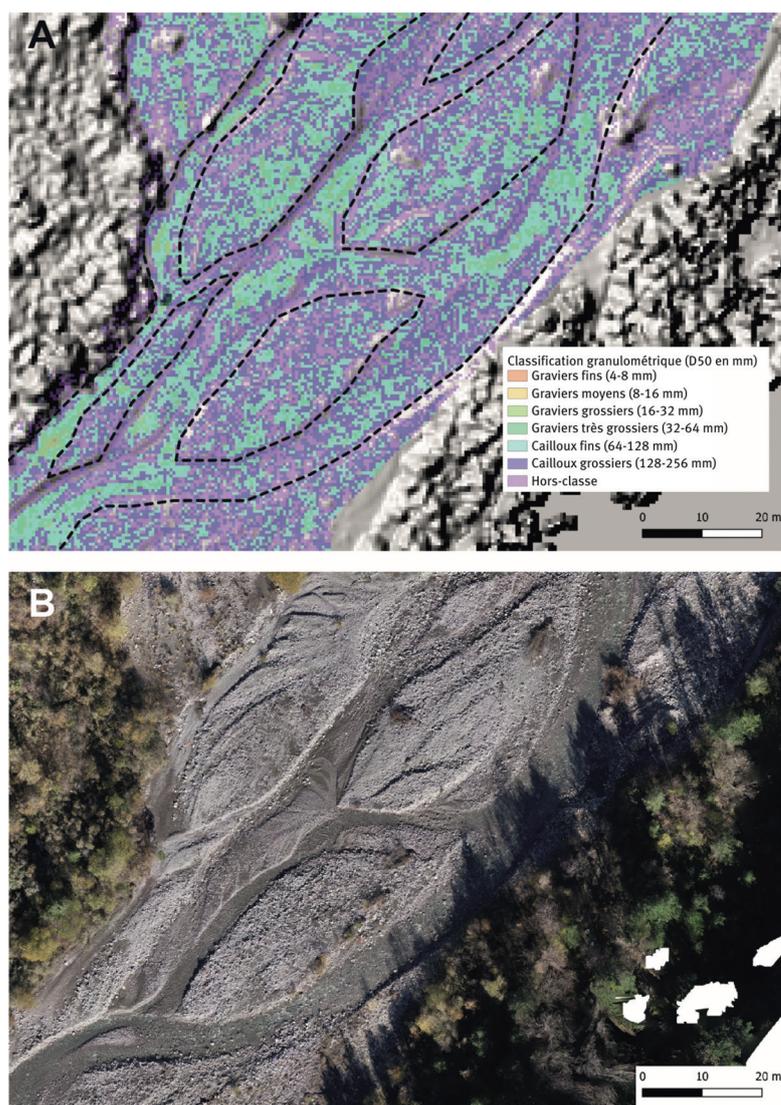
Plusieurs étapes sont nécessaires pour produire ces cartes. La première consiste à filtrer la végétation présente dans la bande active à partir d'un algorithme

5. La norme Wentworth est une échelle internationale de classes granulométriques fondée sur une progression logarithmique de base 2.

de classification automatique disponible dans Cloud-Compare. L'étape suivante consiste à calculer la rugosité altimétrique pour chaque point du nuage photogrammétrique SfM. Une rugosité moyenne est ensuite calculée selon une grille de résolution 0,5 m. Le raster (image matricielle) de rugosité est ensuite converti en raster de D_{50} à partir de la loi de calibration obtenue sur l'ensemble des sites. Les pixels sont ensuite rangés par classes granulométriques en suivant la norme Wentworth⁵ couramment utilisée en géomorphologie fluviale. Les valeurs de rugosité moyenne qui dépassent les valeurs observées sur les parcelles de calibration sont considérées comme hors-classe. Ces pixels correspondent souvent à des dépôts de bois mort ou à des talus en forte pente.

Un exemple est présenté ici sur le site de l'Arigéol (figure 3). La comparaison des textures sédimentaires visibles sur l'ortho-image SfM avec la classification granulométrique de surface montre une très bonne correspondance qualitative. La mosaïque sédimentaire du lit en tresses semble bien capturée par la rugosité de surface, y compris dans les chenaux en eau. On voit très clairement apparaître les patches de graviers qui ont tendance à recouvrir des dépôts caillouteux plus grossiers. Ces patches correspondent ici à des nappes de charriage qui se forment préférentiellement dans les chenaux, mais qui peuvent aussi recouvrir partiellement les bancs. Des alternances de patches fins et grossiers apparaissent aussi le long des chenaux, traduisant les successions de zones de surcreusement (mouilles) et de dépôt (seuils) qui se sont formées lors des dernières crues.

Figure 3 – Exemple de cartographie granulométrique de surface obtenue sur le site de l'Arigéol à partir de la rugosité altimétrique du nuage de points 3D SfM. (A) Classification granulométrique de surface projetée sur l'ombrage du modèle numérique de surface SfM avec en pointillés les limites approximatives des chenaux ; (B) Ortho-image SfM du site.



Conclusion et perspectives

Les nuages de points SfM-3D tirés de l'imagerie drone haute-résolution permettent d'obtenir une cartographie distribuée de la granulométrie des surfaces sédimentaires qui composent la bande active des lits en tresses. Les calibrations obtenues à partir d'un jeu de données, composé d'une centaine de placettes granulométriques distribuées sur une dizaine de rivières en tresses, confirment que la rugosité altimétrique locale est un très bon proxy du D_{50} de surface. Ces cartes permettent d'obtenir une image très détaillée et spatialement continue de l'hétérogénéité du substrat des lits en tresses, qui reste très difficile à obtenir à partir de relevés de terrain. Les développements méthodologiques qui sont présentés ici ouvrent des perspectives intéressantes non seulement pour le suivi des habitats aquatiques et terrestres des lits en tresses, notamment dans le cadre de projets de restauration, mais aussi pour la gestion sédimentaire de ces rivières. La détection automatique des patches de graviers présente notamment un réel intérêt en matière de cartographie des dépôts sédimentaires facilement mobilisables au sein de la bande active, et donc d'évaluation de la disponibilité sédimentaire à l'échelle du tronçon. La combinaison de cette information avec d'autres indicateurs morphométriques plus classiques est également une piste à explorer pour améliorer notre capacité à diagnostiquer les trajectoires d'évolution morphologique de ces rivières, qui sont pour la plupart proches du point de basculement vers un style morphologique dégradé, à chenal unique (Terrier *et al.*, 2019).

RÉFÉRENCES

Baudoin J. M., Boutet-berry L., Cagnant M., Gob F., Kreutzenberger K., Lamand F., Malavoi J. R., Marmonier P., Pénil C., Rivière C., Sadot M., Tamisier V., Tual M., 2017. Carhyce – Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau, protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied. Agence Française pour la Biodiversité, Collection Guides et Protocoles, 52 p.

Buscombe D., 2013. Transferable wavelet method for grain-size distribution from images of sediment surfaces and thin sections, and other natural granular patterns. *Sedimentology*, 60(7), 1709-1732, <https://doi.org/10.1111/sed.12049>.

Chardon V., Schmitt L., Piégay H., Lague D., 2020. Use of terrestrial photosieving and airborne topographic LiDAR to assess bed grain size in large rivers: a study on the Rhine River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(10), 2314-2330, <https://doi.org/10.1002/esp.4882>.

Heritage G. L., Milan D. J., 2009. Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 113 (1-2), 4-11, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.021>.

Terrier B., Piégay H., Liébault F., Dufour S., Belletti B., Le Lay Y. F., Marmonier P., Comby E., Tacon S., Boca F., Faton J. M., Gourhand A., Marteau B., Rappé B., Wawrzyniak V., 2019. Les rivières en tresses, éléments de connaissance. Collection Eau et Connaissance, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 116 p, https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2019-09/guide_riviere_en_tresses_v27_complet.pdf.

Vázquez-Tarrío D., Borgniet L., Liébault F., Recking A., 2017. Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). *Geomorphology*, 285, 94-105, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.039>.

Westoby M., Brasington J., Glasser N., Hambrey M., Reynolds J., 2012. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

Woodget A. S., Austrums R., 2017. Subaerial gravel size measurement using topographic data derived from a UAV-SfM approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(9), 1434-1443. <https://doi.org/10.1002/esp.4139>.