



HAL
open science

Imagerie haute résolution pour l'hydromorphologie des rivières alpines

Loïs Ribet, Frédéric Liébault, Michaël Deschâtres, Laurent Borgniet

► To cite this version:

Loïs Ribet, Frédéric Liébault, Michaël Deschâtres, Laurent Borgniet. Imagerie haute résolution pour l'hydromorphologie des rivières alpines. Inrae; OFB. 2023. hal-04685823

HAL Id: hal-04685823

<https://hal.inrae.fr/hal-04685823v1>

Submitted on 3 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

CONVENTION DE SUBVENTION
Programme 2019-2021 - Thème Fonctionnement des écosystèmes - Action n° 10

Imagerie haute résolution pour l'hydromorphologie des rivières alpines

Rapport final

**Loïs Ribet (INRAE), Frédéric Liébault (INRAE), Michaël
Deschâtres (INRAE), Laurent Borgniet (INRAE)**

Juin 2023

- **AUTEURS**

Loïs RIBET (INRAE), lois.ribet@inrae.fr

Frédéric LIEBAULT (INRAE), frederic.liebault@inrae.fr

Michaël DESCHATRES (INRAE), michael.deschatres@inrae.fr

Laurent BORGNIET (INRAE), laurent.borgniet@inrae.fr

- **CORRESPONDANT**

OFB : Gabriel MELUN (OFB), gabriel.melun@ofb.gouv.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : régional

Couverture géographique : bassin du Rhône (rivières alpines)

Niveau de lecture : professionnels, experts

- **RESUME**

Le projet IMACODE vise à exploiter le potentiel de l'imagerie haute-résolution pour la caractérisation et l'analyse des signatures morpho-sédimentaires des rivières en tresses et les apports envisageables de la photogrammétrie SfM aux protocoles de terrain existants (ex. CarHyCE). La déclinaison de ces protocoles dans certains contextes (têtes de bassins versants, très grands cours d'eau, etc.) et certains styles fluviaux (cours d'eau en tresses) est difficile. Il est ainsi apparu utile d'engager des travaux de recherche destinés à l'extraction des métriques morpho-sédimentaires fondamentales de ces milieux à partir de l'imagerie drone.

Ce document présente les résultats obtenus en matière de cartographie distribuée de la granulométrie de surface des lits en tresses. L'approche est fondée sur l'utilisation de la rugosité altimétrique de surface extraite à partir des nuages de points 3D issus de la photogrammétrie SfM. Une courbe de calibration globale obtenue à partir de 129 placettes réparties sur 12 tronçons tressés du SE de la France montre une erreur de prédiction du D_{50} (médiane de la distribution granulométrique) de 5 mm. Cette courbe a été utilisée pour produire des cartes granulométriques continues des bandes actives des 12 sites d'étude. L'analyse de ces cartes a permis d'une part d'extraire des granulométries composites, et d'autre part d'analyser l'hétérogénéité granulométrique locale en fonction de plusieurs gradients géomorphologiques.

- **MOTS CLES : PHOTOGRAMMETRIE, STRUCTURE FROM MOTION, RIVIERES EN TRESSSES, ALPES, HYDROMORPHOLOGIE, GRANULOMETRIE DE SURFACE**

- **HIGH RESOLUTION IMAGERY FOR THE HYDROMORPHOLOGY OF ALPINE RIVERS**
- **ABSTRACT**

The IMACODE project aims to exploit the potential of high-resolution imagery for the characterization and analysis of morpho-sedimentary signatures of braided rivers and the possible contributions of SfM photogrammetry to field protocols (like CarHyCE protocol). As this protocol is not well suited to the braided fluvial style, it appeared useful to initiate methodological research aimed at extracting the fundamental morpho-sedimentary metrics of these environments from drone imagery.

This document presents the results obtained in terms of distributed mapping of the surface grain size of braided channels. The approach is based on the use of surface altimetric roughness extracted from 3D point clouds from SfM photogrammetry. A global calibration curve obtained from 129 plots distributed over 12 braided sections in SE France shows a D_{50} prediction error (median of the particle size distribution) of 5 mm. This curve was used to produce continuous grain size maps of the active channels of the 12 study sites. The analysis of these maps made it possible not only to extract composite grain size distributions, but also to analyze the local grain size heterogeneity according to several geomorphological gradients.

- **KEY WORDS : PHOTOGRAMMETRY, STRUCTURE FROM MOTION, BRAIDED RIVERS, ALPS, HYDROMORPHOLOGY, SURFICIAL GRAIN SIZE**

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE**

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 (Lévêque, 2016). 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 (Bluck 1979 ; Ashmore 1982 ; Ashmore 2013 ; Gardner et al. 2018). 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 peut conduire à un basculement rapide vers un style morphologique dégradé de lit incisé à chenal unique (Terrier et al., 2019). 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 hyporhéiques).

Dans le cadre du protocole CarHyCE de l'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'observations 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.

Les travaux réalisés dans le cadre du projet IMACODE visent à améliorer la méthode d'échantillonnage granulométrique en proposant une caractérisation de la granulométrie des rivières en tresses alpines par l'exploitation d'images drone haute-résolution via des outils de restitution photogrammétrique. Le développement de ces technologies offre aujourd'hui la possibilité d'obtenir l'état de surface des lits fluviaux à de fines résolutions pour des temps d'acquisition relativement faibles. L'objectif est de fournir une méthodologie reproductible d'extraction de la granulométrie de surface des rivières en tresses sur des linéaires de plusieurs kilomètres. La rugosité altimétrique est utilisée comme proxy de la granulométrie de surface. Cette métrique a déjà été testée dans la littérature (Vázquez-Tarrio et al., 2017; Woodget, 2015; Woodget & Austrums, 2017) ; elle est définie comme la distance entre un point donné et le meilleur plan d'ajustement calculé sur ses proches voisins situés dans un rayon spécifié d'une sphère (CloudCompare, 2021).

Pour obtenir une courbe de calibration granulométrique fiable, nous avons sélectionné 12 rivières présentant des caractéristiques hydrologiques, lithologiques et des régimes sédimentaires contrastés. La méthode est fondée sur l'utilisation d'un drone équipé d'une caméra haute-résolution et d'un GPS embarqué en liaison avec une base GPS au sol pour la correction en cinématique temps réel (RTK) du positionnement. Sur chaque rivière, les vols drone ont été réalisés sur un tronçon de longueur équivalente à 15 fois la largeur du lit actif, 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. Pour obtenir des images de résolution centimétrique, les photos ont été prises à une altitude relative de 70 m avec un chevauchement latéral de 60 % et longitudinal de 80 %. Sur chaque tronçon, des points de contrôle ont été marqués au sol et positionnés sur des sections transversales espacées d'un intervalle égal à la largeur moyenne de la bande active. Le traitement photogrammétrique des clichés a permis d'obtenir des ortho-mosaïques de résolution très fine (~1.45 cm/pxl) pour des emprises spatiales importantes (jusqu'à plus de 2000 m de

linéaire et des largeurs de bande active allant de 20 à 200 m). Le protocole d'acquisition nécessite la présence de deux opérateurs pour des durées allant de la demi-journée, à deux jours selon la superficie du site. L'obtention de la granulométrie des chenaux en eaux est optimale lorsque les chenaux connaissent un étiage sévère.

La loi de calibration granulométrique a été établie à partir de 129 placettes granulométriques distribuées sur les 12 sites d'étude. Ces parcelles ont été systématiquement positionnées sur des surfaces planes de granulométrie homogène et marquées à la peinture avant le survol drone. Les faciès granulométriques dominants de chaque site ont été échantillonnés dans une gamme comprise entre les graviers fins (8-16 mm) et les petits blocs (25-50 cm). Les parcelles ont ensuite été photographiées pour en extraire automatiquement leur distribution granulométrique sur Digital Grain Size (DGS) (Buscombe, 2013). La qualité des percentiles DGS est contrôlée par l'extraction manuelle des distributions granulométriques de 44 placettes via l'outil d'analyse d'image ImageJ. Ainsi corrigés, les percentiles DGS des placettes ont été comparés à leur rugosité altimétrique. La meilleure relation obtenue montre que la rugosité altimétrique moyennée ($\overline{R_h}$) est un très bon proxy de la granulométrie médiane (D_{50}), avec un R^2 de 0.83 (Figure 1). L'erreur de prédiction du D_{50} obtenue à partir d'une procédure de type Jackknife est de 4.97 mm.

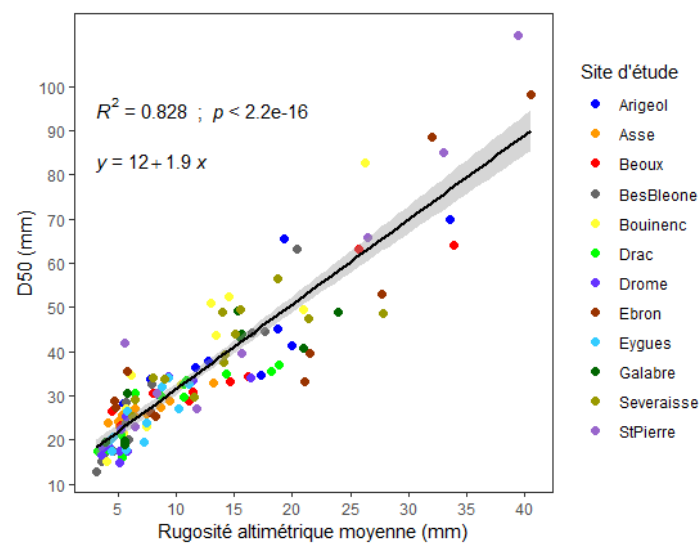


Figure 1 : Courbe de calibration granulométrique obtenue à partir de la rugosité altimétrique moyenne

La calibration granulométrique est ensuite appliquée sur un raster de rugosité altimétrique de résolution égale à 1 m afin d'obtenir une cartographie continue de la granulométrie de surface de la bande active. Les différentes étapes de traitement des données et les différents outils utilisés sont présentés de manière synthétique en annexe. Tout d'abord, un nuage de points 3D de haute densité (~1000 points/m²) est produit à partir du programme Agisoft Metashape de photogrammétrie Structure from Motion (SfM). A partir de ce nuage de points 3D, un Modèle Numérique de Surface (MNS) et des ortho-mosaïques sont également produits. Plusieurs étapes de post-traitement ont été nécessaires afin de filtrer puis supprimer les surfaces impropres à l'extraction granulométrique de surface (*i.e.* végétation, rupture de pente importante). Deux filtres de végétation ont été utilisés : le premier est disponible sur Agisoft Metashape et le second est un script R se basant sur l'indice d'*Excessive Greenness* (ExG) (Woebbecke et al., 1995; Núñez-Andrés et al., 2021) à l'aide du package *lidR* (<https://github.com/r-lidar/lidR>) ; le dernier filtre est un script R utilisant les packages *terra* (<https://github.com/rspatial/terra>) et *lidR* pour supprimer talus et marges de bancs. Le nuage de points 3D filtrés est ensuite importé sur CloudCompare afin de calculer la rugosité altimétrique en chaque point et d'exporter le résultat sous la forme d'un raster dont la rugosité est moyennée sur 1 m². Le modèle granulométrique est ensuite appliqué sur chaque pixel du raster sur QGIS afin de produire une carte granulométrique (Figure 2).

D'un point de vue qualitatif, les cartes continues de granulométrie de surface montrent une bonne correspondance avec les mosaïques sédimentaires visibles sur les ortho-mosaïques de haute résolution produite à partir des images drone, y compris dans les chenaux en eau lorsque les conditions de prises de vue ont été favorables (faible profondeur d'eau, absence de turbidité et de turbulences en surface, pas de développement algal). L'analyse exploratoire des mosaïques sédimentaires en fonction des altitudes relatives de la bande active montre des signatures contrastées entre les sites, qui

traduisent sans doute un gradient d'activité morphologique du tressage, mais ceci reste à confirmer sur l'ensemble des sites. On montre d'autre part que ces cartes peuvent être facilement exploitées pour extraire les alternances granulométriques longitudinales le long du chenal principal. Ceci ouvre notamment la voie vers une analyse plus approfondie des dynamiques sédimentaires à l'origine de ces séquences longitudinales.

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).

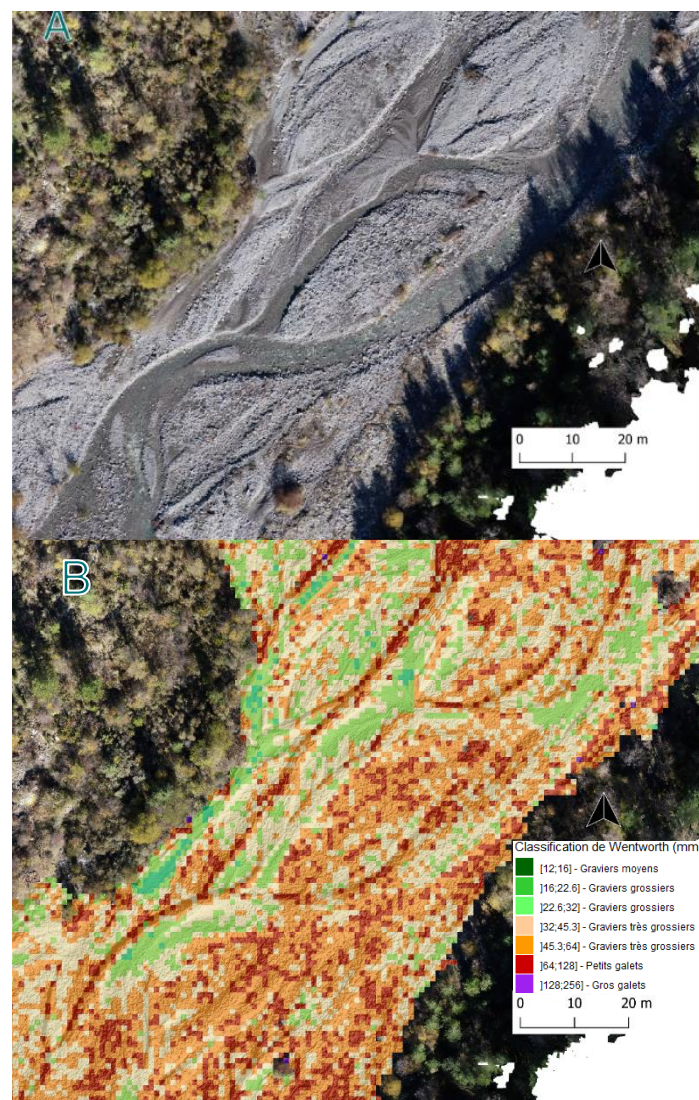


Figure 2 : Section de l'Arigéol illustrant le potentiel de caractérisation de la granulométrie de surface par cartographie. (A) Ortho-mosaïque SfM (1.48 cm/pxl) ; (B) Caractérisation de la granulométrie de surface selon la classification de Wentworth projetée sur un MNT d'ombrage pour faciliter la lecture des macroformes de la tresse. © Loïs Ribet

• **SOMMAIRE**

1. Introduction	9
2. Sites d'étude	10
3. Protocole méthodologique	12
3.1. Granulométrie digitale des placettes de calibration	12
3.1.1. Placettes de calibration	12
3.1.2. Granulométrie digitale DGS	13
3.1.3. Correction des percentiles DGS	13
3.2. Proxy granulométrique SfM	13
3.2.1. Acquisitions de l'imagerie drone	14
3.2.2. Photogrammétrie SfM pour extraction du proxy granulométrique de surface	14
3.2.3. Validation du proxy granulométrique de surface	16
3.2.4. Cartographie distribuée de la granulométrie de surface	17
4. Résultats	19
4.1. Granulométrie digitale DGS	19
4.2. Courbe de calibration granulométrique	21
4.2.1. Modèles granulométriques	21
4.2.2. Transposabilité du modèle granulométrique global	22
4.3. Cartographie de la granulométrie distribuée	23
4.3.1. Granulométries composites des bandes de tressage	23
4.3.2. Hétérogénéité spatiale de la granulométrie de surface	25
5. Conclusion et perspectives	28
6. Glossaire	29
7. Sigles & Abréviations	30
8. Bibliographie	31
9. Table des illustrations	33

1. 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 (Lévêque, 2016). 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 (Bluck, 1979 ; Ashmore, 1982; Ashmore, 2013 ; Gardner et al., 2018). 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 (Terrier et al., 2019). 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 hyporhéiques).

Dans le cadre du protocole CarHyCE de l'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'observations 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. Dans le cadre du projet IMACODE, 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. Ce rapport présente les grandes lignes du protocole, les résultats obtenus, ainsi que les perspectives offertes par ces premiers résultats.

2. Sites d'étude

Les sites d'étude sont composés de 12 tronçons de rivières en tresses bien préservés situés dans les Alpes et Préalpes du Sud de la France (Figure 1A ; Tableau 1 ; Figure 2). Les emprises spatiales des 12 tronçons d'étude sont disponibles en annexe (Annexe 3 à Annexe 14). Les surfaces drainées varient de 9 à 876 km² et les largeurs de bande active sont comprises entre 20 et 200 m. Les tronçons sélectionnés présentent des caractéristiques morphologiques et sédimentaires typiques des tresses alpines, avec des chenaux multiples séparant des bancs de graviers non végétalisés de taille, de forme et de texture variables (Figure 2A et B). Les bandes actives sont composées principalement de graviers et de galets, avec des patchs ponctuels de sédiments fins (sables et limons) (Figure 2C). Des concentrations locales de petits blocs sont également présentes sur les sites proximaux (surfaces drainées inférieures à ~100 km² ; Figure 2D). La plupart des sites appartiennent au domaine sédimentaire subalpin, les roches calcaires constituant la lithologie dominante du lit. Seuls deux sites drainent le domaine cristallin des Alpes internes, dans le Massif des Ecrins (Séveraisse, Torrent de Saint-Pierre). Les matériaux du lit sont ici principalement des granites et des gneiss. Le Drac est un site hybride caractérisé par des conditions lithologiques plus contrastées, avec 80% du bassin versant dans les roches sédimentaires (principalement des grès), et 20% dans le domaine cristallin (essentiellement granite et gneiss).

Ces sites d'étude permettent d'explorer plusieurs gradients qui influencent potentiellement la granulométrie de surface de la bande de tressage. Le gradient de surface drainée permet d'explorer le continuum amont-aval, qui se traduit par un affinement granulométrique sous l'effet du tri sélectif et de l'abrasion des particules sédimentaires. Le gradient climatique contrôle le régime hydrologique, avec des régimes de fonte pour les bassins versants d'altitude des Alpes internes (Drac, Séveraisse, Torrent de Saint-Pierre), et des régimes méditerranéens pour les bassins versants de basse altitude situés dans les Préalpes du Sud (Arigéol, Asse, Béoux, Bès, Bouinenc, Drôme, Ebron, Eygues, Galabre). Les régimes méditerranéens sont connus pour produire des crues extrêmes, et on peut s'attendre à une variabilité hydrologique plus marquée que pour les régimes de fonte ; cela devrait se traduire par une hétérogénéité granulométrique plus importante. Le gradient lié au régime sédimentaire est évalué à partir de la largeur de bande active normalisée ($W^* = W / A_d^{0.44}$, avec W la largeur de bande active en m, et A_d la surface drainée en km²). Cette métrique est considérée comme un bon indicateur de la recharge sédimentaire effective d'une tresse dans la mesure où elle permet de s'affranchir de l'effet de taille du bassin versant et de la largeur (Piégay et al., 2009; Liébault et al., 2013). Les sites d'étude peuvent être classés en fonction de leur position dans le diagramme de dispersion largeur active-surface drainée établi pour les rivières en tresses du SE de la France ; les résidus positifs indiquant des régimes limités en capacité de transport, et les résidus négatifs des régimes limités en fourniture sédimentaire (Figure 1B). Ce gradient de régime sédimentaire peut potentiellement influencer la granulométrie de surface sous l'effet du tri granulométrique vertical (mise en place progressive d'un pavage dans les chenaux d'étiage).

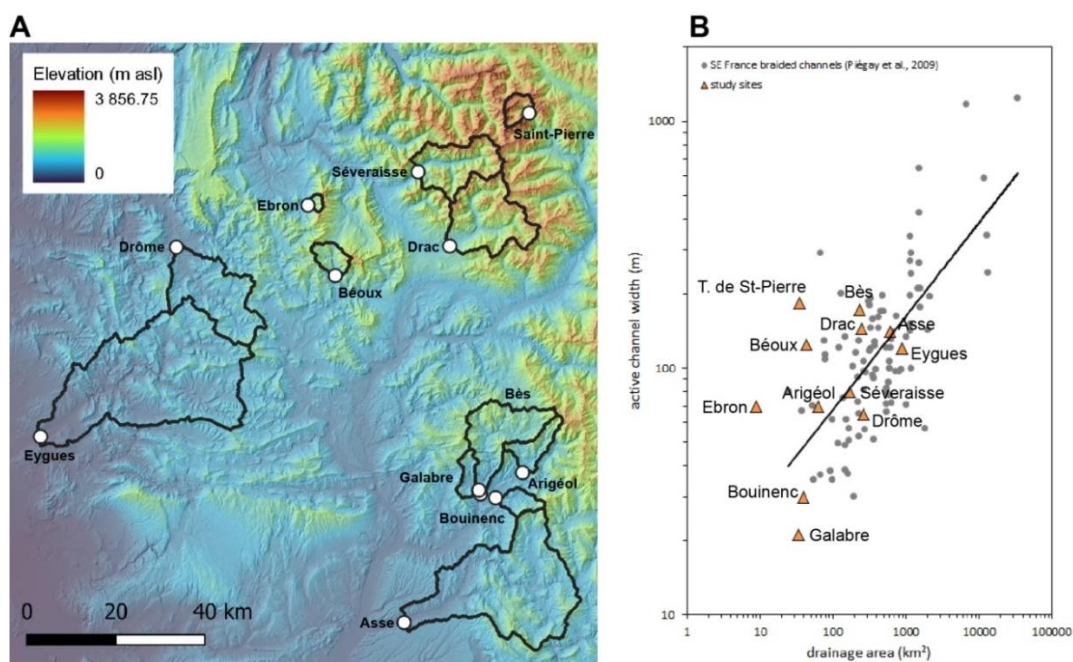


Figure 1 : (A) Carte générale des sites d'étude, avec les limites des bassins versants en noir ; (B) classement des sites d'étude par rapport à la relation régionale entre la largeur de la bande active et la surface drainée pour les rivières en tresses du SE de la France (d'après Piégay et al. 2009).

© Frédéric Liébault

Tableau 1 : Principales caractéristiques physiques des 12 sites d'étude ; W^* : largeur de bande active normalisée ; *Régimes hydrologiques méditerranéens ; ** régimes hydrologiques de fonte nivale ; *** régimes hydrologiques nivo-glaciaires

Sites d'étude	Surface drainée (km ²)	Altitudes / moyenne-min-max (m)	Lithologies dominantes des alluvions du lit	Largeur de bande active (m)	W^*	Pente du lit (m/m)	Longueur du tronçon (m)
Arigéol*	63	1386-841-2796	calcaires	70	11.3	0.020	980
Asse*	617	1016-396-2281	calcaires	140	8.3	0.010	1900
Béoux*	43	1604-1012-2676	calcaires	124	23.7	0.037	1735
Bès*	230	1347-656-2736	calcaires, gypses	172	15.7	0.010	2410
Bouinenc*	40	1134-682-2265	calcaires, marnes	30	5.9	0.010	425
Drac**	248	2030-1070-3415	gneiss, grès, granites	144	12.7	0.010	2020
Drôme*	260	961-475-1754	calcaires	65	5.6	0.010	910
Ebron*	9	1618-1013-2592	calcaires	70	26.6	0.080	900
Eygues*	876	742-171-1750	calcaires	120	6.1	0.005	1680
Galabre*	34	1139-672-1848	calcaires, gypses	21	4.5	0.020	300
Séveraisse**	173	2095-938-3634	gneiss	80	8.3	0.020	1120
Saint-Pierre***	35	2888-1849-4068	gneiss, granites	183	38.3	0.040	1800



Figure 2 : Photos illustrant les structures morphologiques et sédimentaires typiques des sites d'étude : vues aériennes (drone) des lits en tresses de l'Arigéol (A) et de l'Asse (B) ; hétérogénéités granulométriques de surface des lits en tresses du Bès (C) et de la Béoux (D) ; vues vers l'amont.

© Michaël Deschâtres (A et B)

© Frédéric Liébault (C et D)

Un tronçon de mesure a été sélectionné pour chaque site, avec une longueur approximativement égale à 15 fois la largeur de bande active moyenne. Ces tronçons doivent être considérés comme peu impactés par des pressions locales (rectifications, endiguements, barrages, extractions). Il s'agit de tronçons de style tressé ou divaguant peu ou pas confinés latéralement, dont les marges sont principalement occupées par une forêt alluviale bien préservée. Les campagnes de terrain ont eu lieu dans des conditions d'étiage : en automne pour les régimes de fonte, et à la fin du printemps et en été pour les régimes méditerranéens.

3. Protocole méthodologique

La méthode repose sur l'utilisation d'un proxy granulométrique extrait des nuages de points 3D de très haute densité pour établir une courbe de calibration. La granulométrie a été obtenue par traitement numérique de photos de placettes granulométriques réparties sur les douze sites d'étude. Plusieurs percentiles ont été extraits à partir de DGS, un programme de traitement d'image couramment utilisé en sédimentologie. Ces percentiles DGS ont ensuite été étalonné grâce à des mesures manuelles réalisées sur un échantillon de placettes. Le proxy a été calculé sur les nuages de points de haute densité obtenus par photogrammétrie SfM sur les placettes granulométriques. Une fois établi, le modèle granulométrique peut ensuite être exploité sous SIG pour cartographier la granulométrie de surface.

3.1. Granulométrie digitale des placettes de calibration

La calibration du proxy granulométrique dérivé des nuages de points 3D a été obtenue à partir du traitement par granulométrie digitale d'images collectées sur le terrain avec un drone volant à une altitude relative entre 2 et 3 m. Les procédures d'échantillonnage sur le terrain et de traitement de cet ensemble de données d'étalonnage sont présentées ici.

3.1.1. Placettes de calibration

Pour chacun des 12 tronçons d'étude, les faciès granulométriques dominants de la bande de tressage ont été identifiés et échantillonnés sur le terrain à l'aide de placettes carrées de 2 tailles différentes (Figure 3). Un faciès granulométrique est défini ici comme une portion de lit avec une granulométrie de surface homogène couvrant une surface $> 1 \text{ m}^2$. Des placettes d'un mètre carré ($100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$) ont été utilisées pour les faciès graveleux et caillouteux (Figure 3A), tandis que des placettes de 4 m^2 ($200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$) ont été utilisées pour les faciès plus grossiers, de façon à augmenter le nombre de grains visibles sur l'image (Figure 3B). Une dizaine de placettes a été échantillonnée par site, avec un total de 129 placettes pour les 12 sites. Les contours de chaque placette d'échantillonnage ont été marqués à la bombe de peinture afin de permettre leur détection et leur extraction sur les ortho-mosaïques produites par photogrammétrie SfM. Un cadre en bois a été utilisé pour marquer les placettes et une règle a été placée le long du cadre pour obtenir l'échelle des images. Avant de prendre les photos, la surface de chaque placette a été soigneusement nettoyée en enlevant la végétation (plantes herbacées et semis) et les petits débris ligneux. Les placettes ont été systématiquement positionnées sur des surfaces planes et homogènes, afin d'éviter les artefacts liés au relief local et aux mélanges de sédiments mal triés.

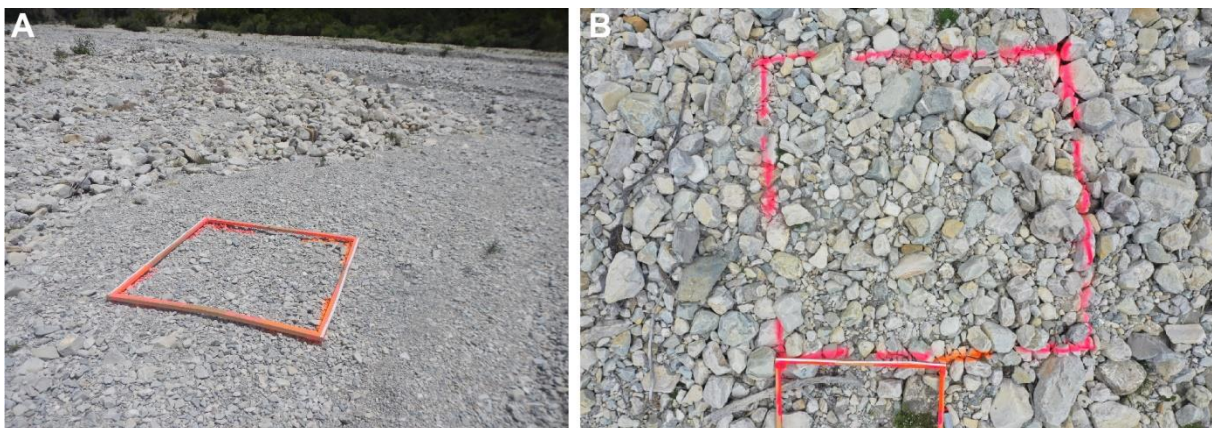


Figure 3 : Exemples de placettes utilisées pour l'étalonnage sur le terrain du proxy granulométrique dérivé des nuages de points 3D : (A) parcelle de 1 m^2 utilisée pour échantillonner un faciès dominé par des graviers, site de la Béoux ; (B) Parcelle de 4 m^2 utilisée pour l'échantillonnage d'un faciès plus grossier, site de la Béoux ; le cadre en bois utilisé pour marquer les placettes, et la règle utilisée pour la mise à l'échelle des images sont visibles sur chaque photo.

© Frédéric Liébault

Les placettes ont été photographiées individuellement par un drone DJI Mavic 2 à une hauteur de 2 à 3 m au-dessus du sol. Les images obtenues ont une résolution spatiale comprise entre 0.22 et 2 mm. Les tailles de grains inférieures à la résolution spatiale ne sont pas reconnaissables sur les images, et les distributions granulométriques obtenues à partir du traitement des images rapprochées doivent être considérées comme tronquées à $\sim 2 \text{ mm}$, ce qui correspond à la limite de taille supérieure des sables très grossiers.

3.1.2. Granulométrie digitale DGS

Les photos des placettes ont été traitées avec le code DGS développé par Buscombe (2013). Il fournit automatiquement une estimation de la distribution granulométrique statistique à partir d'une image. La distribution granulométrique apparente dans l'image est estimée en dérivant la fonction puissance de la densité spectrale globale à l'aide d'une ondelette de type Morlet. Cette approche permet de quantifier simultanément des informations spatiales et spectrales en décomposant l'image par la variance en fonction de la fréquence. Elle est rapide et sans phase de calibration, donc théoriquement généralisable à toutes les images de grains. Le traitement DGS des images fournit une fréquence par nombre des grains en fonction de leur diamètre ainsi que les percentiles. Une erreur quadratique moyenne normalisée ($nRMSE = RMSE/D_x$, avec D_x le percentile de rang x) pour le D_{50} inférieure à 20 % est généralement obtenue lorsque la taille de l'échantillon est d'au moins 250 grains par image (Buscombe, 2013).

Chardon et al. (2020) ont testé les performances de DGS sur les bancs de graviers du Rhin. Suivant leurs recommandations, les images ont été corrigées par un filtre médian dont le rayon est 5% plus grand que celui des plus grandes particules. Cette correction atténue les erreurs liées aux variations pétrographiques intra-grain, et permet de réduire la $nRMSE$ du D_{50} de 72% à 29%. Cette amélioration a été confirmée par nos données, et seules les résultats des images filtrées sont présentés ici. L'étude de Chardon et al. (2020) a également montré que les conditions d'éclairage et la zone d'échantillonnage ont un effet sur les performances de DGS. Il a donc été nécessaire de produire un ensemble de données d'étalonnage pour contrôler et étalonner les distributions granulométriques dérivées de DGS.

3.1.3. Correction des percentiles DGS

Quarante-quatre placettes ont été sélectionnées pour tester la qualité des distributions granulométriques issus de DGS (10 du Galabre, 11 de l'Arigéol, 3 du Torrent de Saint-Pierre, 9 de l'Ebron et 11 de l'Eygues). Les distributions granulométriques de correction ont été extraites par digitalisation manuelle des axes a et b des grains via le logiciel de traitement d'images open-source ImageJ (<https://imagej.nih.gov/ij>). Au moins 100 grains ont été mesurés sur chaque image. Ces mesures granulométriques manuelles ont été utilisées pour vérifier et calibrer les résultats automatiques produits par DGS. Les distributions granulométriques d'ImageJ peuvent être considérées comme très proches d'une mesure de terrain, même si l'inclinaison des grains par rapport au plan de la photo et les effets de masquage peuvent être à l'origine d'une sous-estimation de leur diamètre réel (la *fabric error* de Graham et al., 2005). Cependant, plusieurs études ont démontré que cette erreur systématique est faible pour les échantillonnages par grille. Elle est typiquement comprise entre 0.05 et 0.45 Ψ ($\Psi = \log 2D$, avec D le diamètre du grain en mm) (Dugdale et al., 2010 ; Graham et al., 2005). Étant donné que les patches de sédiments des sites sont composés de grains non-cohésifs, sans effet important d'imbrication ou de compactage, nous avons supposé que le biais systématique des vrais percentiles est faible (probablement inférieur à 0.45 Ψ).

L'étalonnage des percentiles granulométriques DGS a été obtenu par analyse de régression avec les percentiles extraits manuellement via ImageJ. L'erreur quadratique moyenne ($RMSE$), l'erreur absolue moyenne (MAE) et l'erreur aléatoire irréductible (e) des percentiles DGS (pour les valeurs brutes et calibrées) ont été calculées respectivement comme :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{xpi} - D_{xoi})^2}{n}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_{xpi} - D_{xoi}| \quad (2)$$

$$e = \sqrt{RMSE^2 - MAE^2} \quad (3)$$

avec D_{xpi} le percentile DGS de rang x , D_{xoi} le percentile extrait manuellement sur ImageJ de rang x , et n le nombre de placettes granulométriques utilisées pour la calibration. Ces métriques ont été normalisées par les percentiles granulométriques afin d'obtenir des éléments de comparaison avec les études antérieures (e.g. Chardon et al., 2020).

3.2. Proxy granulométrique SfM

Une fois corrigée, la granulométrie des placettes est ensuite comparée à son proxy, la rugosité altimétrique, via une analyse par régression afin d'établir une courbe de calibration. L'exploitation des images drone nécessite l'utilisation de plusieurs outils : Agisoft Metashape pour construire les nuages de points 3D sur lesquels le proxy granulométrique est ensuite mesuré sur CloudCompare. Le protocole mis en place est présenté ici ainsi que sa méthode de validation.

3.2.1. Acquisitions de l'imagerie drone

L'acquisition des images drone a été réalisée à partir d'un protocole méthodologique identique pour les 12 sites d'étude. Les photos ont été prises avec un drone DJI Phantom4 RTK. Ce drone est équipé pour le géoréférencement direct des images. Il est connecté pendant son vol à une station mobile D-RTK permettant d'obtenir un positionnement des images avec une précision d'1 cm en x-y et d'1.5 cm en z (l'erreur augmente d'1 mm pour chaque kilomètre de distance avec la station). La caméra embarquée possède une focale de 8 mm et une résolution de 20 Mpxl. Le paramétrage des vols avec l'application DJI Ground Station RTK a été réalisé avec une altitude relative de 70 m, des prises de vue nadir, un chevauchement latéral à 60 % et longitudinal à 80%. Ce paramétrage permet d'obtenir des images dont la résolution spatiale est d'environ 2-3 cm.

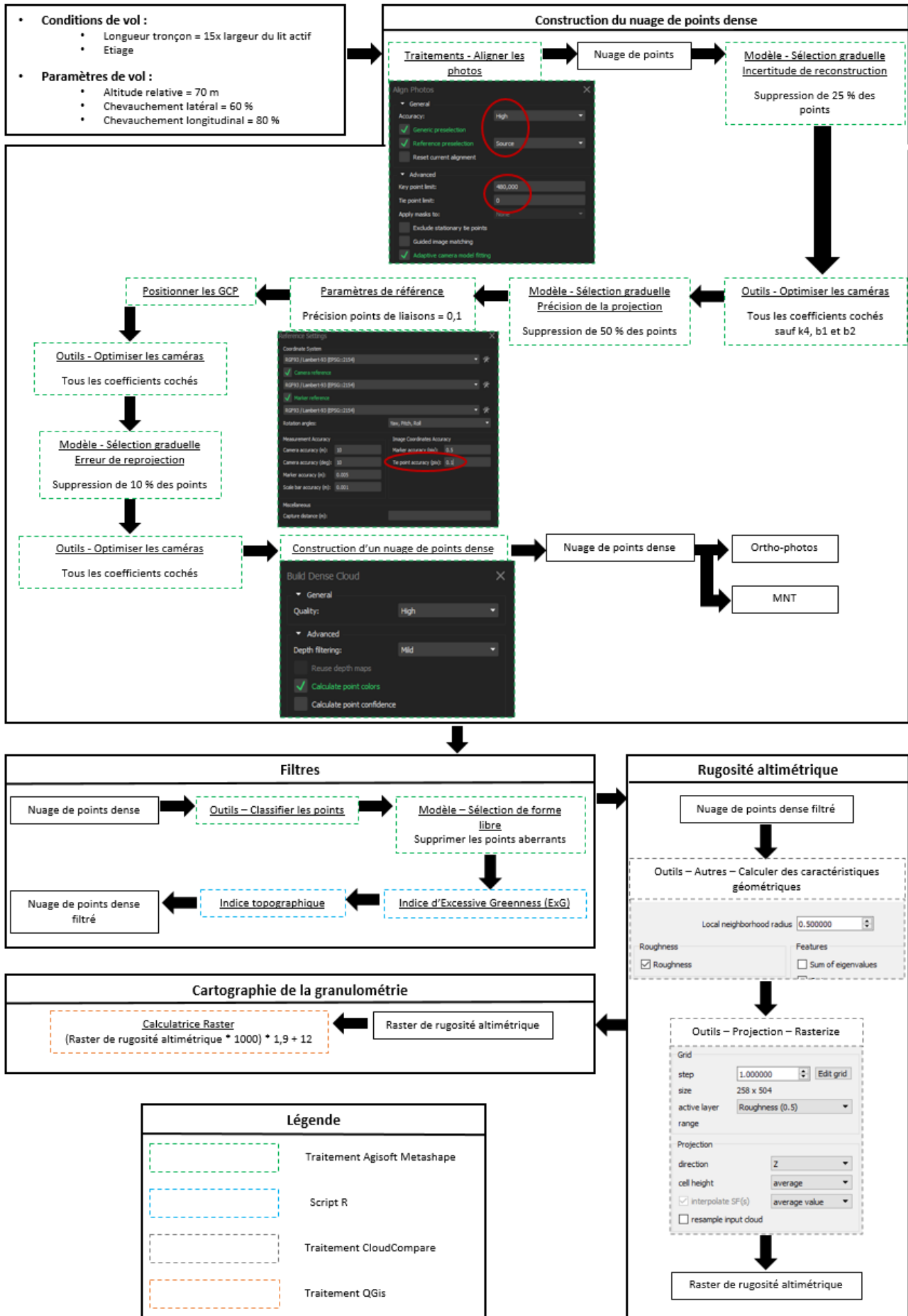
Bien que le géoréférencement direct permette en théorie de s'affranchir de mesures au sol, des points de contrôle au sol (GCP pour *Ground Control Points*) ont été marqués avec une bombe de peinture afin d'être en mesure d'améliorer si besoin la précision du positionnement des produits photogrammétriques. Ces points ont été répartis de manière homogène sur le tronçon étudié, la méthode adoptée a été de les positionner sur des sections transversales espacées d'un intervalle égal à la largeur moyenne de la bande active. Leurs coordonnées ont été mesurées au GPS différentiel, soit avec un Leica Zeno 20, soit avec un dispositif combinant un Leica GS200 et un rover Leica GS10. Le Leica Zeno 20 assure un positionnement GNSS RTK corrigé et bénéficie de la couverture des réseaux satellites GPS, Glonass et Galileo. La précision donnée par le fabricant est inférieure à 5 cm + 1 ppm en x-y et inférieure à 2 cm + 1 ppm en z (Leica Geosystem, 2015). Le GPS Leica GS10 assure quant à lui un positionnement avec une RMSE de 8 mm + 1 ppm en x-y et 15 mm + 1 ppm en z en mode cinématique et 3 mm + 0.5 ppm en x-y et 5 mm + 0.5 ppm en z en mode statique.

3.2.2. Photogrammétrie SfM pour extraction du proxy granulométrique de surface

Le programme Agisoft Metashape (version 1.7.3) a été utilisé pour le traitement photogrammétrique SfM des images drone. Ce traitement comprend (i) l'alignement des images et la création d'un nuage de points peu dense, (ii) le filtrage des points de moins bonne qualité avant la densification du nuage de points 3D, et (iii) la production d'un Modèles Numérique de Surface (MNS) et d'une ortho-mosaïque. Le protocole détaillé est disponible sur la [Figure 4](#). Il a été défini de manière à optimiser la qualité des restitutions photogrammétriques et les temps de traitement qui dépendent aussi de la puissance informatique qui a pu être mobilisée pour ce projet. Le protocole intègre également les recommandations disponibles dans le manuel d'utilisation du programme SfM (Metashape, 2023) et dans la littérature spécialisée aux applications topographiques de la SfM (Eltner et al., 2016; James et al., 2020; Over et al., 2021).

Pour évaluer la qualité des modèles 3D, plusieurs métriques d'erreur de positionnement de la caméra pour la coordonnée z ont été calculées (erreur moyenne, erreur absolue moyenne et écart type des erreurs). Elles correspondent à l'erreur de localisation de la caméra produite par Agisoft Metashape lors de la reconstruction du modèle 3D et de la densification du nuage de points ([Tableau 2](#)). Les résultats montrent une bonne précision des nuages de points denses avec un écart type compris entre 0.0098 m (Galabre) et 0.0460 m (Drac). Les résolutions des restitutions photogrammétriques sont disponibles dans le [Tableau 3](#). Les ortho-mosaïques SfM obtenues ont une résolution comprise entre 1.27 et 1.54 cm. Les nuages de points 3D obtenus ont une densité moyenne de 1100 points/m². Un problème de batterie de la station RTK lors de la campagne de St-Pierre a fait qu'une partie des photos n'ont pas été corrigées avec une précision centimétrique. Le tronçon est également divisé en deux nuages de points différents.

Les nuages de points SfM ont ensuite été importés dans le logiciel de traitement de nuages de points 3D CloudCompare (version 2.12.0) (<https://www.danielgm.net/cc/>). L'outil de segmentation manuelle, *Segment*, a permis d'extraire les placettes granulométriques sur chaque site pour ensuite calculer leur rugosité altimétrique via l'outil *Roughness*. Cette métrique est définie comme la distance entre un point donné et le meilleur plan d'ajustement calculé sur ses proches voisins inclus dans une sphère de rayon prédéterminé (CloudCompare, 2021). Cette mesure a déjà été utilisée comme proxy de la granulométrie de surface (Vázquez-Tarrío et al., 2017; Woodget & Austrums, 2017; Chardon et al. 2020). Le rayon de calcul de la rugosité altimétrique a été fixé à 0.5 m. Cette valeur correspond au rayon optimal obtenu par Vázquez-Tarrío et al. (2017) dans un lit en tresses, et elle représente environ le double du plus gros grain observé dans le jeu de donnée. Les valeurs de percentiles étudiées pour la distribution des valeurs de rugosité altimétrique correspondent aux valeurs de percentiles granulométriques couramment utilisés (D_{16} , D_{50} , D_{84}). Plusieurs modèles de régression linéaire vérifiant ces relations ont ainsi été établis.



Filtres

Nuage de points dense

Outils - Classifier les points

Modèle - Sélection de forme libre
 Supprimer les points aberrants

Nuage de points dense filtré

Indice topographique

Indice d'Excessive Greenness (ExG)

Cartographie de la granulométrie

Calculatrice Raster
 (Raster de rugosité altimétrique * 1000) * 1,9 + 12

Raster de rugosité altimétrique

Légende

- Traitement Agisoft Metashape
- Script R
- Traitement CloudCompare
- Traitement QGIS

Rugosité altimétrique

Nuage de points dense filtré

Nuage de points dense filtré

Nuage de points dense filtré

Outils - Autres - Calculer des caractéristiques géométriques

Outils - Autres - Calculer des caractéristiques géométriques

Outils - Autres - Calculer des caractéristiques géométriques



Outils - Projection - Rasterize

Outils - Projection - Rasterize

Outils - Projection - Rasterize



Raster de rugosité altimétrique

Raster de rugosité altimétrique

Raster de rugosité altimétrique

Figure 4 : Méthodologie de caractérisation de la granulométrie de surface par exploitation d'images drone
 © Loïs Ribet

Tableau 2 : Métriques d'erreurs des nuages de points denses 3D

	Points de contrôle Points de validation			Erreur de la coordonnée Z des caméras		
	RMSE des erreurs résiduelles X (m)	RMSE des erreurs résiduelles Y (m)	RMSE des erreurs résiduelles Z (m)	Erreur moyenne (m)	Erreur moyenne absolue (m)	Ecart-type de l'erreur (m)
Arigéol	0.057 0.053	0.027 0.032	0.013 0.025	0.0028	0.0986	0.0129
Asse	0.055 0.053	0.077 0.087	0.098 0.108	0.0001	0.0190	0.0249
Béoux	0.052 0.057	0.047 0.052	0.022 0.031	0.0016	0.0213	0.0263
Bès	0.044 0.041	0.042 0.046	0.043 0.055	-0.0036	0.0213	0.0276
Bouinenc	0.036 0.021	0.032 0.023	0.008 0.023	0.0002	0.0098	0.0125
Drac	0.067 0.066	0.069 0.059	0.179 0.162	-0.0011	0.0713	0.0460
Drôme	0.066 0.068	0.089 0.078	0.262 0.364	-0.0057	0.0133	0.0170
Ebron	0.294 0.370	0.244 0.276	0.047 0.215	-0.0580	0.0840	0.0141
Eygues	0.025 0.024	0.171 0.134	0.063 0.082	-0.0568	0.0436	0.0298
Galabre	0.049 0.034	0.039 0.035	0.012 0.020	0.0010	0.0112	0.0098
Séveraisse	0.061 0.046	0.030 0.029	0.015 0.019	0.0001	0.0056	0.0118
St-Pierre amont	0.054 0.041	0.156 0.086	0.020 0.018	/	/	/
St-Pierre aval	0.065 0.143	0.062 0.028	0.019 0.045	/	/	/

Tableau 3 : Résolution des restitutions photogrammétriques produites sur Agisoft Metashape

	Densité du nuage de points dense (pts/m ²)	Résolution du MNS (cm/pxl)	Résolution des ortho-mosaïques (cm/pxl)
Arigéol	976	2.97	1.48
Asse	897	3.04	1.52
Béoux	1189	2.90	1.45
Bès	1324	2.70	1.35
Bouinenc	1214	2.70	1.35
Drac	1464	2.54	1.27
Drôme	905	3.07	1.54
Ebron	1527	2.71	1.35
Eygues	983	2.98	1.49
Galabre	613	2.79	1.40
Séveraisse	1054	2.98	1.49
St-Pierre amont	980	3.04	1.52
St-Pierre aval	973	2.90	1.45

3.2.3. Validation du proxy granulométrique de surface

Une évaluation indépendante de l'erreur de prédiction du D_{50} à partir de la courbe de calibration fondée sur la rugosité altimétrique a été réalisée à partir d'une validation croisée. Cette approche statistique permet d'estimer la fiabilité d'un modèle (ici de prédiction) selon une procédure de ré-échantillonnage à partir d'un nombre limité de données. Parmi les méthodes de validation croisée, nous avons choisi la méthode Jackknife car elle supprime de manière séquentielle une observation du jeu de donnée pour recalculer la statistique désirée (Quenouille, 1956). Dans notre cas, une régression est calculée en utilisant 128 des 129 placettes d'échantillonnages et, à partir des paramètres d'ajustement de la régression, la granulométrie de la placette exclue est calculée à partir de sa valeur de rugosité. Cette procédure a été réitérée 129 fois ce qui permet d'évaluer l'exactitude et la précision de chaque modèle via respectivement, l'écart-type des erreurs résiduelles et la moyenne des erreurs résiduelles.

Une validation croisée de type Jackknife a également été utilisée pour évaluer la transposabilité du modèle sur un site non utilisé pour la calibration. Cette analyse repose sur l'exclusion de l'ensemble des placettes d'un site donné, qui sont ensuite utilisées pour calculer l'erreur de prédiction fondée sur un modèle calibré sur les 11 sites restant.

3.2.4. Cartographie distribuée de la granulométrie de surface

Pour cartographier la granulométrie de surface des bandes actives, plusieurs étapes de filtrage des nuages de points 3D sont nécessaires afin d'exclure les surfaces impropres à la mesure granulométrique. Il s'agit en premier lieu de créer un masque manuel de la bande active, supprimant la plaine alluviale et les terrasses. Les grosses structures non alluvionnaires (gros troncs d'arbres, pneus, ...) présentes dans la bande active ont également été supprimées manuellement.

Dans un second temps, ce sont les patches de végétation présents au sein de la bande active qui ont été supprimés des nuages de points. Un premier filtrage a été réalisé à partir du module Agisoft Metashape de classification automatique de la végétation ligneuse. Un second filtrage a été nécessaire pour supprimer la végétation résiduelle non détectée par le module d'Agisoft (Figure 5). Cette étape est fondée sur l'indice d'Excessive Greenness (Woebbecke et al., 1995 ; Núñez-Andrés et al., 2021) que nous avons calculé avec un script R disponible en Annexe 2 (à partir des package *lidR* (<https://github.com/r-lidar/lidR>) et *terra* (<https://github.com/rspatial/terra>)). Nous avons également constaté que les fortes valeurs de rugosité associées aux talus en marges des bancs traduisent plus un effet de pente locale qu'une granulométrie de surface, et il a donc été nécessaire d'exclure ces secteurs. A partir d'un MNT de pente, nous avons créé un second script R supprimant les pixels dont la pente est supérieure à 60 % (Annexe 2). Deux sites font cependant exception. Pour l'Asse, l'exclusion des talus a nécessité de réduire la valeur seuil à 30%. Aucun filtre de pente n'a été utilisé sur l'Ebron car la surestimation induite par les talus semble négligeable au regard de la granulométrie extrêmement grossière du tronçon.

Les nuages de points denses filtrés ont été importés dans CloudCompare pour calculer la rugosité altimétrique sur un rayon de 0.5 m. Un raster a été calculé en moyennant les valeurs de rugosité sur 1 m², puis la loi de calibration est utilisée pour convertir les valeurs de rugosité en D_{50} de surface. Les pixels ont ensuite été classés selon l'échelle granulométrique de Wentworth (Wentworth, 1922) permettant l'extraction de la distribution granulométrique dans la bande active de chaque site avec une résolution de 1 m.

Suite à une inspection visuelle des cartes granulométriques, nous avons remarqué que la granulométrie des chenaux en eaux de l'Asse et de l'Eygues était biaisée. Ceci est imputé aux conditions lors des campagnes d'acquisition qui n'étaient pas optimales pour calculer la rugosité altimétrique submergée. Pour l'Asse, l'étiage n'était pas suffisamment sévère ce qui fait que les surfaces en eau sur les photos sont fortement impactées par des reflets et des turbulences. Les chenaux de l'Eygues étaient quant à eux soumis à un fort développement algal. Nous avons donc pris la décision de supprimer cette information des nuages de points.

Les cartes granulométriques ont été utilisées pour explorer les signatures morpho-sédimentaires des sites d'étude. Des analyses préliminaires ont été réalisées sous QGIS pour explorer la variabilité spatiale de la granulométrie de surface en fonction de gradients morphologiques classiques, comme l'altitude relative de la bande active ou les alternances seuil-mouille du chenal principal. Ces analyses sont fondées sur la création d'un MNT relatif permettant de visualiser les altitudes de la bande active par rapport à un niveau de référence qui correspond ici au fond du lit. La chaîne de traitement consiste à extraire l'altitude de points équi-répartis sur la centerline de la digitalisation manuelle de l'emprise du chenal principal. Trois plugins QGIS ont été utilisés pour extraire ces altitudes :

- *Geometric Attributes* (Nyberg et al., 2015) ;
- *QChainage* (<https://github.com/mach0/qchainage>);
- *Point Sampling Tools* (<http://github.com/borysiasty/pointsamplingtool>).

Ces points sont ensuite utilisés pour définir un MNT de la pente du fond de vallée issue du chenal principal avec l'outil *Polynomial regression* de la SAGA toolbox. Ce MNT est ensuite soustrait du MNS photogrammétrique.

Les MNT relatifs ont permis d'évaluer l'effet de l'altitude relative de la bande active sur la granulométrie de surface. Ils ont également permis de comparer les alternances granulométriques longitudinales du chenal principal avec les successions de seuils et de mouilles. Cette analyse longitudinale a été réalisée à partir de la digitalisation manuelle du chenal principal qui a ensuite été segmenté selon un intervalle régulier de 10 m, de façon à extraire la granulométrie moyenne et l'altitude relative de chaque unité spatiale segmentée. La segmentation repose sur une suite de traitements géomatiques réalisés sous QGIS à partir du plugin *Geometric Attributes* et de la SAGA toolbox. Ces outils permettent l'extraction d'une centerline sur l'emprise du chenal principal, puis le traçage automatique de transects selon une interdistance prédéterminée.

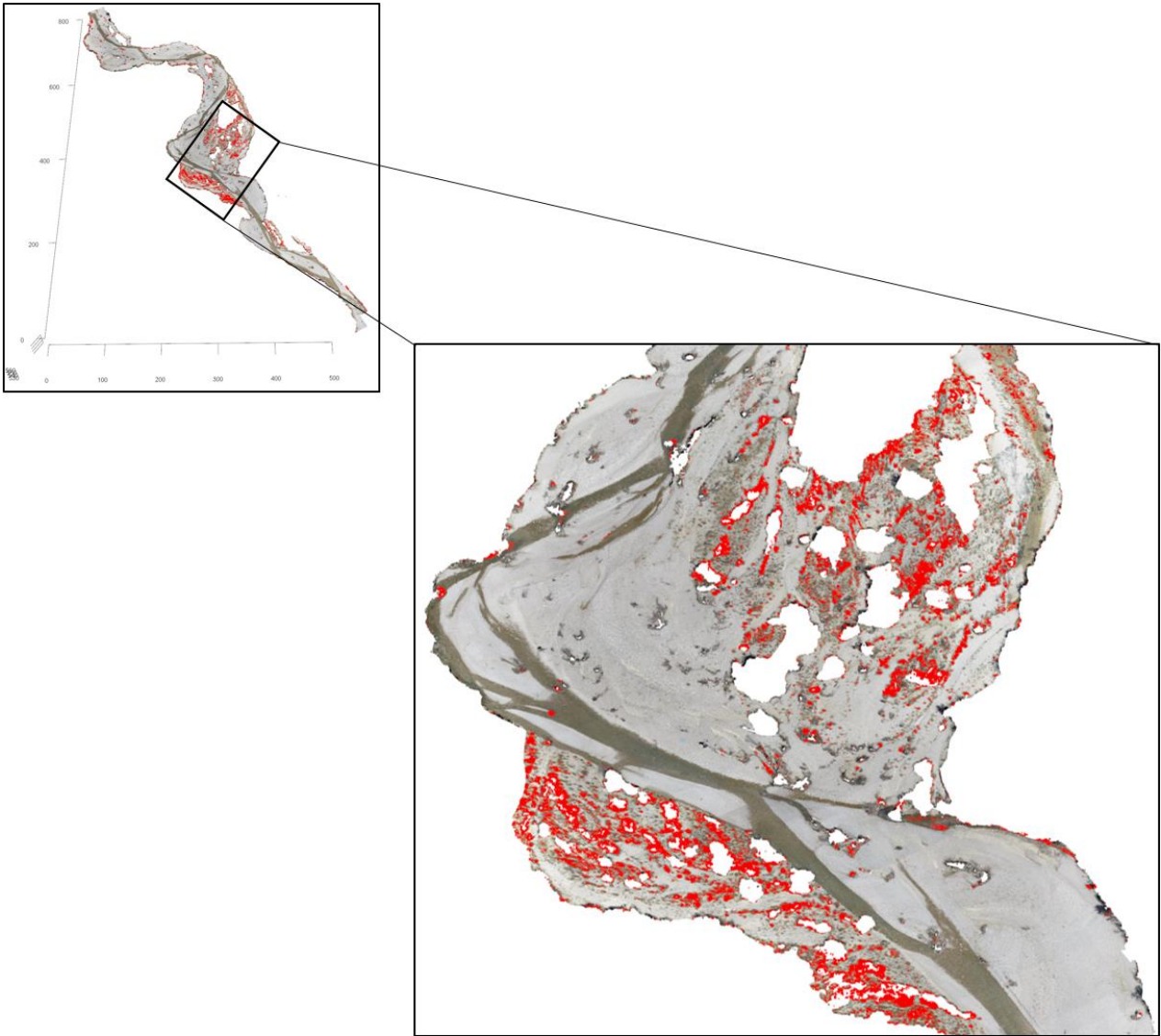


Figure 5 : Filtre de végétation sur la Drôme par l'indice d'ExG. Les points en rouges correspondent aux points supprimés (les axes sont en m).

4. Résultats

Après correction des percentiles granulométriques DGS, il a été possible d'établir une calibration granulométrique fondée sur la rugosité altimétrique. Cette calibration a été évaluée de manière indépendante selon une approche statistique de type Jackknife. La transposabilité de l'approche a également fait l'objet d'une analyse spécifique fondée sur une évaluation croisée de type Jackknife. Le modèle granulométrique le plus performant a ensuite été appliqué au raster de rugosité altimétrique. Ceci permet d'obtenir une cartographie de la granulométrie de surface recouvrant l'ensemble des surfaces non végétalisées de la bande tressage, incluant les chenaux en eau. Les mosaïques sédimentaires ont ensuite été analysées sous SIG.

4.1. Granulométrie digitale DGS

Les percentiles granulométriques obtenus avec DGS ont été comparés à ceux obtenus par extraction manuelle sur ImageJ (Figure 6). Les performances du DGS ont ainsi été testées pour une gamme granulométrique étendue ($8 \text{ mm} < D_{50} < 154 \text{ mm}$), représentative de la variabilité sédimentologique de nos sites d'étude. Une sous-estimation systématique des faibles percentiles (D_{10} et D_{16}) a été observée, tandis que les percentiles élevés (D_{84} et D_{90}) ont été systématiquement surestimés. Les médianes des distributions calculées sont plus proches de la ligne d'égalité ($x=y$), sauf pour deux points extraits manuellement dont le D_{50} est supérieur à 120 mm et pour lesquels une forte sous-estimation (~35%) a été observée.

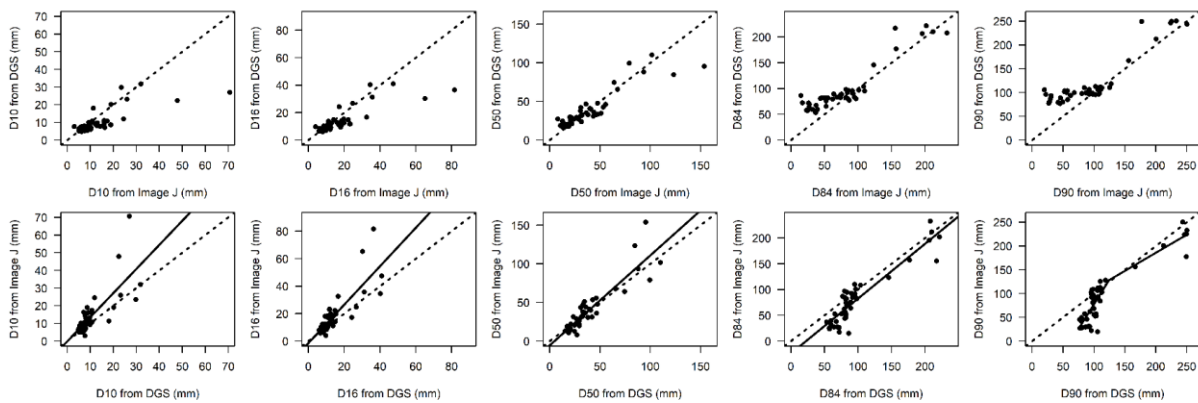


Figure 6 : Comparaison des percentiles granulométriques calculés par Digital Grain-Size (DGS) et obtenus manuellement sous ImageJ ; les diagrammes du haut montrent les percentiles prédits et observés ; les diagrammes du bas montrent les courbes d'étalonnage des percentiles DGS (lignes continues); les lignes pointillées correspondent aux lignes d'égalité

© Frédéric Liébault

Les performances DGS pour la prédiction du D_{50} ne sont pas aussi bonnes que prévu, avec une nRMSE de 32 %, une nMAE de 21 % et une erreur irréductible de 10.37 mm (ou 3,37 Ψ) (Tableau 4). Les meilleures performances ont été obtenues pour le D_{50} et le D_{84} . Si les deux valeurs aberrantes de D_{50} présentées précédemment sont exclues, le nRMSE et nMAE pour le D_{50} chutent à 24 % et 18 %, respectivement. Ces valeurs aberrantes correspondent à deux grandes placettes d'échantillonnage établies sur des bancs de galets bien triés de l'Ebron. Bien que le nombre de grains sur ces deux images soit faible, il reste proche de la limite recommandée (250 grains par image) en dessous de laquelle les performances DGS diminuent fortement.

Les régressions linéaires offrent les meilleurs ajustements pour les courbes d'étalonnage D_{10} , D_{16} , D_{50} et D_{84} (Figure 6). Cependant, les erreurs d'étalonnage normalisées restent supérieures à 45 % pour les percentiles inférieurs, et une valeur de 32 % est obtenue pour le D_{50} . La meilleure courbe d'étalonnage pour le D_{90} a été obtenue en utilisant une fonction de régression *piecewise* permettant la détection automatique des points de rupture dans la droite de régression (Muggeo, 2018). Ce modèle de régression est justifié par une rupture de pente évidente, visible sur le nuage de points du percentile le plus élevé. Ceci révèle qu'un modèle linéaire n'est pas approprié pour ce jeu de données. Une fonction *piecewise* a également été testée pour le D_{84} , mais sans aucun succès car le changement de pente au-dessus du point d'arrêt suspecté est trop faible (D_{84} ImageJ au-dessus de 120 mm). Les meilleures courbes d'étalonnage sont finalement celles obtenues pour des percentiles élevés, avec des nRMSE autour de 25 %.

Tableau 4 : Métriques d'erreur des percentiles DGS obtenus après avoir appliqué un filtre médian ; la RMSE des courbes de calibrations calculées pour les différents percentiles est également fournie

	D_{10}	D_{16}	D_{50}	D_{84}	D_{90}
RMSE (mm)	8.86	10.03	13.40	27.23	35.34
nRMSE (%)	0.63	0.56	0.33	0.34	0.37
MAE (mm)	4.76	5.52	8.48	22.10	27.23
nMAE (%)	0.34	0.31	0.21	0.27	0.29
e (mm)	7.48	8.37	10.37	15.91	22.53
RMSE de calibration (mm)	7.71	8.43	12.81	20.43	23.59
nRMSE de calibration (%)	0.55	0.47	0.32	0.25	0.25

De nouvelles données ont ainsi été produites pour tester la qualité des extractions granulométriques automatiques issues du traitement d'images rapprochées de bancs de graviers. Ces données sont cruciales pour le calibrage des proxies sédimentologiques SfM. L'analyse comparative des percentiles DGS avec ceux obtenus à partir de l'extraction manuelle des diamètres apparents sur ImageJ montre qu'un étalonnage terrain des résultats DGS est absolument nécessaire, même pour des images en haute définition de surfaces sédimentaires homogènes. Un biais systématique est observé pour tous les percentiles, avec un décalage beaucoup plus prononcé pour les petits percentiles. Les performances globales de DGS ne sont pas aussi bonnes que celles qui ont été présentées dans la littérature. Buscombe (2013) a rapporté une RMSE normalisée de 16 % pour le D_{50} en utilisant un ensemble de 262 images de sables/graviers non consolidés. Cependant, les tests DGS sur les bancs de gravier exposés du Rhin ont montré une RMSE normalisée beaucoup plus élevée pour le D_{50} , avec une valeur de 53 % (Chardon et al. 2021). Cette métrique d'erreur tombe à 10% après correction par régression linéaire. Dans notre cas, la courbe d'étalonnage du D_{50} offre une précision moindre se situant autour de 30%. Cette précision inférieure pourrait être liée à notre ensemble de données de calibration, qui est ~ 4 fois plus grand que celui utilisé par Chardon et al. (2022) sur le Rhin (n=10), et qui comprend 5 sites avec une forte variabilité lithologique. Il faut également signaler que notre courbe d'étalonnage du D_{50} est fortement impactée par deux valeurs aberrantes qui ont été collectées sur l'Ebron, avec un D_{50} extrait manuellement supérieur à 120 mm. Tous les autres points sont proches de la ligne d'égalité avec la prédiction DGS, montrant que l'algorithme de traitement d'image fournit une très bonne performance pour un D_{50} inférieur à 100 mm (nRMSE = 24%). La perte de précision au-dessus de cette taille est probablement liée au nombre réduit de grains sur les images, qui est connu pour avoir un effet sur les prédictions de percentiles (Buscombe, 2013).

Nos résultats sont généralement en accord avec les tests précédents du code DGS montrant une sous-estimation systématique des petits percentiles, et une meilleure performance pour les gros percentiles. Cela s'explique par une grande sensibilité de l'algorithme à un petit nombre de grains fins visibles sur les images (Buscombe, 2013). Cependant, un biais positif systématique inhabituel pour les percentiles élevés a été observé dans nos données d'étalonnage. Ce biais pourrait être lié à une corrélation positive entre la taille des grains et l'intensité de l'ombrage (les grains plus gros sont systématiquement plus brillants), ce qui peut conduire à une surestimation des tailles de grains prédites à partir de la puissance spectrale (Buscombe, 2013). C'est probablement le cas de plusieurs images prises sur des sites caractérisés par un mélange de roches calcaires et marno-calcaires (Eygues, Galabre, Arigéol, Ebron). Les roches calcaires produisent des grains plus gros et plus brillants (blancs) par rapport aux calcaires marneux, qui sont plus foncés et plus sensibles à l'abrasion. Cependant, il est difficile d'expliquer pourquoi ce biais pétrographique ne jouerait que sur les gros percentiles. Des études complémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les biais systématiques associés aux prédictions du code DGS.

4.2. Courbe de calibration granulométrique

4.2.1. Modèles granulométriques

L'analyse des modèles de régression par percentiles de rugosité correspondants a été faite pour le D_{16} , D_{50} et D_{84} (Figure 7). Les résultats des modèles granulométriques sont disponibles dans le Tableau 5. La meilleure relation est obtenue pour le percentile médian avec un R^2 de 0.79. La qualité de l'ajustement de la relation pour le 16^{ème} percentile est correcte avec un R^2 de 0.72 tandis que le R^2 de 0.62 du 84^{ème} percentile est plus faible.

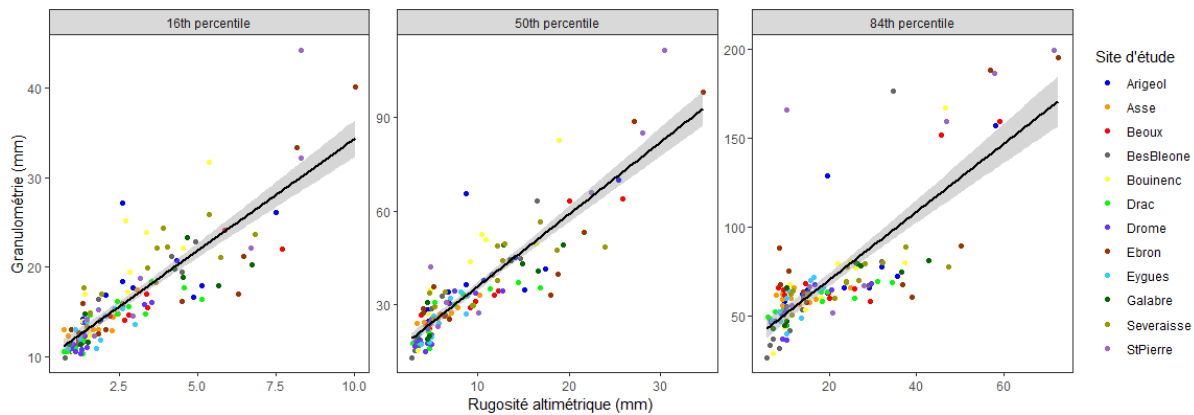


Figure 7 : Courbes de calibration granulométriques à partir des percentiles de rugosité altimétrique ; la zone grise correspond à l'intervalle de confiance de prédiction à 95%
© Loïs Ribet

Les régressions obtenues à partir de la rugosité moyenne des placettes offrent de meilleures performances (Figure 8, Tableau 5). La qualité des modèles d'ajustement suit le même ordre que celui des percentiles correspondants avec, dans l'ordre décroissant, le D_{50} , le D_{16} et le D_{84} . Ainsi, les résultats montrent que la rugosité altimétrique moyenne (\bar{R}_h) est un très bon proxy de la granulométrie médiane (D_{50}), avec un R^2 de 0.83.

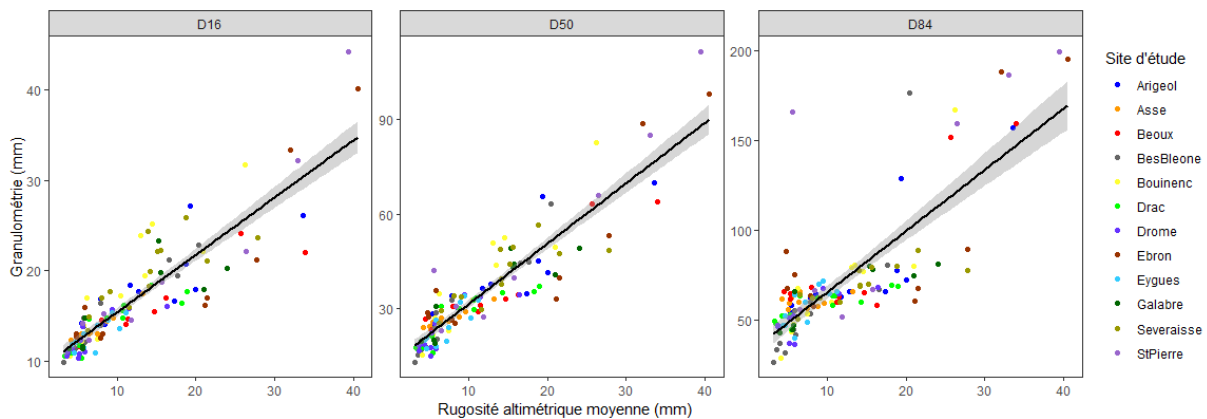


Figure 8 : Courbes de calibration granulométriques à partir de la rugosité altimétrique moyenne; la zone grise correspond à l'intervalle de confiance de prédiction à 95%
© Loïs Ribet

Les résultats des métriques d'erreur obtenus par validation croisée de type Jackknife sont présentés dans le Tableau 5. Pour le modèle granulométrique retenu $D_{50} \sim \bar{R}_h$, l'erreur aléatoire de prédiction du D_{50} est de 4.97 mm. Cette erreur représente 14.4% du D_{50} moyen (34.47 mm) calculé sur l'ensemble des placettes de calibration. Ce modèle peut être utilisé pour établir des cartes granulométriques distribuées sur l'ensemble des bandes actives des 12 sites d'études (incluant les zones submergées lorsque les conditions le permettent).

Tableau 5 : Les six modèles granulométriques obtenus et leurs erreurs résiduelles calculées par validation croisée de type Jackknife

Modèle	Équation	R ²	p-value	Erreurs résiduelles (mm)	
				Moyenne	Écart-type
$D_{16} \sim Rh_{16}$	$D_{16} = 2.5 Rh_{16} + 9.3$	0.72	< 0.0001	2.15	1.90
$D_{50} \sim Rh_{50}$	$D_{50} = 2.3 Rh_{50} + 13$	0.79	< 0.0001	2.34	2.03
$D_{84} \sim Rh_{84}$	$D_{84} = 1.9 Rh_{84} + 32$	0.62	< 0.0001	5.53	5.35
$D_{16} \sim \overline{Rh}$	$D_{16} = 0.63 Rh + 9.1$	0.79	< 0.0001	5.89	4.97
$D_{50} \sim \overline{Rh}$	$D_{50} = 1.9 Rh + 12$	0.83	< 0.0001	14.32	14.11
$D_{84} \sim \overline{Rh}$	$D_{84} = 3.4 Rh + 31$	0.64	< 0.0001	16.31	15.91

4.2.2. Transposabilité du modèle granulométrique global

L'élaboration des modèles granulométriques $D_{50} \sim \overline{Rh}$ intra-sites révèle que la qualité des régressions est assez disparate en fonction des sites ([Annexe 1](#)). Par exemple, les modèles de l'Eygues et de la Séveraisse sont médiocres ($R^2 \approx 0.6$) tandis que celui de l'Asse et du Bès sont très bons ($R^2 \approx 0.9$). Ceci s'explique en partie par l'étendue granulométrique observée entre les placettes d'un site donné. De manière générale, plus cette étendue est importante, meilleure est la relation intra-site. Ces divergences inter-sites posent néanmoins la question de la transposabilité du modèle global aux tresses alpines. Pour ce faire un échantillonnage par Jackknife a été réalisé afin de calculer l'écart résiduel des placettes de chaque site. Les résultats de l'échantillonnage par Jackknife pour chaque site sont présentés dans la [Figure 9](#). Pour chaque graphique, la relation $D_{50} \sim \overline{Rh}$ a été établie après exclusion d'un site. Les points matérialisés correspondent aux placettes du site exclu. Ils permettent d'estimer l'écart des valeurs prédites autour du modèle granulométrique global. Les écart-types des résidus propres à chaque site ont été calculés afin de quantifier l'erreur résiduelle de prédiction. Ces erreurs ont été normalisées par le D_{50} moyen de leurs placettes respectives ([Tableau 6](#)).

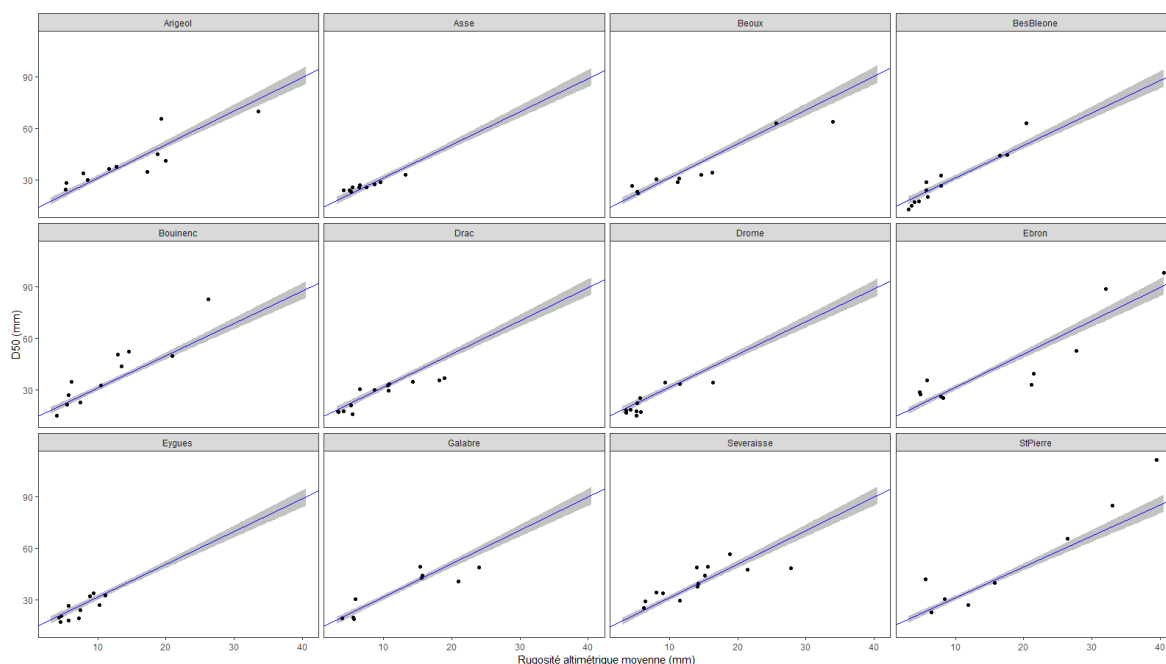


Figure 9 : Evaluation de la transposabilité du modèle granulométrique global aux rivières en tresses. Pour chaque graphique, la régression $D_{50} \sim \overline{Rh}$ a été établie après exclusion du site mentionné en en-tête. Les points représentent les placettes du site exclu.

© Loïs Ribet

Tableau 6 : Erreur résiduelle calculée pour chaque site suite au Jackknife de validation. La métrique est calculée indépendamment pour chaque site en pondérant l'écart-type des résidus par le D50 moyen des placettes du site

	Erreur résiduelle Ecart-type / D ₅₀
Arigéol	0.115
Asse	0.048
Béoux	0.128
Bès	0.110
Bouinenc	0.165
Drac	0.151
Drôme	0.129
Ebron	0.129
Eygues	0.080
Galabre	0.119
Séveraisse	0.113
St-Pierre	0.175

Les résultats obtenus montrent une bonne transposabilité du modèle global, dans la mesure où la grande majorité des sites exclus ne montrent pas de déviation systématique par rapport au modèle. Les points restent assez bien distribués de part et d'autre du modèle pour quasiment tous les sites, à l'exception du Torrent de Saint-Pierre et du Bouinenc, qui montrent une sous-estimation quasi systématique du D_{50} par le modèle global. Les erreurs résiduelles normalisées montrent que la transposabilité du modèle sur des sites non utilisés dans la calibration devraient permettre d'estimer le D_{50} de surface avec une incertitude comprise entre 5% et 17%. Ces valeurs doivent être vues comme conservatives, dans la mesure où le modèle global intègre une plus grande variabilité par rapport aux modèles testés pour la transposabilité.

4.3. Cartographie de la granulométrie distribuée

La courbe de calibration granulométrique fondée sur la rugosité altimétrique des nuages de points 3D SfM a permis de produire des cartes granulométriques distribuées des bandes de tressage des 12 sites d'étude. Ces cartes peuvent être utilisées d'une part pour extraire les distributions granulométriques composites des bandes actives, et d'autre part pour analyser les signatures morpho-sédimentaires des lits en tresses. Quelques exemples sont présentés à titre illustratif.

4.3.1. Granulométries composites des bandes de tressage

Les cartes distribuées de granulométrie de surface ([Annexe 3](#) à [Annexe 14](#)) illustrent l'hétérogénéité spatiale des signatures sédimentaires propres aux bandes actives des rivières en tresse. La [Figure 10](#) présente un exemple de carte produite sur le site de l'Arigéol. La comparaison des textures sédimentaires visibles sur l'ortho-mosaïque SfM (A) avec la classification granulométrique de surface (B) 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. Un gradient granulométrique longitudinal des bancs peut également être visible sur certains sites avec des têtes de bancs plus grossières que les queues ([Annexe 7](#)).

Cette mosaïque varie fortement d'un site à l'autre. La [Figure 11](#) présente la quantité de pixel appartenant à chaque classe granulométrique au sein de chaque rivière. Le classement des rivières par ordre croissant de taille de bassin versant illustre parfaitement le phénomène d'affinement granulométrique vers l'aval. En effet, par les phénomènes d'abrasion et de tri sélectif, l'augmentation de la superficie drainée amène à une augmentation de la proportion des classes granulométriques les plus fines dans la granulométrie composite. Ainsi, l'Ebron possède une granulométrie extrêmement grossière comparée à celle des autres sites avec plus de 50 % des pixels de D_{50} dans la gamme 64-128 mm. Ce site est un torrent (pente de 8%) situé très proche des sources sédimentaires (bassins de réceptions torrentiels). À contrario, l'Asse et l'Eygues avec leur très grande superficie drainée présentent les granulométries les plus fines avec plus de 70 % des pixels de D_{50} dans la gamme 12 - 32 mm.

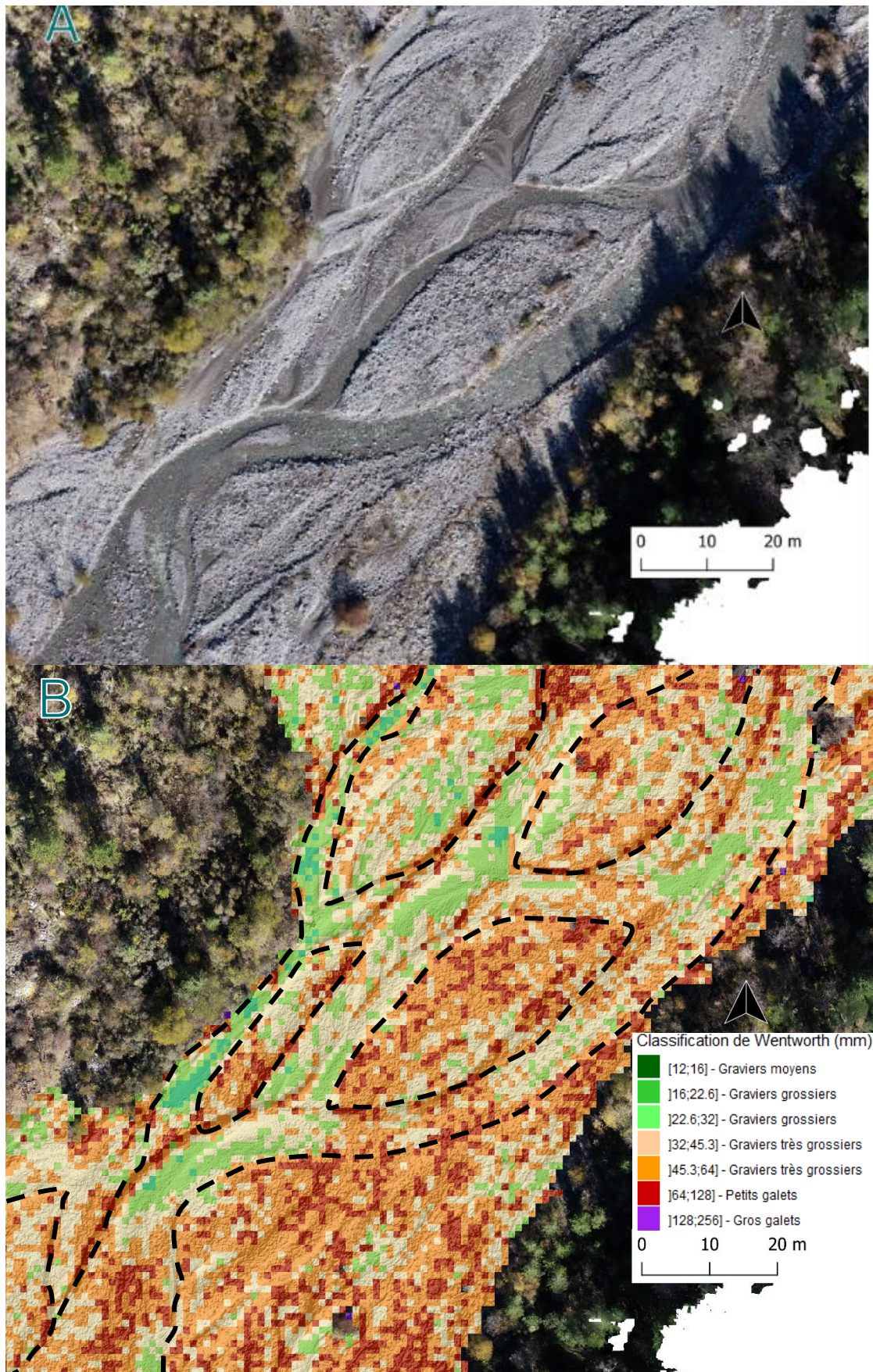


Figure 10 : Section de l'Arigéol illustrant le potentiel de caractérisation de la granulométrie de surface par cartographie. (A) Ortho-mosaïque SfM (1.48 cm/pxl) ; (B) Caractérisation de la granulométrie de surface selon la classification de Wentworth projetée sur un MNT d'ombrage pour faciliter la lecture des macroformes de la tresse. © Loïs Ribet

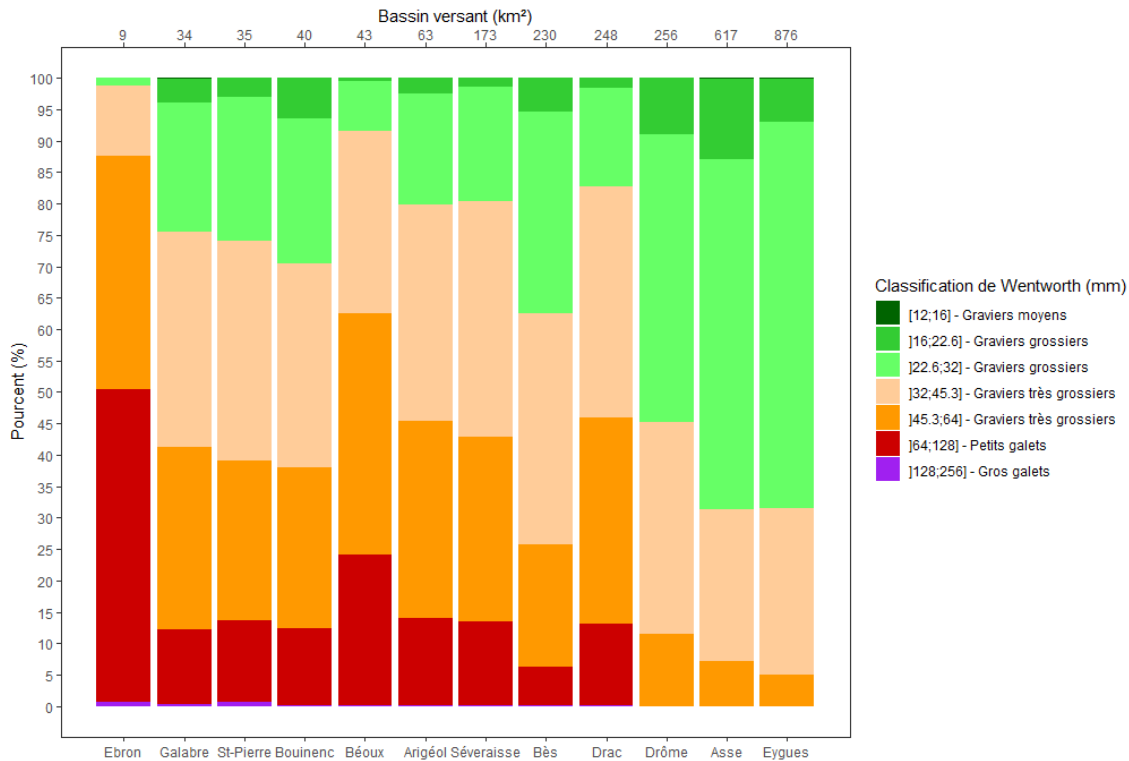


Figure 11 : Proportion des classes granulométriques pour chaque site
© Loïs Ribet

Les granulométries composites de la Béoux et du Drac se distinguent de cette tendance à l'affinement granulométrique. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la granulométrie de ces deux sites. Le site de la Béoux est une rivière torrentielle à forte pente (3.7 %). Sa granulométrie grossière est sans doute liée aux apports sédimentaire du Torrent du Rabioux, situé à quelques centaines de mètres en amont du tronçon d'étude. Ce torrent très actif est connu pour produire régulièrement des laves torrentielles. Ces laves sont tout à fait susceptibles d'influencer la distribution granulométrique de la bande de tressage par des apports grossiers, notamment des blocs, qui sont remobilisés par charriage. Pour le Drac, nous estimons que la granulométrie relativement grossière du site est probablement liée aux caractéristiques géologiques et topographiques du bassin versant. Il s'agit d'un site d'altitude drainant les zones sommitales du massif des Écrins. Le matériel provenant de ces zones sont des roches cristallines, moins sensibles à l'abrasion. C'est sans doute pourquoi la granulométrie du Drac est si grossière en comparaison de celle de la Drôme, pour des surfaces drainées similaires.

4.3.2. Hétérogénéité spatiale de la granulométrie de surface

L'analyse exploratoire des signatures morpho-sédimentaires fondées sur l'altitude relative des pixels de la bande active a été réalisée sur 3 sites pour lesquels les conditions de prises de vue ont été considérées comme très favorables pour l'extraction des granulométries des chenaux en eau. Il s'agit de l'Arigéol, du Bouinenc et du Drac. Les MNT relatifs sont visibles en Annexe 15. La Figure 12 présente la distribution granulométrique des trois sites pour des classes d'altitude relative de 0.5 m.

Pour l'Arigéol, une légère tendance à la diminution du D_{50} avec l'altitude relative est visible. Cette tendance est essentiellement induite par les extrêmes de classes d'altitude relative. En effet, le D_{50} le plus important est associé à la classe des altitudes relatives les plus basses alors que les altitudes relatives les plus hautes possèdent la plus faible granulométrie médiane. Pour cette dernière, cela s'explique par des placages de fines présents en amont du site (Annexe 3), qui ont été vraisemblablement déposés en décrue. Les médianes des trois autres classes ne présentent pas de différence significative. Il faut donc considérer que pour ce site, l'altitude relative de la bande active n'est pas un élément structurant de sa mosaïque sédimentaire. Ceci traduit probablement une tresse qui reste encore active, dont la granulométrie de surface traduit une mosaïque formée par des ajustements morphologiques complexes par construction/destruction des bancs et migration des chenaux au gré des crues.

La distribution granulométrique du Bouinenc montre en revanche très clairement une tendance à l'augmentation avec l'altitude relative. Ce site est une tresse dégradée, qui évolue vers un style divaguant de transition vers un lit à chenal unique sinueux. On peut supposer que ce gradient altimétrique est lié à l'incision du lit qui se traduit par l'encaissement progressif d'une nouvelle bande active de granulométrie fine dans une ancienne bande active plus grossière.

La structure altimétrique de la granulométrie du Drac est similaire à celle de l'Arigéol et traduit une tresse active, où les formes sont fréquemment renouvelées au gré des crues à l'échelle de l'ensemble de la bande de tressage.

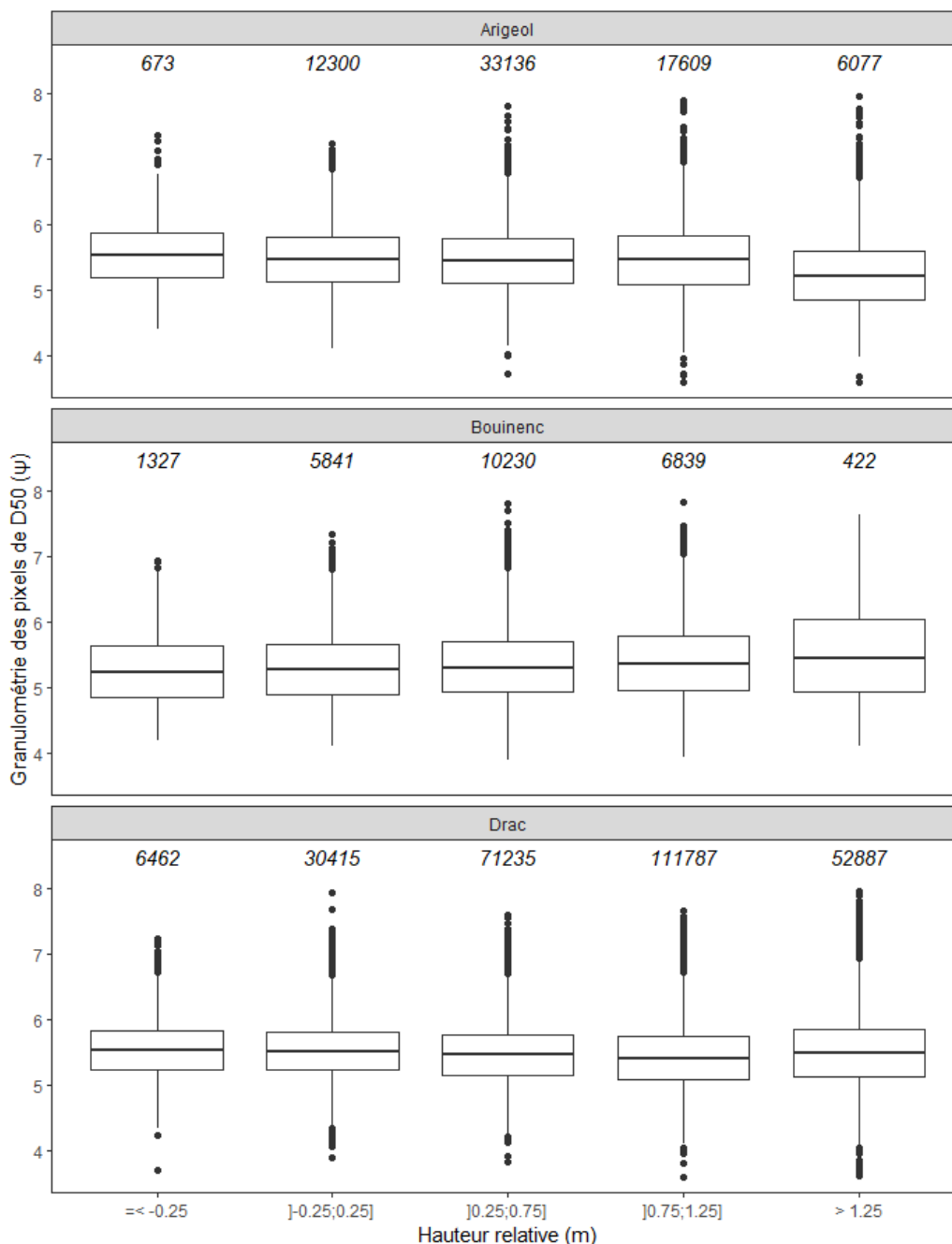


Figure 12 : Distribution de la granulométrie par classes d'altitude relative au centroïde du chenal principal de chaque rivière. Pour passer des Ψ aux mm : $D(mm) = 2^\Psi$. Le nombre d'individus constitutifs des classes est indiqué en italique.

© Loïs Ribet

Sur les sites de l'Arigéol et du Bouinenc, la segmentation selon un pas d'échantillonnage de 10 m du chenal principal a permis d'extraire le signal amont-aval de la granulométrie de surface et le comparer avec celui de l'altitude relative (Figure 13). Les séquences granulométriques des 2 sites montrent des alternances beaucoup plus fréquentes que celles liées à la topographie (alternances seuil-mouille). Le modèle conceptuel classique des morphologies en seuil-mouille-banc qui décrit une alternance longitudinale régulière de seuils à granulométrie grossière et de mouilles à granulométrie fine apparaît ici comme peu adapté pour retranscrire la complexité spatiale de la mosaïque sédimentaire. Ces premiers résultats prospectifs montrent des interdistances granulométriques régulières de l'ordre de 60 m, qui correspondent approximativement à 10 fois la largeur moyenne du chenal principal. La généralisation de ce type de métriques à l'ensemble des sites devrait permettre à terme de mieux comprendre l'origine et la signification de ces séquences régulières. Des phénomènes sans doute liés à la dynamique des nappes de charriage sont certainement à prendre en compte pour expliquer ces

séquences granulométriques de haute fréquence.

La comparaison des signaux topographiques montre par ailleurs des différences importantes entre les 2 sites. On note une alternance très régulière de seuils et de mouilles sur le site du Bouinenc, alors que le signal topographique est beaucoup plus chaotique sur l'Arigéol. Ceci doit être mis en relation avec un différentiel très net de l'activité du tressage sur ces sites, avec un tressage encore bien actif sur l'Arigéol, et beaucoup moins sur le Bouinenc qui montre un état avancé d'évolution vers un style divagant de transition. La complexité des séquences sur l'Arigéol est sans doute liée aux effets des bifurcations et confluences des chenaux multiples, qui induisent une imbrication complexe de zones d'érosion et de dépôt. L'organisation des séquences topographiques longitudinales peut donc probablement être vue comme un indicateur d'activité du tressage, mais ceci reste à démontrer à partir de l'ensemble du jeu de données.

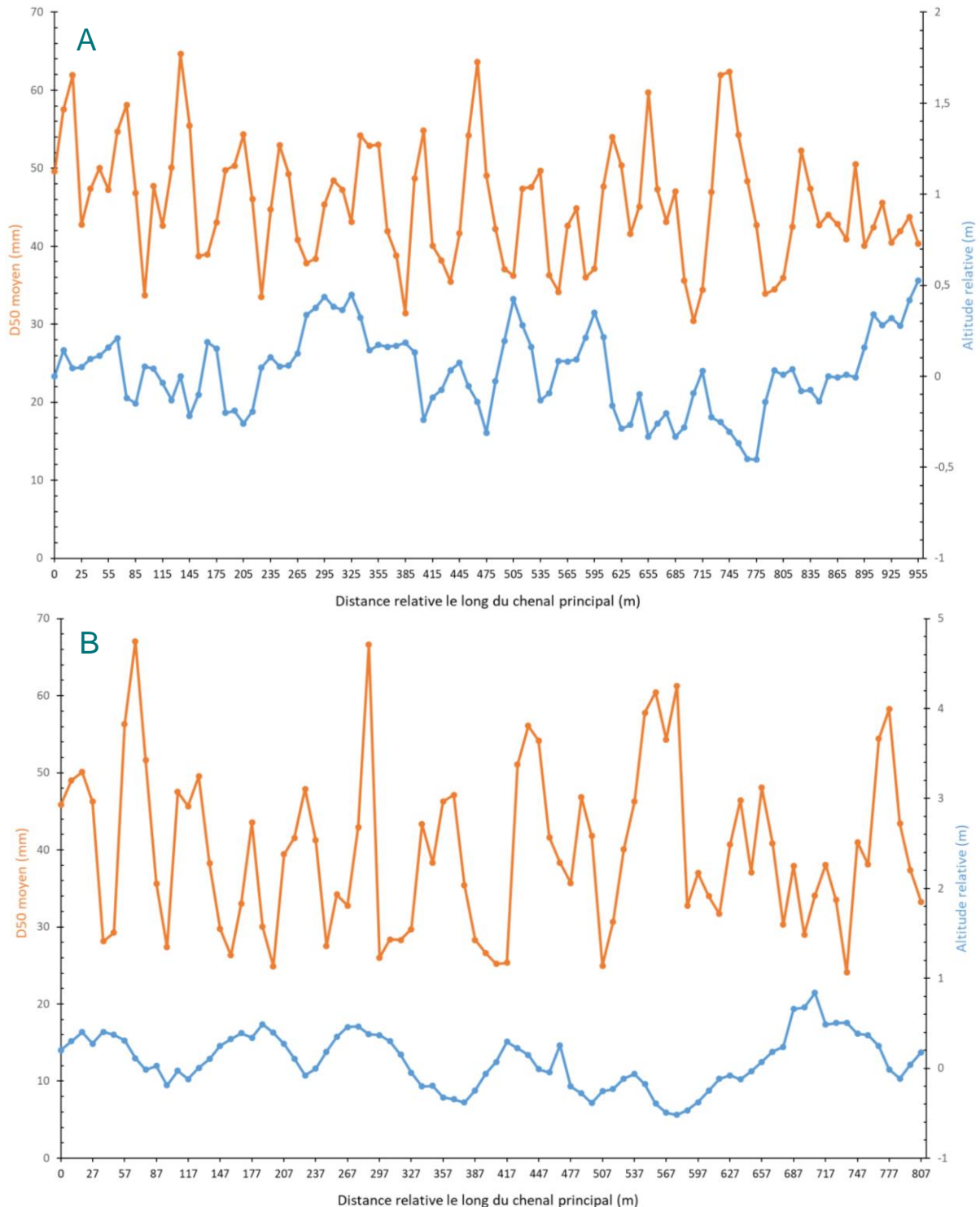


Figure 13 : Gradient longitudinal de la granulométrie de surface (en orange) et de l'altitude relative (en bleu) du chenal principal de l'Arigéol (A) et du Bouinenc (B)

© Loïs Ribet

5. 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 sur des linéaires de plusieurs kilomètres de bande active. L'évaluation de l'erreur de prédiction du D_{50} à partir de la courbe de calibration montre une incertitude de 14.4%. La transposabilité de la méthode aux rivières en tresses alpines peut être considérée comme satisfaisante, avec une évaluation de l'incertitude sur le D_{50} de surface inférieure à 17%. D'un point de vue qualitatif, les cartes continues de granulométrie de surface montrent une bonne correspondance avec les mosaïques sédimentaires visibles sur les ortho-mosaïque de haute résolution produite à partir des images drone, y compris dans les chenaux en eau lorsque les conditions de prises de vue ont été favorables (faible profondeur d'eau, absence de turbidité et de turbulences en surface, pas de développement algal). L'analyse exploratoire des mosaïques sédimentaires en fonction des altitudes relatives de la bande active montre des signatures contrastées entre les sites, qui traduisent sans doute un gradient d'activité morphologique du tressage, mais ceci reste à confirmer sur l'ensemble des sites. On montre d'autre part que ces cartes peuvent être facilement exploitées pour extraire les alternances granulométriques longitudinales le long du chenal principal. Ceci ouvre notamment la voie vers une analyse plus approfondie des dynamiques sédimentaires à l'origine de ces séquences longitudinales.

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). Certains de ces éléments seront évalués dans la cadre du projet INRAE-OFB "TRESSSES" (2023-2026).

6. Glossaire

Echelle de Wentworth : classification géométrique des éléments minéral présents dans les cours d'eau selon leur diamètre à la perpendiculaire de leur plus grand axe. Les classes ont été établies par Wentworth (1922) pour créer une terminologie standardisée.

Photogrammétrie Structure from Motion (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.

Rugosité altimétrique : métrique disponible sur CloudCompare. Elle se définit comme la distance entre un point donné et le meilleur plan d'ajustement calculé à partir de ses voisins présent dans un rayon spécifié d'une sphère (CloudCompare, 2021).

7. Sigles & Abréviations

DGS : Digital Grain Size

D_x : Granulométrie et son percentile x correspondant

e : erreur aléatoire irréductible

MAE : Erreur Moyenne Absolue

ExG index : Excessive Greenness index ~ Indice de sur-verdeur

GCP : Ground Control Point ~ Point de contrôle au sol

MNS : Modèle Numérique de Surface

RMSE : Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne

Rh : Roughness height ~ Rugosité altimétrique

RTK : Real Time Kinetic ~ Vitesse en temps réel

SIG : Système d'information géographique

SfM : Structure from Motion

8. Bibliographie

- Ashmore, P. (2013). 9.17 Morphology and Dynamics of Braided Rivers. In *Treatise on Geomorphology* (p. 289-312). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00242-6>
- Ashmore, P. E. (1982). Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7(3), 201-225. <https://doi.org/10.1002/esp.3290070301>
- Baudoin, J.-M., Boutet-Berry, L., Cagnant, M., Gob, F., Kreutzenberger, K., Lamand, F., Malavol, 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 (AFB).
- Bluck, B. J. (1979). Structure of coarse grained braided stream alluvium. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 70(10-12), 181-221. <https://doi.org/10.1017/S0080456800012795>
- 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., Piasny, G., & Schmitt, L. (2022). Comparison of software accuracy to estimate the bed grain size distribution from digital images : A test performed along the Rhine River. *River Research and Applications*, 38(2), 358-367. <https://doi.org/10.1002/rra.3910>
- 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>
- CloudCompare. (2021). *User manual*.
- Dugdale, S. J., Carbonneau, P. E., & Campbell, D. (2010). Aerial photosieving of exposed gravel bars for the rapid calibration of airborne grain size maps. *Earth Surface Processes and Landforms*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.1936>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellán, A. (2016). Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 359-389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Gardner, T., Ashmore, P., & Leduc, P. (2018). Morpho-sedimentary characteristics of proximal gravel braided river deposits in a Froude-scaled physical model. *Sedimentology*, 65(3), 877-896. <https://doi.org/10.1111/sed.12409>
- Graham, D. J., Rice, S. P., & Reid, I. (2005). A transferable method for the automated grain sizing of river gravels : METHOD FOR GRAIN SIZING RIVER GRAVELS. *Water Resources Research*, 41(7). <https://doi.org/10.1029/2004WR003868>
- James, M. R., Antoniazza, G., Robson, S., & Lane, S. N. (2020). Mitigating systematic error in topographic models for geomorphic change detection : Accuracy, precision and considerations beyond off-nadir imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(10), 2251-2271. <https://doi.org/10.1002/esp.4878>
- Leica Geosystem. (2015). *Leica Zeno 20 User Manual*.
- Lévêque, C. (2016). *Quelles rivières pour demain? Réflexions sur l'écologie et la restauration des cours d'eau*. Éditions Quæ.
- Liébault, F., Lallias-Tacon, S., Cassel, M., & Talaska, N. (2013). LONG PROFILE RESPONSES OF ALPINE BRAIDED RIVERS IN SE FRANCE : LONG PROFILE RESPONSES OF ALPINE BRAIDED RIVERS IN SE FRANCE. *River Research and Applications*, 29(10), 1253-1266. <https://doi.org/10.1002/rra.2615>
- Metashape. (2023). *Agisoft User Manual* (https://www.agisoft.com/pdf/metashape_2_0_en.pdf).

- Muggeo, V. M. R. (2018). segmented: An R package to Fit Regression Models with Broken-Line Relationships. *R NEWS*, 8/1, 20-25.
- Núñez-Andrés, M., Prades, A., & Buill, F. (2021). Vegetation Filtering using Colour for Monitoring Applications from Photogrammetric Data: *Proceedings of the 7th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 98-104. <https://doi.org/10.5220/0010523300980104>
- Nyberg, B., Buckley, S. J., Howell, J. A., & Nanson, R. A. (2015). Geometric attribute and shape characterization of modern depositional elements: A quantitative GIS method for empirical analysis. *Computers & Geosciences*, 82, 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.003>
- Over, J.-S., Ritchie, A., Kranenburg, C., Brown, J., Buscombe, D., Noble, T., Sherwood, C., Warrick, J., & Wernette, P. (2021). Processing Coastal Imagery With Agisoft Metashape Professional Edition, Version 1.6—Structure From Motion Workflow Documentation. USGS.
- Piégay, H., Alber, A., Slater, L., & Bourdin, L. (2009). Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences*, 71(3), 371-388. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-9220-4>
- Quenouille, M. H. (1956). Notes on Bias in Estimation. *Biometrika*, 43(3/4), 353. <https://doi.org/10.2307/2332914>
- Terrier, B., 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., Räßple, B., & Wawrzyniak, V. (2019). *Les rivières en tresses—Éléments de connaissance*. Eau et Connaissance, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse,. 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>
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377-392. <https://doi.org/10.1086/622910>
- Woebbecke, Meyer, Von Bargen, & Mortensen. (1995). Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. *Transactions of the ASAE*, 38(1), 259-269. <https://doi.org/10.13031/2013.27838>
- Woodget, A. S. (2015). *Quantifying physical river habitat parameters using hyperspatial resolution UAS imagery and SfM-photogrammetry*. University of Worcester.
- Woodget, A. S., & Austrums, R. (2017). Subaerial gravel size measurement using topographic data derived from a UAV-SfM approach: Subaerial gravel size measurement using topographic UAV-SfM data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(9), 1434-1443. <https://doi.org/10.1002/esp.4139>

9. Table des illustrations

Table des Figures :

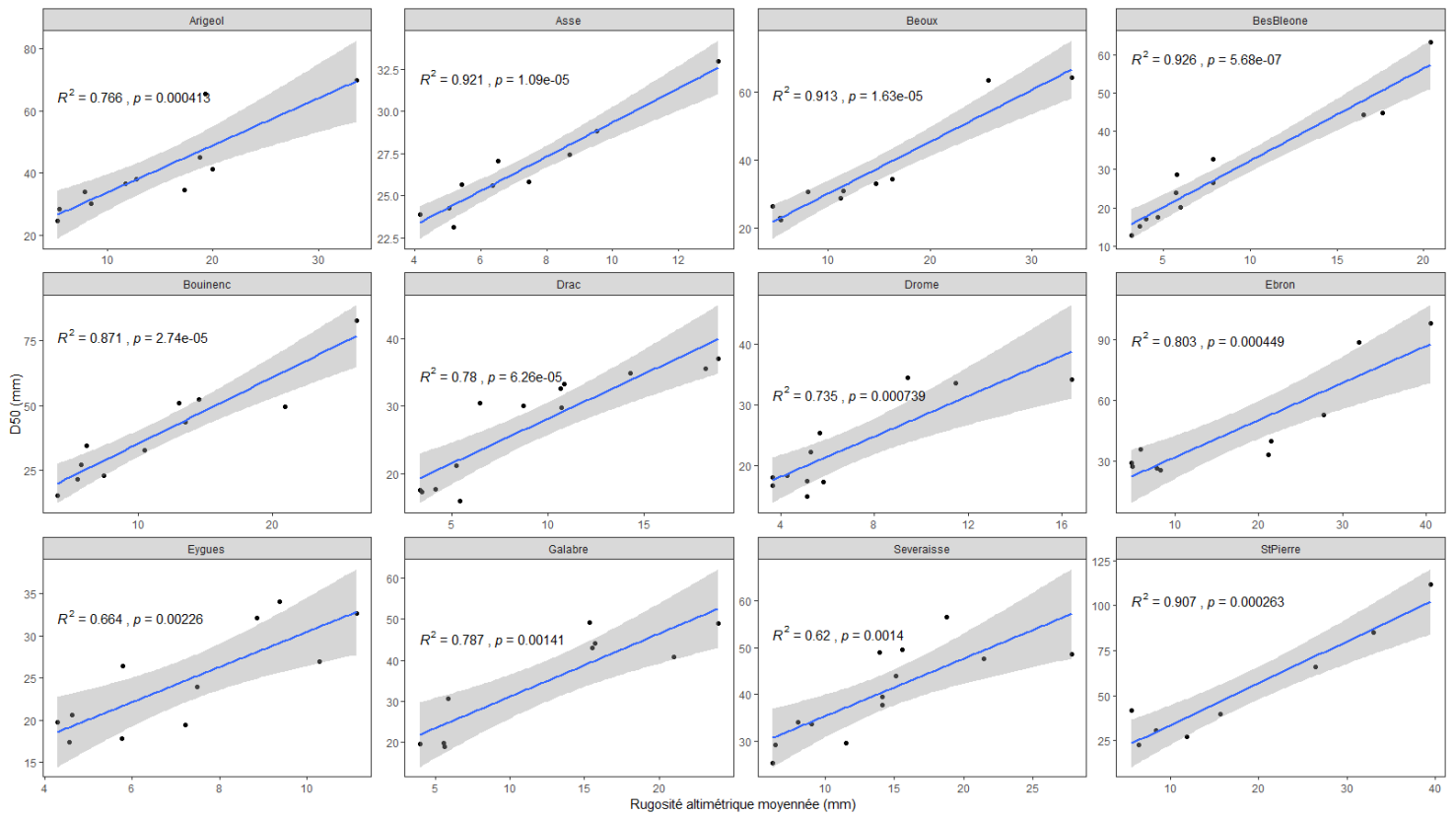
Figure 1 : (A) Carte générale des sites d'étude, avec les limites des bassins versants en noir ; (B) classement des sites d'étude par rapport à la relation régionale entre la largeur de la bande active et la surface drainée pour les rivières en tresses du SE de la France (d'après Piégay et al. 2009).	10
Figure 2 : Photos illustrant les structures morphologiques et sédimentaires typiques des sites d'étude : vues aériennes (drone) des lits en tresses de l'Arigéol (A) et de l'Asse (B) ; hétérogénéités granulométriques de surface des lits en tresses du Bès (C) et de la Béoux (D) ; vues vers l'amont. ...	11
Figure 3 : Exemples de placettes utilisées pour l'étalonnage sur le terrain du proxy granulométrique dérivé des nuages de points 3D : (A) parcelle de 1 m ² utilisée pour échantillonner un faciès dominé par des graviers, site de la Béoux ; (B) Parcelle de 4 m ² utilisée pour l'échantillonnage d'un faciès plus grossier, site de la Béoux ; le cadre en bois utilisé pour marquer les placettes, et la règle utilisée pour la mise à l'échelle des images sont visibles sur chaque photo.	12
Figure 4 : Méthodologie de caractérisation de la granulométrie de surface par exploitation d'images drone.....	15
Figure 5 : Filtrage des points de végétation par l'indice d'ExG sur la Drôme	18
Figure 6 : Comparaison des percentiles granulométriques calculés par Digital Grain-Size (DGS) et obtenus manuellement sous ImageJ ; les diagrammes du haut montrent les percentiles prédits et observés ; les diagrammes du bas montrent les courbes d'étalonnage des percentiles DGS (lignes continues); les lignes pointillées correspondent aux lignes d'égalité	19
Figure 7 : Courbes de calibration granulométriques à partir des percentiles de rugosité altimétrique ; la zone grise correspond à l'intervalle de confiance de prédiction à 95%	21
Figure 8 : Courbes de calibration granulométriques à partir de la rugosité altimétrique moyenne; la zone grise correspond à l'intervalle de confiance de prédiction à 95%	21
Figure 9 : Evaluation de la transposabilité du modèle granulométrique global aux rivières en tresses. Pour chaque graphique, la régression $D50 \sim Rh$ a été établie après exclusion du site mentionné en tête. Les points représentent les placettes du site exclu.....	22
Figure 10 : Section de l'Arigéol illustrant le potentiel de caractérisation de la granulométrie de surface par cartographie. (A) Ortho-mosaïque SfM (1.48 cm/pxl) ; (B) Caractérisation de la granulométrie de surface selon la classification de Wentworth projetée sur un MNT d'ombrage pour faciliter la lecture des macroformes de la tresse.	24
Figure 11 : Proportion des classes granulométriques pour chaque site	25
Figure 12 : Distribution de la granulométrie par classes d'altitude relative au centroïde du chenal principal de chaque rivière. Pour passer des Ψ aux mm : $D(\text{mm}) = 2^\Psi$. Le nombre d'individu constitutif des classes est donné en italique.	26
Figure 13 : Gradient longitudinal de la granulométrie de surface (en orange) et de l'altitude relative (en bleu) du chenal principal de l'Arigéol (A) et du Bouinenc (B).....	27

Table des Tableaux :

Tableau 1 : Principales caractéristiques physiques des 12 sites d'étude ; W* : largeur de bande active normalisée ; *Régimes hydrologiques méditerranéens ; ** régimes hydrologiques de fonte nivale ; *** régimes hydrologiques nivo-glaciaires	11
Tableau 2 : Métriques d'erreurs des nuages de points denses 3D.....	16
Tableau 3 : Résolution des restitutions photogrammétriques produites sur Agisoft Metashape	16
Tableau 4 : Métriques d'erreur des percentiles DGS obtenus après avoir appliqué un filtre médian ; la RMSE des courbes de calibrations calculées pour les différents percentiles est également fournie ...	20
Tableau 5 : Les six modèles granulométriques obtenus et leurs erreurs résiduelles calculées par validation croisée de type Jackknife.....	22
Tableau 6 : Erreur résiduelle calculée pour chaque site suite au Jackknife de validation. La métrique est calculée indépendamment pour chaque site en pondérant l'écart-type des résidus par le D50 moyen des placettes du site	23

Annexes

Annexe 1 : Relation $D_{50} \sim \overline{R\bar{h}}$ ajustée pour chaque site



Annexe 2 : Scrit R pour filtrer la végétation et les ruptures de pentes importantes des nuages de points.
L'indice pour le filtre ExG varier autour de 0.1 selon la végétation du site.

```
install.package('lidR')
install.package('terra')

##### Filtre vegetation

library("lidR")

setwd("")

Riviere <- readLAS("Riviere.laz")
Riviere <- filter_duplicates(Riviere)

r <- Riviere$R/(Riviere$R+Riviere$G+Riviere$B)
g <- Riviere$G/(Riviere$R+Riviere$G+Riviere$B)
b <- Riviere$B/(Riviere$R+Riviere$G+Riviere$B)
ExG <- 2*g-r-b
rm(list=c("r","g","b"))

Riviere_bis <- add_attribute(Riviere, ExG, "Index_vege")
Riviere_index <- filter_poi(Riviere_bis, Index_vege<0.1)

rm(list=c("Riviere_bis","ExG","Riviere"))

### Filtre pente

library("terra")

# Slope

setwd("//grdata/DRONES/Projets/Imacode/CDD/RiviereBleone/Raster")
Riviere <- rast("Riviere_DEM.tif")

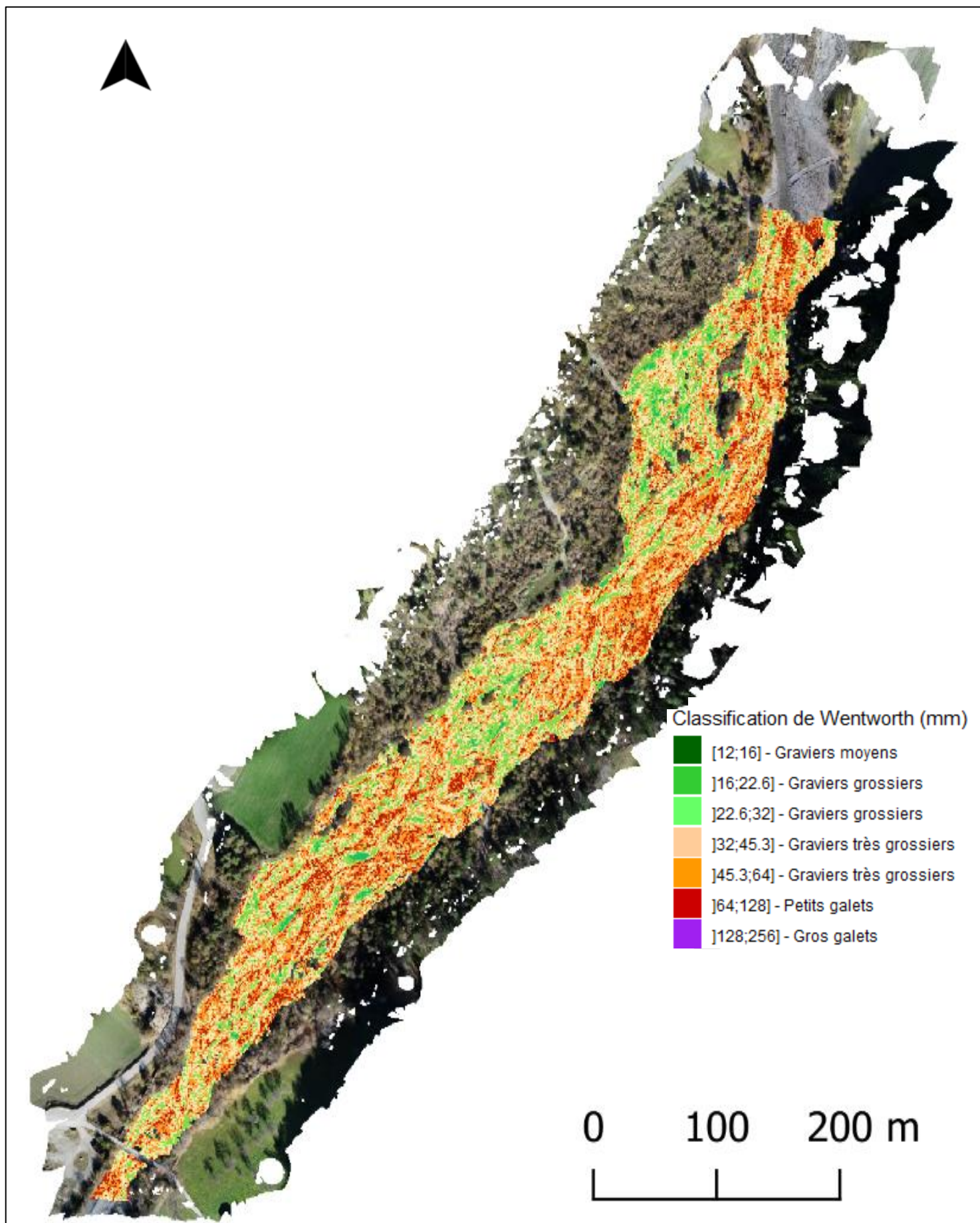
Riviere_terrain <- terrain(Riviere, "slope", neighbors = 8, unit="degrees")
Riviere_grid <- Riviere
res(Riviere_grid) <- 1
Riviere_slope <- resample(Riviere_terrain, Riviere_grid, method="rms")

# LAZ

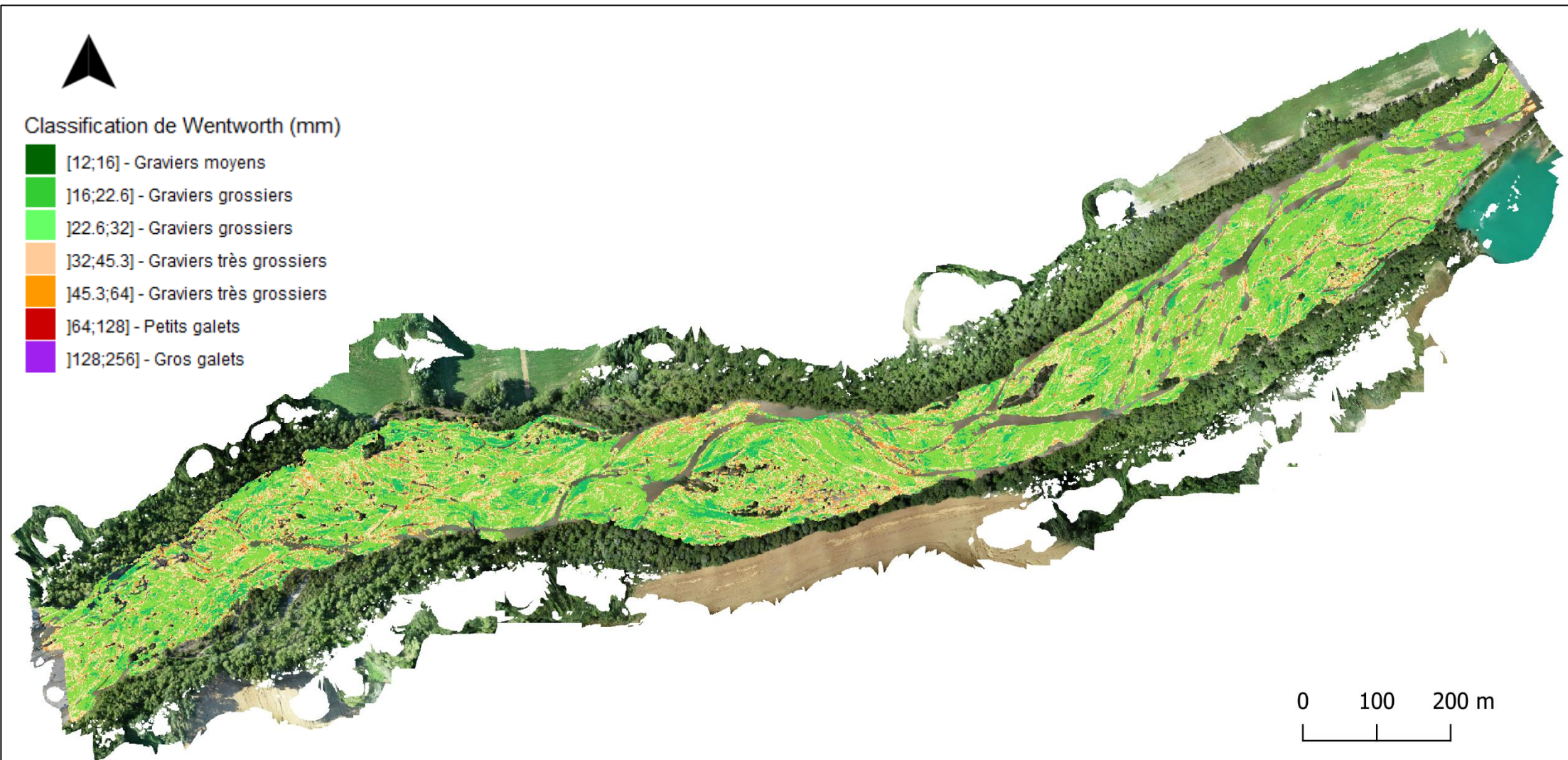
setwd("")

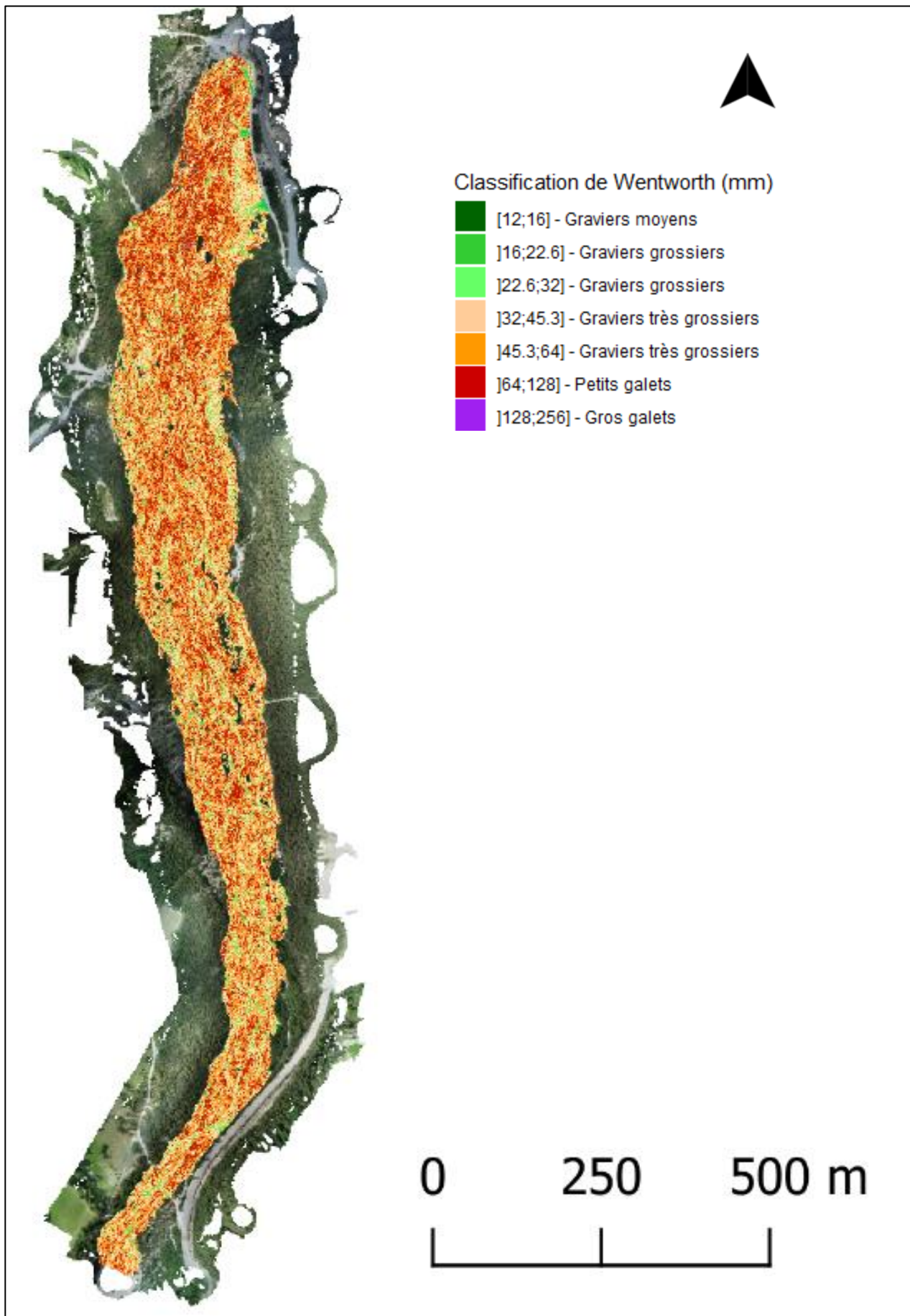
Riviere_filtering <- merge_spatial(Riviere_index, Riviere_slope, "slope")
Riviere_filtered <- filter_poi(Riviere_filtering, slope <= 30.96)
summary(Riviere_filtered)

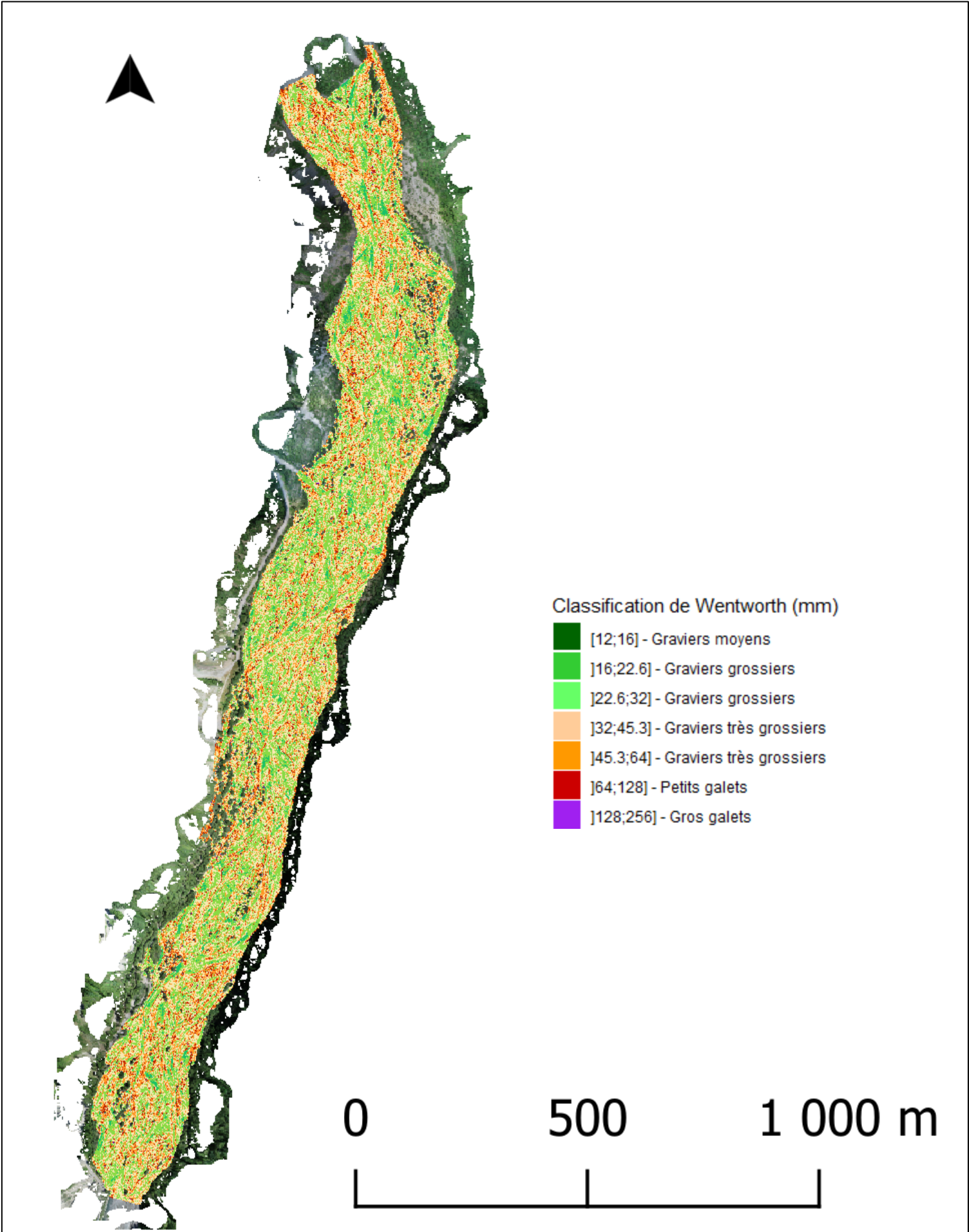
writeLAS(Riviere_filtered, "Riviere_filtered_rms_31.laz")
```



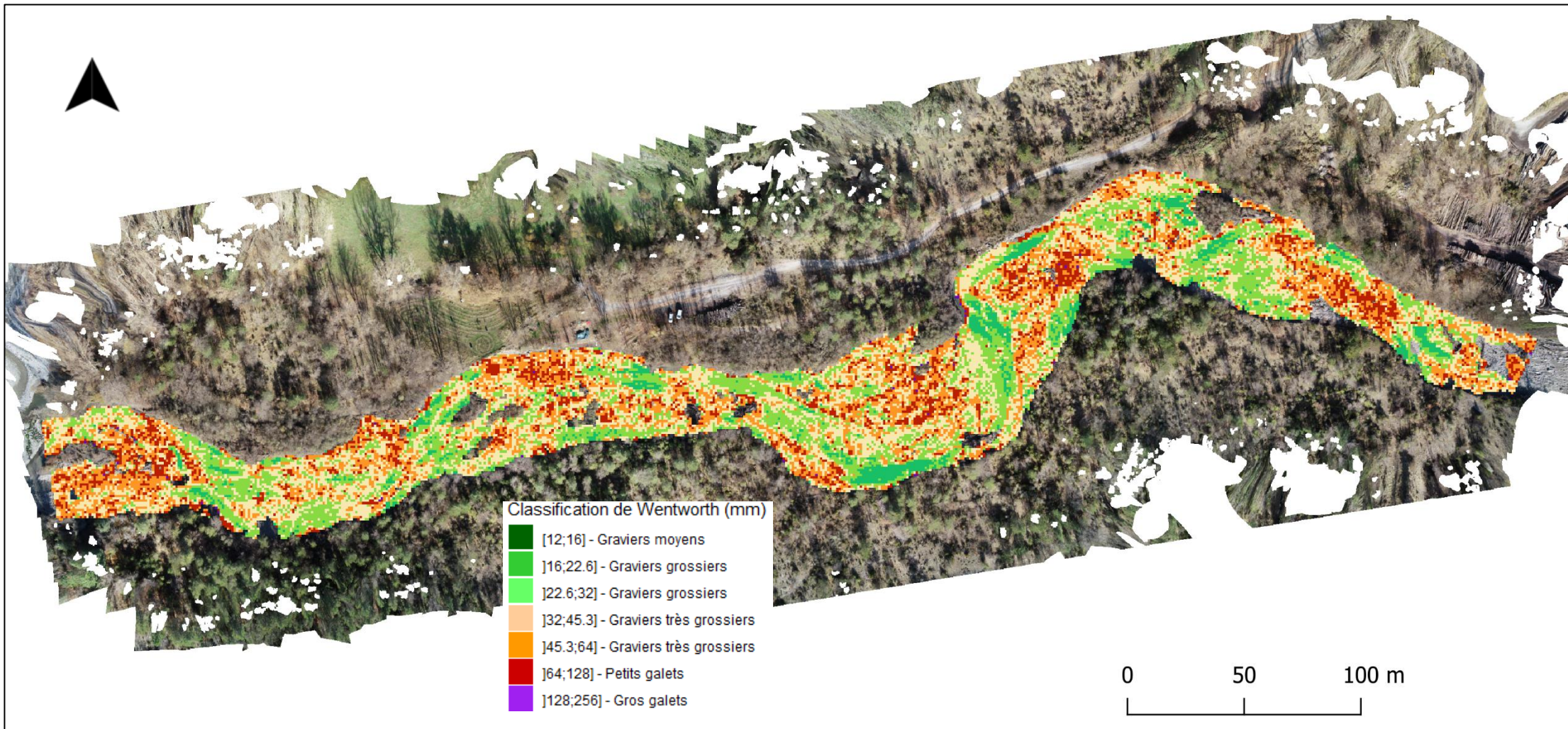
Annexe 4 : Cartographie de la granulométrie de surface de l'Asse



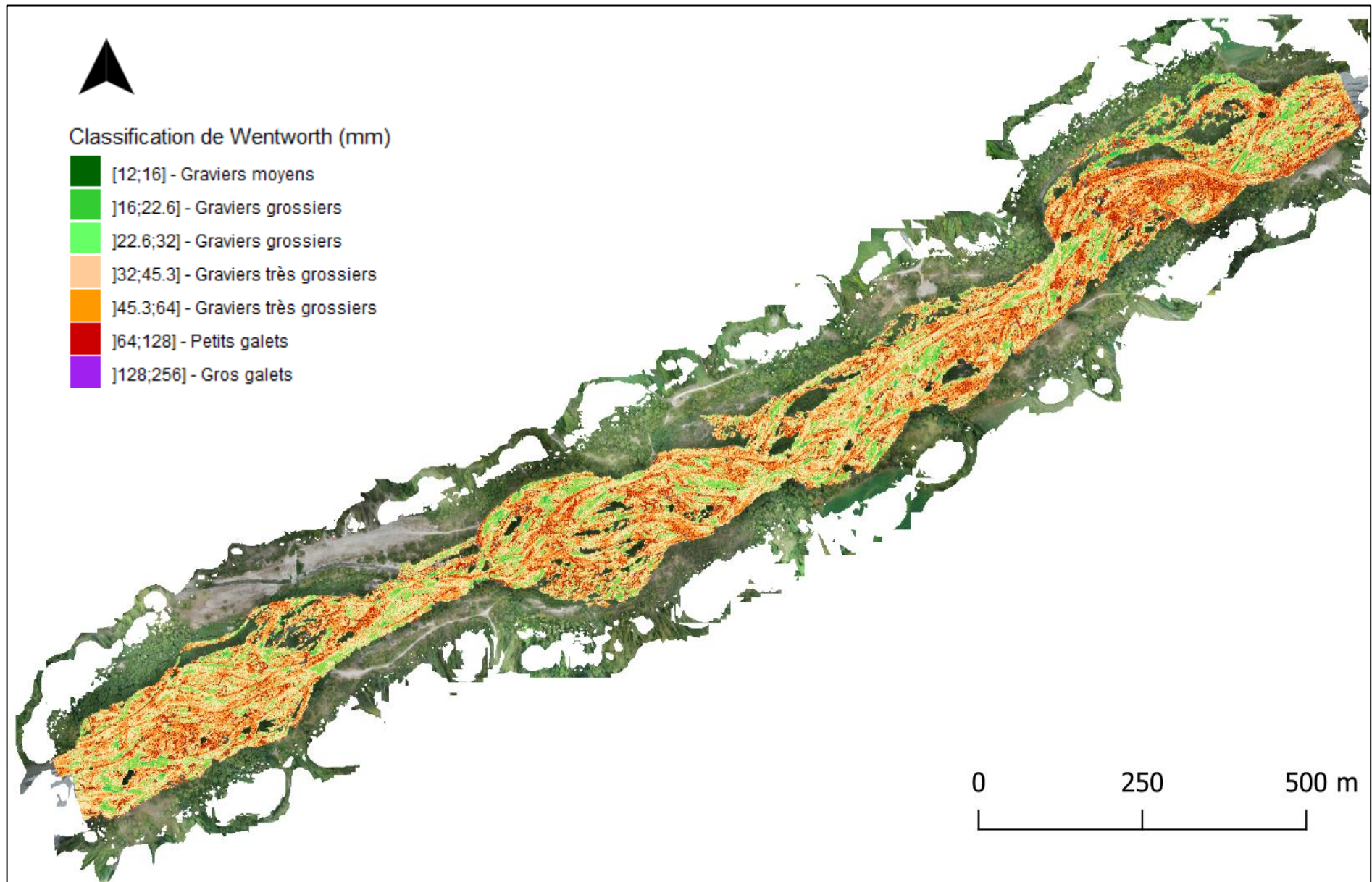


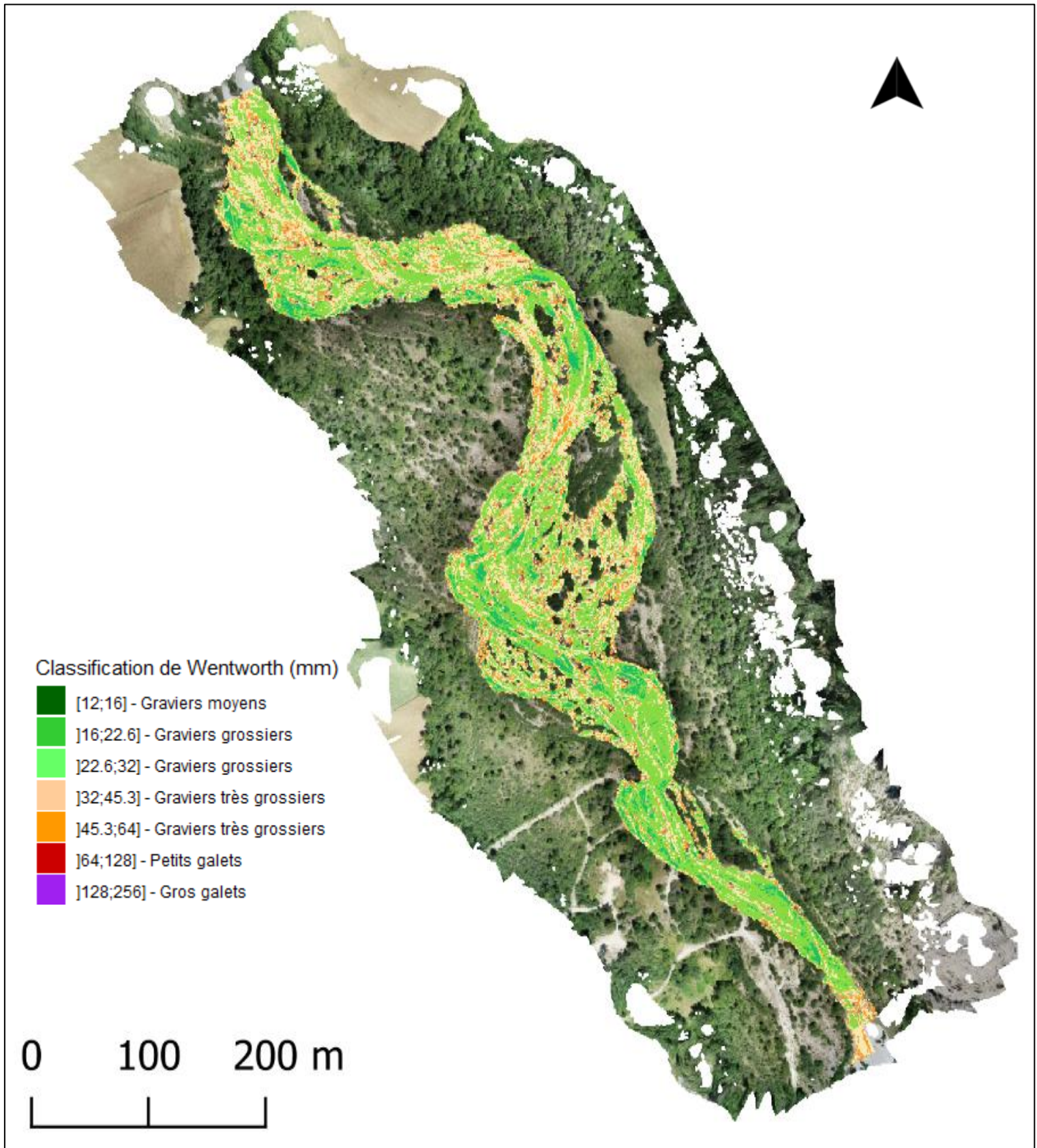


Annexe 7 : Cartographie de la granulométrie de surface du Bouinenc



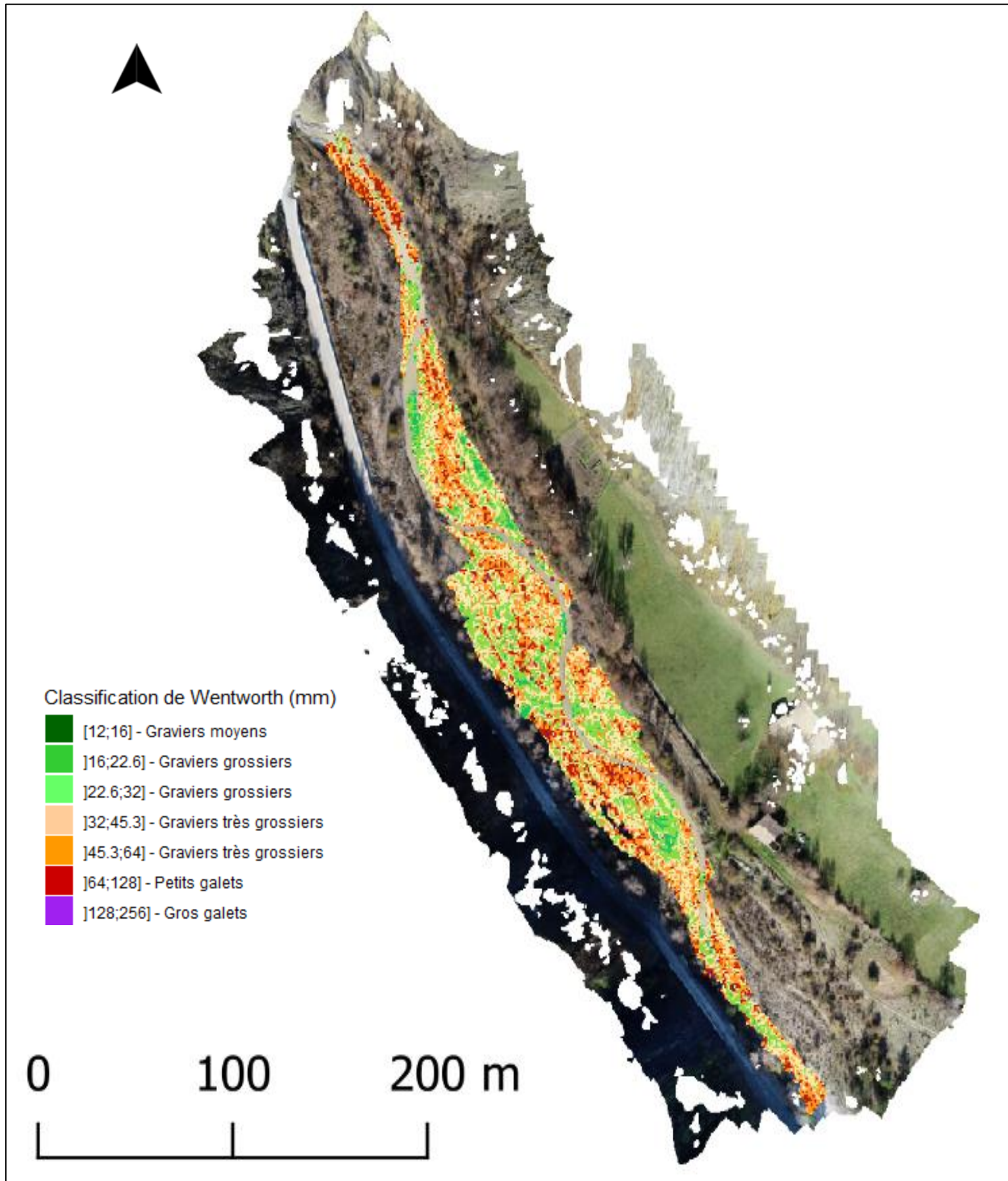
Annexe 8 : Cartographie de la granulométrie de surface du Drac

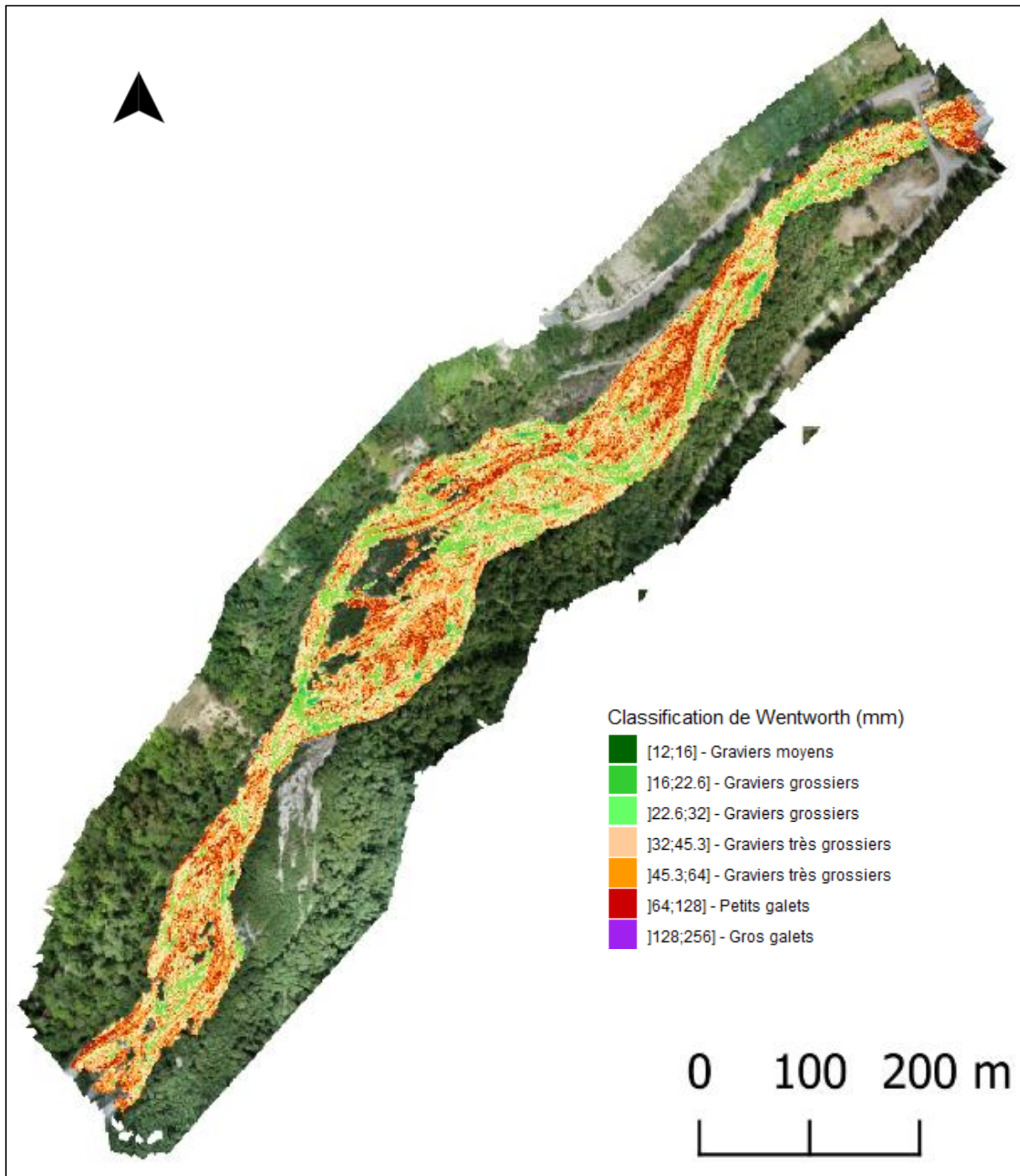




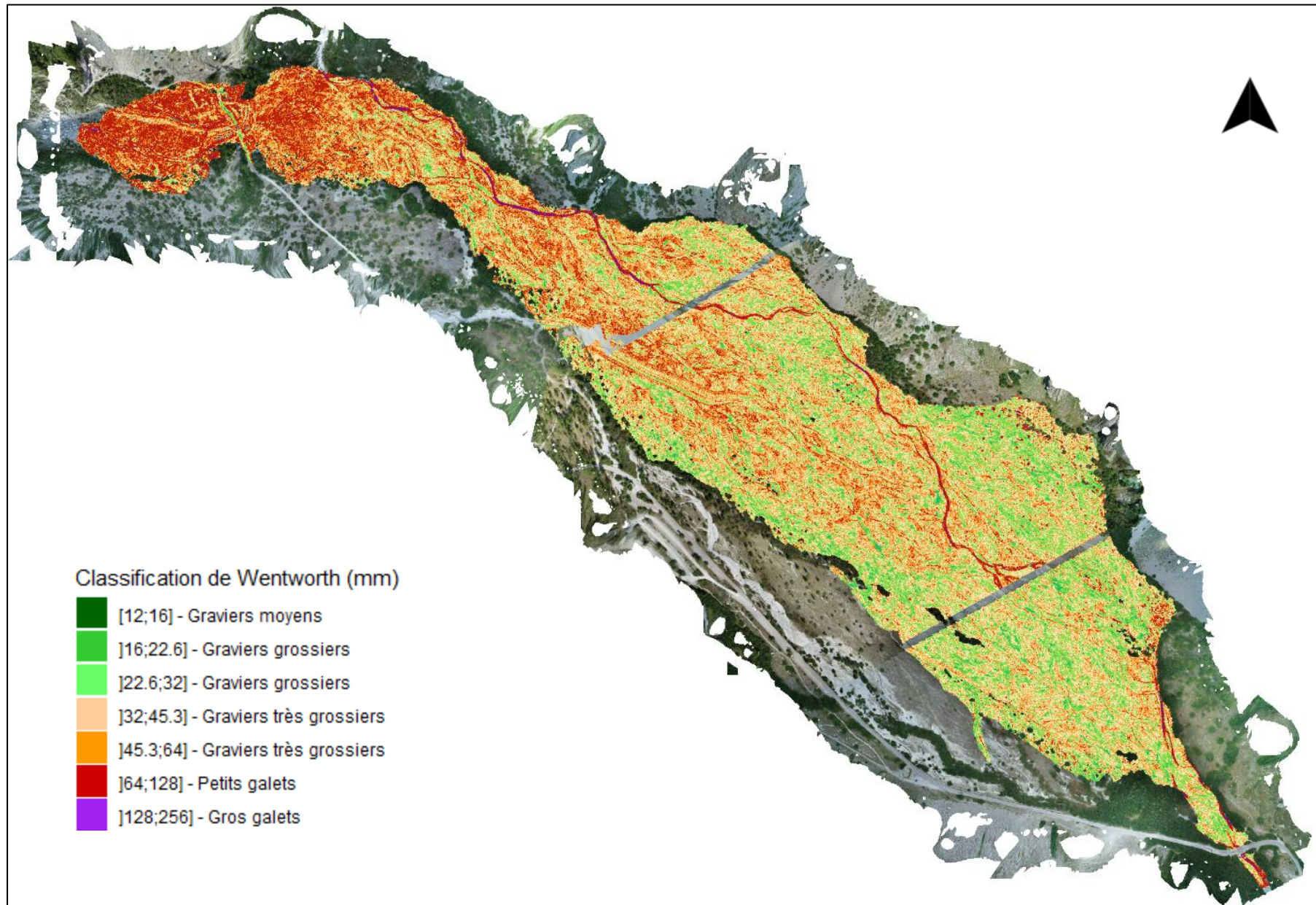








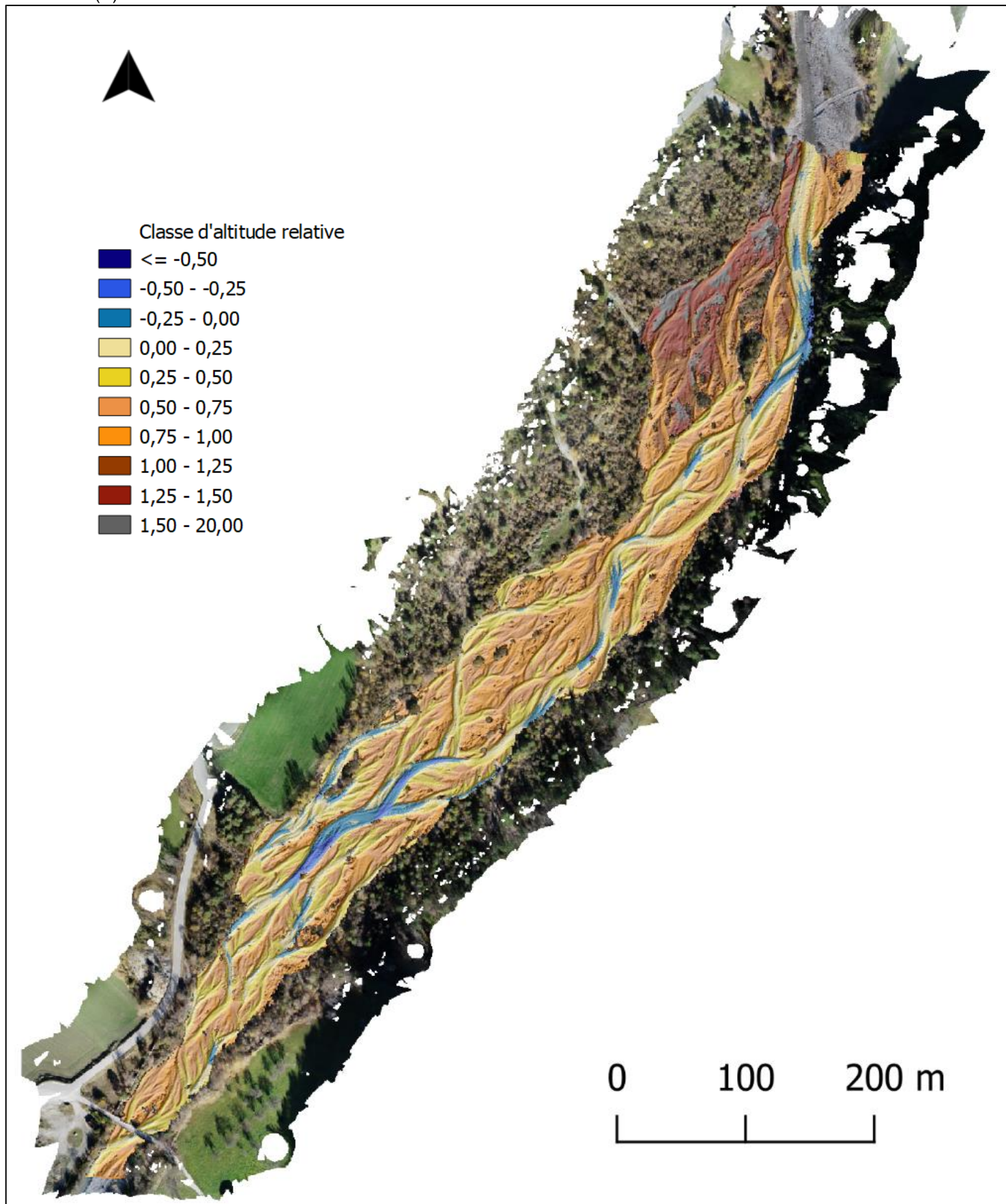
Annexe 14 : Cartographie de la granulométrie de surface de Saint-Pierre



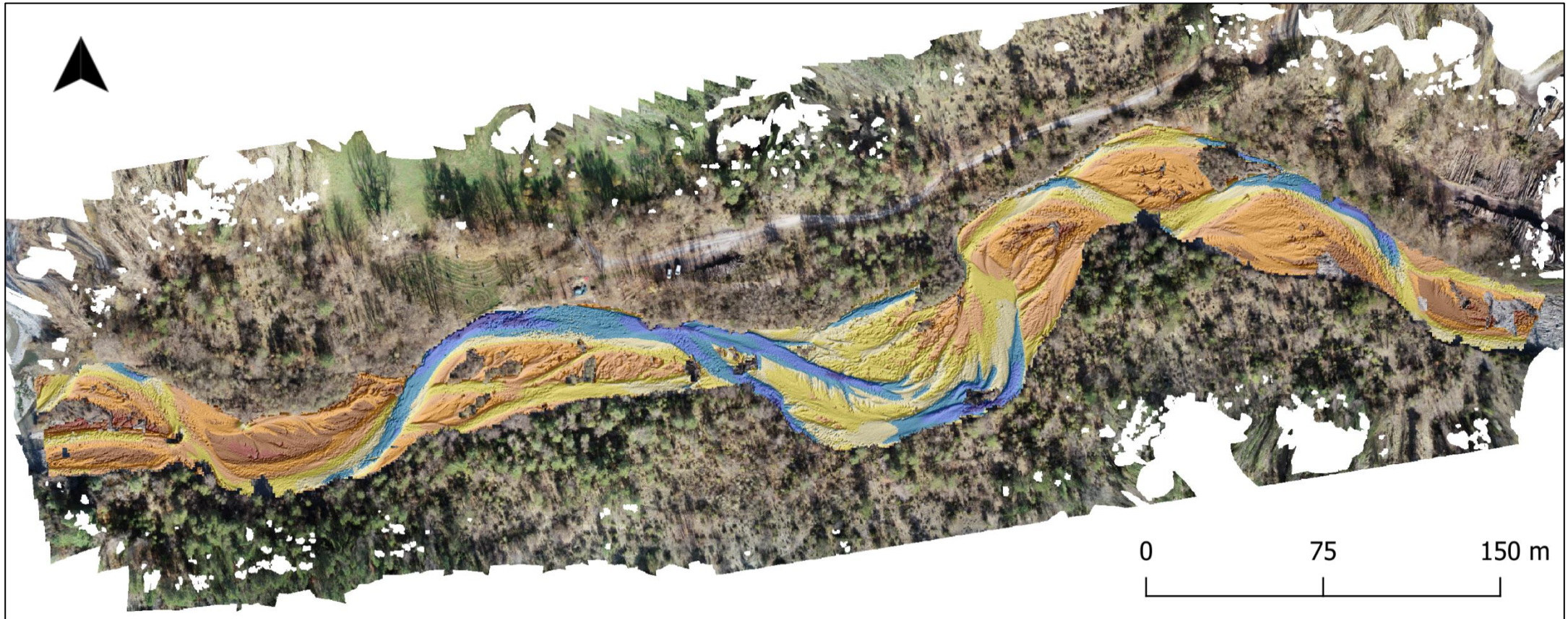
Annexe 15 : MNS d'altitude relative au centroïde du chenal principal de chaque rivière. (A) Arigéol ; (B) Bouinenc ; (C) Drac

© IMACODE

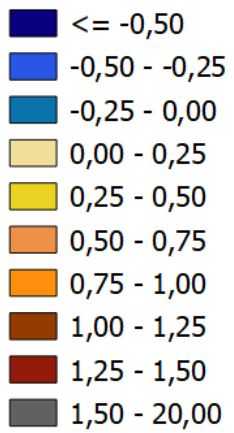
(A)



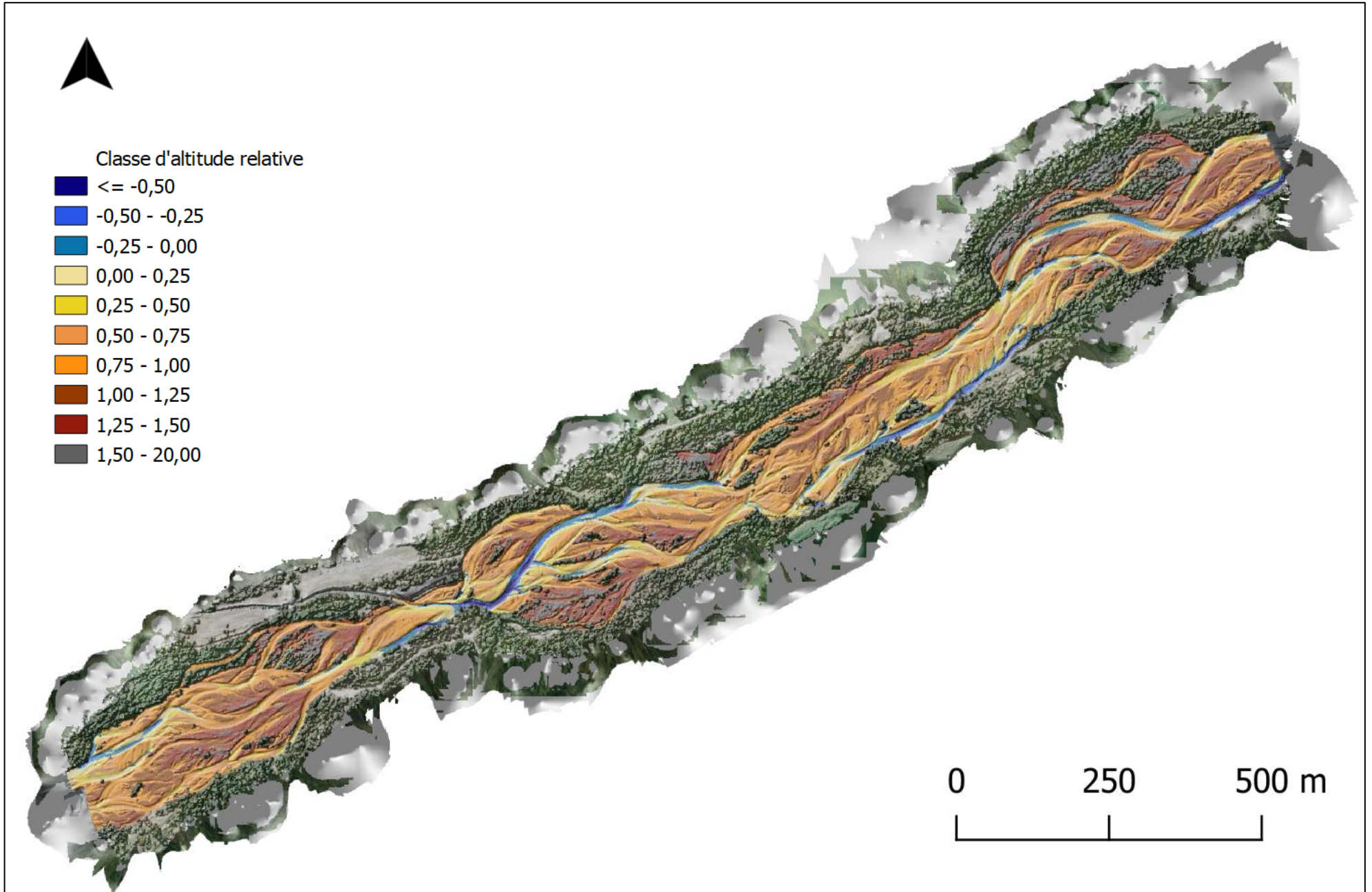
(B)



Classe d'altitude relative



(C)



INRAE – Siège d’Antony

1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex

01 40 96 61 21

www.inrae.fr

Office Français pour la Biodiversité

Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.ofb.gouv.fr