



HAL
open science

Détermination automatique de la granulométrie des remblaiements alluviaux : Exploration du potentiel des données images et LiDAR iPhone

Adèle Coatanéa

► **To cite this version:**

Adèle Coatanéa. Détermination automatique de la granulométrie des remblaiements alluviaux : Exploration du potentiel des données images et LiDAR iPhone. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04783019

HAL Id: dumas-04783019

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04783019v1>

Submitted on 14 Nov 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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITÉ : Géomètre et Topographe

par

COATANÉA Adèle

Détermination automatique de la granulométrie des remblaiements alluviaux :
Exploration du potentiel des données images et LiDAR iPhone
Soutenu le 4 septembre 2024

JURY

Monsieur Ousmane DIOUF	Président du jury
Monsieur Thomas DEPRET	Maître de stage
Monsieur Pierre KERVELLA	Enseignant référent

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des personnes ayant contribué au succès de mon travail de fin d'études.

Je souhaite tout particulièrement remercier mon maître de stage, Monsieur Thomas Dépret, pour sa disponibilité constante, confiance et patience qu'il m'a témoignée. Ses conseils avisés et le temps qu'il a consacré à l'accompagnement de mon travail ont été inestimables.

Je tiens à remercier Alexandre Retat pour son aide continue tout au long de mon stage et pour son soutien. Son assistance et sa patience ont été d'une grande valeur tout au long de ce processus.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Élise Delacotte, dont le soutien moral, la motivation qu'elle m'a donnée et le cadre serein qu'elle m'a offert pour travailler ont été déterminants dans l'achèvement de ce projet.

Je voudrais également exprimer ma gratitude à Matcha Coatanéa, qui m'a apporté du réconfort durant les moments les plus difficiles.

Je souhaite aussi exprimer ma reconnaissance envers les personnes qui m'ont aidé dans la correction de mon mémoire. Leur expertise et leurs suggestions ont été essentielles pour améliorer la qualité de mon travail.

Enfin, je souhaite exprimer un remerciement tout particulier à ma famille. Son soutien inconditionnel, son encouragement constant et sa compréhension ont été essentiels pour me permettre de parvenir jusqu'ici dans mes études

Glossaire

iPhone : smartphones créés par l'entreprise Apple.

Sédiments : ensemble de particules qui étaient précédemment en suspension dans l'eau, l'atmosphère ou la glace, et qui se sont déposées en raison de la gravité.

Lit des rivières : espace occupé par un cours d'eau, de manière permanente ou occasionnelle. Il se compose de deux entités, le lit mineur qui est la partie du lit où l'eau s'écoule habituellement et le lit majeur (ou plaine alluviale) qui est la zone inondée uniquement lors des périodes de crues.

Berges des rivières : unité morphologique faisant la transition entre lit mineur et plaine alluviale.

Granulométrie : distribution des tailles de sédiments.

Centiles : valeurs qui divisent un ensemble de données en cent parts égales. Chaque centile représente une position dans la distribution des données indiquant le pourcentage de données en dessous de cette valeur.

Liste des abréviations

G3Point: Granulometry from 3D Point clouds

SfM: Structure from motion

3D: trois dimensions

LiDAR: Light Detection and Ranging

Axe a: axe long du grain

Axe b : axe moyen du grain

Axe c : petit axe du grain

D : diamètre des mailles du tamis

ψ_{pi} ; indices de Sneed and Folk

Unité Φ : échelle logarithmique de base 10, soit $\Phi = \log_{10}(D)$ où D est le diamètre en millimètres.

Φ_x : diamètre du centile x en Φ unités

y_i : fréquence de la classe i

$dmax\Phi_i$: diamètre maximum (en Φ unités) de la classe i

$centile_x$: le centile recherché

D_x : diamètre du centile x en mm

D5, D10, D16, D25, D50, D75, D84 et D90 : 5e, 10e ... centiles

Table des matières

I	LA MESURE DE LA GRANULOMETRIE DES BERGES DE RIVIERES : ETAT DE L'ART	9
I.1	ORIENTATION DES GRAINS DES BERGES DE RIVIERES	9
I.2	ECHANTILLONNAGE DES DONNEES.....	10
I.3	OUTILS MODERNES POUR REPRESENTER LA SURFACE DES TERRAINS	10
I.3.1	Photographies, une représentation 2D	10
I.3.2	Photogrammétrie, une reconstruction 3D du terrain	11
I.3.3	LiDAR, une construction en temps réel 3D du terrain.....	11
I.4	METHODES DE DETERMINATION DE LA GRANULOMETRIE	11
I.4.1	Approche traditionnelle, une analyse in situ	12
I.4.1.1	Mesure manuelle	12
I.4.1.2	Tamissage des sédiments	12
I.4.2	Approche moderne, une analyse avec des outils informatiques.....	13
I.4.2.1	Approche directe	13
I.4.2.2	Approche indirecte	14
II	MATERIEL ET METHODE	17
II.1	ACQUISITIONS DES DONNEES.....	17
II.1.1	Données de référence.....	18
II.1.2	Données iPhone	18
II.2	TRAITEMENT DES DONNEES DE L'IPHONE.....	19
II.2.1	Données LiDAR	19
II.2.2	Données photogrammétriques	20
II.3	G3POINT, UN PROGRAMME D'ESTIMATION DE LA GRANULOMETRIE	21
II.3.1	Description de l'algorithme	21
II.3.1.1	Principe du programme	21
II.3.1.2	Les paramètres de G3Point.....	22
II.3.2	Technique de comparaison	24
II.3.3	Choix du diamètre mesuré par G3Point.....	25
III	RESULTATS	26
III.1	VOLUMETRIE ET SPHERICITE DES PARTICULES	26
III.2	COMPARAISON DES NUAGES DE POINTS SfM/LiDAR.....	27
III.3	ESTIMATION DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE	28
IV	DISCUSSION	33
V	CONCLUSION	35
	Bibliographie	37
	Liste des figures.....	43
	Liste des tableaux	44

Introduction

La granulométrie représente la distribution des tailles de particules constituant les matériaux sédimentaires. L'alimentation des rivières en sédiments grossiers est pour l'essentiel assurée par les processus d'érosion de berges, qui permettent la réinjection de particules de la plaine alluviale vers le lit mineur. Or ces caractéristiques ont un impact sur la biodiversité et la qualité des habitats aquatiques (Malavoi et al., 2010). La taille des grains contrôle les processus d'érosion et de transport des sédiments. Elle influence la stabilité des berges et leur résistance à l'érosion. Elle affecte la mobilité latérale des cours d'eau, avec des implications directes sur la morphologie du lit et la dynamique des écoulements. Déterminer la granulométrie des sédiments des berges, c'est-à-dire, la distribution de leur taille, s'avère ainsi indispensable dans l'optique d'une meilleure compréhension de ces systèmes. Ainsi l'amélioration des connaissances et des méthodes d'analyse de ces paramètres permettant de caractériser la distribution granulométrique du matériel composant les berges constitue un enjeu majeur.

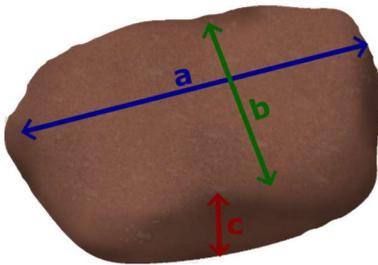


Figure 1 : Axes des sédiments, a l'axe le plus long, b l'axe moyen, c le plus petit

Dans l'étude de la granulométrie, les particules sont caractérisées par trois axes, visibles sur la figure 1. La taille des particules correspond à leur axe b car c'est ce dernier qui contrôle le passage des sédiments à travers les mailles des tamis, le tamisage étant une méthode souvent employée pour la granulométrie.

Pour approfondir la compréhension de ces dynamiques, l'étude de la quantification de la détermination de la granulométrie peut être réalisée à l'aide de diverses approches. Les méthodes plus traditionnelles telles que le tamisage offrent d'excellents résultats mais sont très chronophages, limitant ainsi la caractérisation granulométrique à une emprise spatiale restreinte. Cependant, ce sont ces techniques qui restent encore largement utilisées sur le terrain. Les développements méthodologiques récents ouvrent des perspectives prometteuses pour des analyses plus efficaces et tout aussi précises. L'utilisation de nouveaux outils, tels que les drones et la photographie, permet de couvrir des surfaces bien plus grandes en moins de temps. Cependant, cela pose la question du traitement des données acquises. Plusieurs méthodes existent, utilisant soit les photos, soit les données 3D.

Nous avons choisi une méthode semi-automatique préexistante, parce qu'elle est plus facile à utiliser que les méthodes automatiques reposant sur l'intelligence artificielle, qui nécessitent des connaissances plus approfondies. De plus, cette méthode a montré des résultats très intéressants sur des lits de rivière. G3Point, l'outil choisi pour cette étude, a été créé par Steer et al. (2022) et permet d'estimer la granulométrie par segmentation de nuages de points pour identifier les grains individuellement.

Pour générer un modèle 3D du terrain nécessaire notamment à l'utilisation de G3Point on peut recourir à 3 techniques : l'utilisation de caméras en employant la méthode Structure from Motion (SfM), l'utilisation d'un laser terrestre ou aéroporté, ou encore l'utilisation d'un LiDAR (Light Detection And Ranging). En raison de la nécessité de couvrir de grandes surfaces pour obtenir une granulométrie plus représentative, l'utilisation de drones répond efficacement et permet également d'acquérir des données sur des terrains difficiles d'accès. Mais cela génère un volume plus grand de données à traiter, nécessitant des méthodes de traitement automatisées. Pour trouver et valider une méthode adaptée à un modèle 3D, nous commençons par tester un outil à bas prix qui permet de réaliser à la fois de la photogrammétrie et du LiDAR, à savoir l'iPhone.

Ce capteur LiDAR a été intégré sur les derniers modèles iPhone pro (12, 13 et 14) et sur l'iPad pro. Il est d'abord destiné à améliorer le rendu en réalité augmentée et pour les photos en basse luminosité. C'est une solution intéressante car elle est relativement peu coûteuse et facile d'utilisation. Ce travail s'inscrit dans la continuité d'un TFE précédemment réalisé par Xavier Dubiez (2024), qui a montré des résultats très prometteurs pour mesurer l'érosion des berges de rivières avec le LiDAR de l'iPhone.

Comme expliqué précédemment, il est essentiel de déterminer la granulométrie des sédiments des berges des rivières. Il est donc important de valider une méthode permettant de déterminer la taille et le volume de ces sédiments. L'objectif de cette étude est donc d'explorer le potentiel de données photographiques et LiDAR iPhone pour la détermination automatique de la granulométrie des berges de rivières. Les méthodes traditionnelles, telles que le tamisage, sont encore largement utilisées sur le terrain. Nous examinerons pourquoi une méthode automatique pourrait être prometteuse dans ce contexte. Ces données nous permettront donc de tester G3Point. Cependant, ce programme n'a pas été testé sur les berges qui présentent une complexité supérieure liée à l'orientation des grains et à la présence d'une matrice fine plus abondante.

La méthode sera comparée à un échantillonnage volumétrique sur deux sites d'étude, le Cher et l'Armançon, présentant des formes de sédiments différents. Les particularités des deux sites permettront d'étudier comment la sphéricité des sédiments affecte le calcul granulométrique.

Dans un premier temps, il est essentiel de comprendre la spécificité des berges de rivières et l'utilisation des outils de mesure. Nous aborderons les techniques traditionnelles et modernes pour mesurer les sédiments des berges. Une synthèse des études sur les différentes approches automatiques de la granulométrie sera réalisée, afin de présenter en détail les raisons du choix de G3Point. Ensuite, nous présenterons les différents sites d'étude et les méthodes appliquées sur le terrain. Nous décrirons ensuite l'algorithme G3Point et notre utilisation de celui-ci. Enfin, nous comparerons les résultats obtenus par le programme avec notre référence terrain.

I La mesure de la granulométrie des berges de rivières : Etat de l'art

Pour déterminer la granulométrie des berges, nous commencerons par comprendre l'importance de l'orientation des grains par rapport aux grains déposés dans les lits de rivières. Ensuite, nous examinerons comment sélectionner les particules à mesurer. Les techniques modernes nécessitant une représentation 2D ou 3D du terrain, nous verrons quels outils utiliser pour cela. Nous aborderons ensuite les techniques de calcul des axes, en commençant par les méthodes traditionnelles puis par les méthodes modernes.

I.1 Orientation des grains des berges de rivières

Dans le cas des rivières, les sédiments se déposent au fond du lit de telle sorte que leurs axes a et b se trouvent dans un plan parallèle au lit, tandis que l'axe c est situé dans un plan perpendiculaire au fond du lit (figure 2). Contrairement aux grains observés sur le lit des rivières, où les axes principaux (a et b) peuvent être facilement mesurés (figure 2), les grains sur une berge verticale ne permettent de voir que l'axe c. L'axe horizontal visible, axe b/a sur la figure 2, ne peut pas être défini précisément car il dépend de l'orientation du grain. Ce qui peut nécessiter une correction lorsque l'on travaille avec des données acquises pour pouvoir estimer l'axe-b. Cette correction dépend de la forme globale des sédiments. Plus les sédiments vont avoir une forme sphérique, plus l'axe horizontal visible mesuré va s'approcher de l'axe b.

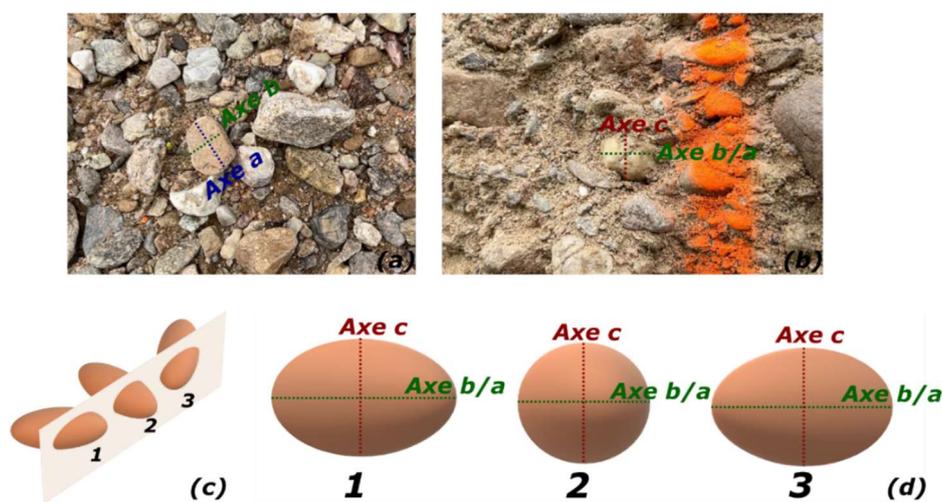
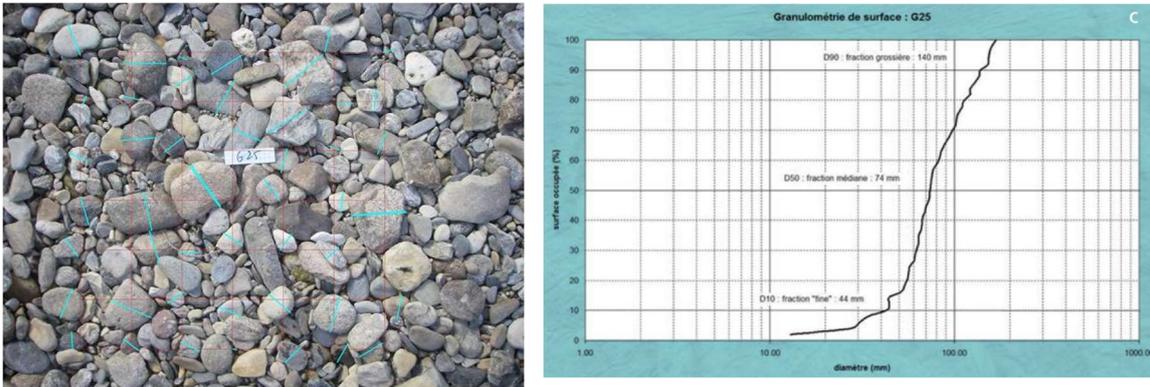


Figure 2 : Comparaison des axes visibles des grains sur le lit et sur la berge de la rivière du Cher et représentation de l'orientation des grains dans la berge ; (a) photo du lit de la rivière avec l'axe a et b visibles (b) photo de la berge de la rivière avec l'axe c visible et l'axe b/a difficile à définir à l'exactitude ; (c) positionnement des 3 grains du schéma (d) ; (d) différence entre les axes visibles des 3 grains identiques

I.2 Echantillonnage des données

Les particules mesurées peuvent être échantillonnées de deux manières différentes soit un échantillonnage de surface soit un échantillonnage volumétrique.

L'échantillonnage de surface consiste à prélever un nombre prédéfini de particules dans une zone définie. (Bunte et al., 2001). Une des méthodes d'échantillonnage de surface est celle dite de Wolman qui consiste à prélever 100 particules par rapport à une grille présentée dans la figure 3 et à mesurer à minima l'axe b, sinon les 3 axes. A partir de cela, on peut obtenir une courbe des courbes des fréquences cumulées visualisable dans la figure 3.



Les échantillons volumétriques consistent à extraire un volume ou une masse prédéfinie à partir d'une couche sédimentaire d'une épaisseur donnée. La méthode de Wolman ou décompte en grille produit des résultats directement comparables à un échantillonnage volumétrique (Bunte et al., 2001).

I.3 Outils modernes pour représenter la surface des terrains

I.3.1 Photographies, une représentation 2D

Cette technique consiste à prendre des photos le long du terrain, avec ou sans grille, la grille permettant d'avoir une échelle pour les mesures. Elle ne nécessite pas d'outils coûteux seulement un appareil photo, qu'il soit monté sur un drone ou non. Cette technique permet une reconstruction sans nécessiter de prétraitement. Cependant, elle peut poser des problèmes importants lors du traitement, en raison de l'imbrication des grains et des ombres qui empêchent une visualisation complète des grains. Dans certaines zones,

elle peut s'avérer inappropriée si les grains sont partiellement enterrés ou imbriqués. (Butler et al., 2001 ; Graham et al., 2010 ; McEwan et al., 2000 ; Sime et al., 2003).

I.3.2 Photogrammétrie, une reconstruction 3D du terrain

Avec des techniques de photogrammétrie et de Structure from Motion (SfM), il est possible de reconstituer un modèle 3D du terrain. Ce modèle 3D permet d'analyser la granulométrie en prenant en compte la rugosité des grains et en offrant une vue plus complète. Cependant, cette méthode peut nécessiter un prétraitement assez long et requiert un grand nombre de photos. Le prétraitement peut rencontrer des difficultés en raison de l'imbrication des grains et des ombres. Les UAV (véhicule aérien sans équipages) permettent une reconstitution de la scène en mouvement. Ils permettent aussi de couvrir plus facilement de longues portions de rivières.

I.3.3 LiDAR, une construction en temps réel 3D du terrain

Le LiDAR, une technologie de mesure haute fréquence, permet une représentation détaillée grâce à son capteur actif. Ce capteur mesure la distance entre lui-même et une surface en émettant une impulsion lumineuse et en captant le signal réfléchi par cette surface. De nombreux outils utilisent la technologie LiDAR, tels que les scanners terrestres 3D. Ces technologies sont souvent très coûteuses. Cependant, de nouvelles solutions LiDAR à bas coût ont été développées récemment.

En effet, avec la sortie de l'iPad Pro en mars 2020, suivie par l'iPhone 12 Pro, les appareils iPhone ont introduit une nouvelle fonctionnalité : un capteur LiDAR intégré. Ce capteur est un LiDAR à semi-conducteurs (SSL). Cette technologie prometteuse présente un grand avantage par rapport aux appareils LiDAR traditionnels : son coût réduit et sa facilité de déploiement (Teppati Losè et al., 2022). Comme la photogrammétrie et la photographie, le LiDAR peut être utilisé avec un drone ou un avion.

I.4 Méthodes de détermination de la granulométrie

Traditionnellement on vient prélever les sédiments. C'est une méthode de mesure chronophage et il est difficile de couvrir un grand terrain (Warrick et al., 2009). Depuis les années 70 sont utilisées des méthodes de 'photo-tamissage' (Bunte et al., 2001). Elles consistent à mesurer un certain nombre de grains sur une/des image(s). Avec l'arrivée des méthodes de reconstruction 3D, le traitement des nuages de points a ouvert de nouvelles

possibilités pour l'analyse des axes des grains. Dans le traitement de nos données en 2D ou 3D, la détermination des axes se faisait autrefois manuellement. Aujourd'hui, l'utilisation de méthodes automatiques ou semi-automatiques permet de réduire considérablement le temps de traitement. Les analyses plus traditionnelles sont encore couramment utilisées en raison de leur grande précision. Elles permettent également d'obtenir des vérités terrain lorsque des traitements modernes sont appliqués.

Notre étude, axée sur les données produites par l'iPhone, souligne l'importance de se pencher sur les techniques capables de mesurer les différents axes des grains présents dans des nuages de point 3D. Nous commencerons par présenter deux approches traditionnelles pour mesurer les axes des grains, puis nous explorerons diverses méthodes modernes.

I.4.1 Approche traditionnelle, une analyse in situ

I.4.1.1 Mesure manuelle

On peut venir mesurer directement les axes de nos particules avec un pied à coulisse, ou une règle ou alors utiliser des gabarits, qui sont une fine planche d'aluminium ou de plastique avec de nombreux trous ronds ou carrés dont les dimensions correspondent aux bornes des classes granulométriques. Ou encore utiliser une 'boîte à cailloux' qui a été développée par Ibbeken et al. (1988).

I.4.1.2 Tamisage des sédiments

Après avoir prélevé les particules, celles-ci sont triées par classes en utilisant une série de tamis superposés, dont les mailles vont de la plus large à la plus fine comme sur la figure 4. Les tamis permettent de mesurer d'axe b des particules retenues par ce tamis.

Puis on vient calculer la fréquence de chaque classe en mesurant le poids de chaque groupe de particules retenues par les tamis. Les diamètres des trous des tamis progressent suivant une règle logarithmique de base deux, c'est-à-dire : $D = 2^x$. La valeur de x augmente généralement de 0.5.

Cette méthode, utilisant un échantillonnage volumétrique, donne des résultats similaires à une méthode de mesure utilisant un échantillonnage par grille de Wolman.

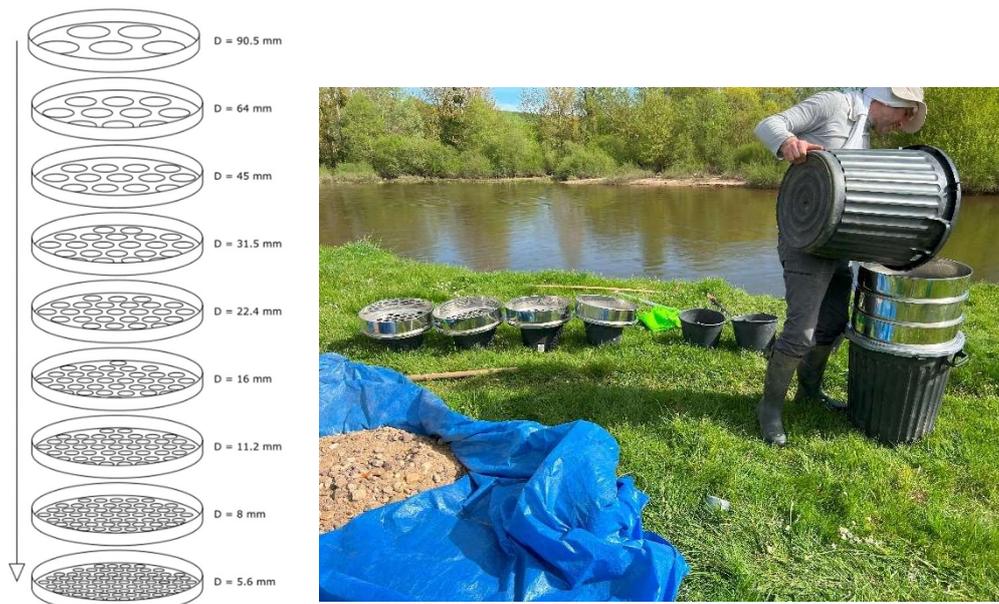


Figure 4 : Schéma du tamisage des grains grossiers et photo de terrain du tamisage

I.4.2 Approche moderne, une analyse avec des outils informatiques

I.4.2.1 Approche directe

L'approche directe ou approche objet permet de calculer les axes des grains en analysant directement les axes visibles dans les données (images ou nuages) ou après segmentation des données.

Analyse directe des axes :

Cette approche repose en grande partie sur des techniques de photo-tamisage, telles que le logiciel Digital Grain Size développé par Chardon et al. (2020) (tableau 1). Cette méthode permet une analyse manuelle des tailles des grains en utilisant des images numériques. C'est une approche qui a tendance à sous-estimer pour les berges de rivières (environ de 17%) les axes les plus longs sur les photos par rapport à une mesure réalisée au pied à coulisse car elle ne prend pas en compte la disposition des grains (Garefalakis et al., 2023). En effet, du fait de l'imbrication des particules, on n'observe pas l'entière des grains ce qui réduit la mesure des axes.

Analyse par segmentation d'images :

Cette méthode utilise des données images et peut être réalisée de manière automatique ou à l'aide de techniques d'apprentissage profond, notamment les réseaux de

neurones convolutifs. Les travaux de Mörtl et al. (2022), Takechi et al. (2021), Miazza et al. (2024), ainsi que Buscombe (2019) fournissent des exemples de telles approches. (Tableau 1)

Analyse par segmentation de nuages de points :

Cette approche concerne les données en trois dimensions (3D) et peut être effectuée de manière semi-automatique ou en utilisant des techniques d'apprentissage profond. Les méthodes décrites par Steer et al. (2022) et Walicka (2022) sont représentatives de cette catégorie (tableau 1).

I.4.2.2 Approche indirecte

L'approche indirecte consiste à estimer la taille des grains en fonction de leurs caractéristiques texturales et de l'arrangement spatial des intensités de pixels.

Méthodes basées sur les caractéristiques statistiques

On peut utiliser les propriétés des statistiques d'intensité des pixels (Bae et al., 2019 voir tableau 1).

Méthodes basées sur les caractéristiques locales

On peut établir des relations entre le niveau de gris de chaque pixel et ses pixels voisins, incluant des techniques telles que les motifs binaires locaux (Ojala et al., 2002), les motifs de confirmation locaux (Guo et al., 2011), et les motifs binaires locaux complétés (Guo et al., 2011).

Méthodes basées sur des transformations

On peut décrire la texture de l'image dans le domaine fréquentiel, en utilisant des techniques telles que les transformées en ondelettes (Buscombe, 2013), les transformées de Fourier (Yaghoobi et al., 2019), et les filtres de Gabor (Tuceryan et al., 1998 ; Yaghoobi et al., 2019).

Méthodes basées sur la hauteur des particules

La hauteur de rugosité mesure l'irrégularité de la surface par rapport à un plan idéal, qui représente le meilleur ajustement pour cette zone (Chardon et al., 2020 ;

Vázquez-Tarrío et al., 2017 voir tableau 1). Le logiciel Cloud Compare a un outil qui permet de le calculer. L'écart type des altitudes est couramment utilisé pour déterminer la distribution des tailles des grains. Cette méthode repose sur l'analyse de la variation des altitudes des particules (Vázquez-Tarrío et al., 2017, voir tableau 1). L'entropie, qui mesure la texture de l'image, peut également être utilisée pour analyser la distribution granulométrique (Wong et al., 2023, voir tableau 1). D'autres méthodes sont possibles, certaines sont présentées dans le tableau 1 suivant.

Tableau 1 : Récapitulatif de différentes études traitant l'analyse de l'estimation des tailles sédiments à partir de diverses méthodes, avec les outils D : drone, P : photographies, L : laser scanner et Li : LiDAR

Etude	Matériel(s) utilisé				Méthodes	Résultat
	D.	P.	L.	Li.		
Bae et al. 2019	X	X			Algorithme de classification de vraisemblance	Drone bas de gamme peut séparer sable très fins et les autres sédiments à une hauteur de vols adaptés et contrôlé.
Buscombe (2019)		X			Apprentissage automatique	Modèle qui permet de déterminer la forme et la population de grains à partir d'image sans connaître l'échelle d'un pixel.
Chardon et al. (2020)	X	X		X	Phototamisage : logiciel Digital Grain size et utilisation de Rh métrique LiDAR : écart-type des valeurs d'intensité	Les conditions environnementales influencent significativement. La combinaison des deux méthodes permet d'avoir la granulométrie sur plusieurs km
Wong et al. (2023)	X	X			Nuage de points : Rugosité topographique Orthoimage : Texture image	Les modèles statistiques calibrés sur la texture de l'image plus précis que sur la rugosité topographique
Wang (2019)		X			Algorithme Ncut avec 4 autres méthodes : Marker Controlled Watershed, Grain size measurement based on edge image, SLIC	Méthode étudiée efficace comparée aux méthodes de mesure manuelle et aux autres méthodes de traitement d'images pour segmenter les images de graviers.
Walicka (2022)			X		(DBSCAN) Classification algorithme random forest et segmentation du nuage de points	Méthode robuste face à l'ombrage Permet la segmentation d'objets individuels de tailles et de formes différentes

Vázquez-Tarrío et al. (2017)	X	X			Nuage de points : descripteurs de rugosité calculé Comparé comptage de galets méthode Wolman	La mesure de la rugosité rh fournit la meilleure approximation des percentiles de taille des grains
Takechi et al. (2021)	X	X			Photo : réseau neuronal convolutif GoogLeNet, Alexnet, VGG-16 et ResNet comparé à un tamisage et BASEGRAIN	GoogLeNet, le plus performant des CNN testé, a atteint une précision globale de la classification de 95,4%. Méthode non robuste face aux ombrages
Steer et al. (2022)	X	X			G3Point : Segmentation et ajustement géométrique du nuage de points Comparé comptage de Wollman	Permet distribution de la taille des grains d'échelles du centimètre au mètre. Limiter à la résolution du nuage
Regier et al. (2023)		X			You Only Look Once : Algorithme d'apprentissage automatique	Différences significatives entre les méthodes
Mörrtl et al. (2022)		X			GALET : segmentation d'images par apprentissage profond réseau de neurones à convolution	Modèles d'apprentissage profond nécessitent une grande quantité de données d'apprentissage
Miazza et al. (2024)	X	X			Comparaison 3 modèle basé sur des objets : BASEGRAIN, PebbleCountsAuto et GALET	BASEGRAIN et PebbleCountsAuto conduisent à une sur-segmentation GALET méthode automatisée de granulométrie la plus précise
Engin (2019)			X		Méthodes mathématiques : Test de la dérivée seconde Examen de la courbure totale Reconstruction morphologique	La reconstruction morphologique donne une distribution plus précise par rapport aux données de référence.
Ren et al. (2020)				X	Approches d'apprentissage automatique entraînés à 13 372 endroits	Les algorithmes combler les lacunes dans la cartographie de la distribution spatiale de la taille des grains en utilisant les nombreuses informations indirectes
Lendzioch et al. (2024)	X	X			GRAINet : réseau de neurones convolutifs	Erreur absolue moyenne allant de 1,9 à 4,4 cm. Erreur plus importante pour grains inférieurs à 5 cm

Nous avons choisi d'utiliser le programme G3Point de Steer et al. (2022) pour plusieurs raisons. C'est un algorithme qui permet de traiter des données 3D sans recourir à des réseaux de neurones convolutifs, ce qui simplifie son utilisation et évite la nécessité de connaissances approfondies en apprentissage profond. C'est également un programme open source, ce qui permet une grande accessibilité et transparence dans les calculs, ainsi qu'une personnalisation et une adaptabilité accrues à nos données. Les tests effectués par Steer et al. (2022) sont très prometteurs. C'est une méthode qui pourrait permettre d'obtenir un résultat similaire à des données de volumétrie sans devoir passer par des coefficients d'ajustement.

II Matériel et méthode

II.1 Acquisitions des données

Pour tester l'application d'un calcul semi-automatique d'estimation granulométrique, deux sites d'études ont été choisis sur les rivières de l'Armançon et du Cher. La rivière du Cher est un affluent de la Loire tandis que l'Armançon est un affluent de l'Yonne. Les rivières présentent des formes et des tailles de sédiments variées. Nous avons effectué les relevés sur les berges érodées des rivières, berges gauches sur les photos de la figure 5.



Figure 5 : Localisation des deux sites d'étude, C : le Cher près de St-Armand-Montrond et A : l'Armançon près de Saint Florentin (données cartographiques d'IGN)

Sur nos terrains, nous avons d'abord délimité la scène en fonction du volume de sédiments à prélever. Ensuite, nous avons procédé à l'acquisition des données LiDAR. Enfin, nous avons réalisé l'échantillonnage volumétrique

II.1.1 Données de référence

La granulométrie obtenue via les données 3D et G3point, sera comparée à une granulométrie de validation (ou de référence), obtenue par échantillonnage volumétrique. La méthode utilisée pour nos données de validation est expliquée dans la section I.3.1.2. Elle consiste à prélever des échantillons, les tamiser pour séparer les grains, puis les peser pour obtenir des données précises sur leur taille et leur distribution.

Pour connaître le volume à prélever sur chaque berge nous avons suivi cette procédure avec comme exemple les calculs du cher :

1. Mesurer la hauteur de la berge : 1.2m de haut.
2. Déterminer la profondeur à prélever, égale à la longueur du plus grand grain à proximité : 150 mm
3. Peser plusieurs grains pour connaître le poids maximum d'un grain : 0.91kg
4. Déterminer la largeur à prélever, connaissant la hauteur, la profondeur, le poids voulu et la porosité du terrain : On cherche environ 100 kg (100 fois la particule la plus lourde), soit 0,038 m³ de volume. En tenant compte de la porosité entre les grains, le volume total est de 0,08 m³, ce qui donne une largeur de 0,5 m.

Ce qui nous a donné comme zone d'étude : 0.7m² pour le Cher 0.4m² pour l'Armançon.

II.1.2 Données iPhone

Pour réaliser un nuage de point LiDAR, nous avons utilisé un iPhone 13 Max et l'application Polycam. Cette application a été choisie en se basant sur le travail de Dubiez (2023). Développée par Polycam Inc, elle permet de créer des nuages d'une précision centimétrique (Dubiez, 2023). Nous avons choisi de faire plusieurs relevés à des distances différentes de la berge, pour permettre de comprendre l'influence de la distance dans la précision de nos résultats.

Pour reconstituer la scène par photogrammétrie, nous n'avons pas pris directement les photos avec l'iPhone. À la place, nous avons utilisé les photos capturées par l'application

Polycam pour le traitement du nuage de points LiDAR. Pour réduire le temps de traitement, Polycam réduit la résolution des photos de 4032x3024 pixels (résolution normale pour une photo de l'iPhone) à 1024x768 pixels. Nous avons utilisé ces données pour reconstituer la scène en employant la technique de SfM avec le logiciel Metashape.

II.2 Traitement des données de l'iPhone

II.2.1 Données LiDAR

Pour mieux comprendre le fonctionnement de Polycam, on l'a comparé à une autre application, PIX4Dcatch, qui, contrairement à Polycam, ne procède pas à des traitements après relèvement.

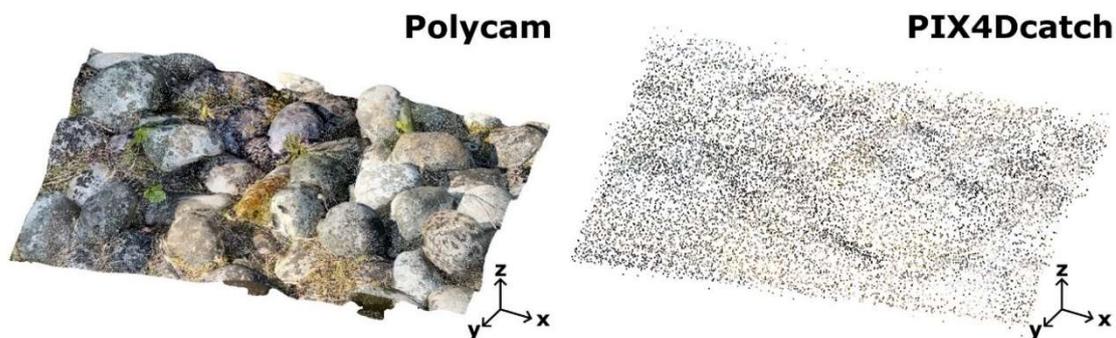


Figure 6 : Comparaison entre deux nuages de points relevés de façon identique avec deux applications différentes, Polycam et PIX4Dcatch

Ici, le nuage Polycam possède une densité de points d'environ 3.52 points par mm^2 contre 0.03 points par m^2 pour le nuage PIX4Dcatch. Cela indique que Polycam calcule les points 3D en combinant données photogrammétriques et données LiDAR. Ceci explique que la densité de points générée via Polycam soit cent fois supérieure à celle obtenue avec PIX4Dcatch. Il recalcule les positions des caméras contrairement à PIX4Dcatch qui le fait en temps réel, et corrige les positions des caméras contrairement à PIX4Dcatch.

Pour connaître la distance entre les positions de caméras et la berge à partir de laquelle les résultats deviennent trop imprécis, nous avons fait plusieurs mesures de la même berge à des distances différentes : très proche ($< 50\text{cm}$), 50cm, 1m, 1m5 et 2m.

II.2.2 Données photogrammétriques

Malgré la qualité moindre des photos, nous avons pu construire un nuage de point dense et précis grâce à un grand nombre de photos récupéré : 746 photos pour le Cher et 891 pour l'Armançon. Pour mettre à l'échelle le nuage, nous avons utilisé les cibles placées autour de la zone délimitée, ces cibles étant connues dans le repère LiDAR iPhone. Pour vérifier la précision des données LiDAR, nous avons mesuré 3 points sur le bord de plusieurs cibles, leur diamètre étant connu (70cm). Les résultats sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 2 : Comparaison des diamètres des cibles sur les nuages de points issus de Metashape

	Armançon	Cher
Rayons cibles i (mm)	34,62	34,43
	34,36	34,59
	34,36	33,82
	34,62	35,36
Diamètre moyen (mm)	68,89	69,18
Diamètre réel (mm)	70,00	
Erreur vraie	-1,110	-0,821
Pourcentage de différence	1,016	1,012

Nous avons observé que les cibles sont plus petites de 1,2% pour le nuage du Cher et de 1,6% pour le nuage de l'Armançon. Ces écarts moindres montrent que les données utilisées pour la mise à l'échelle sont suffisantes.

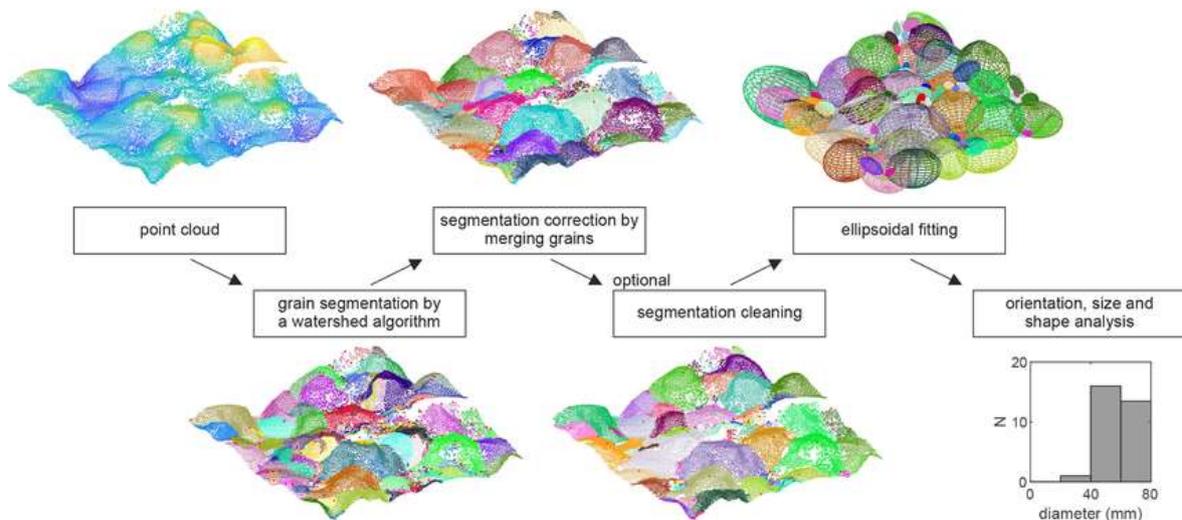
Nous avons sous-échantillonné les nuages de points avec un programme python pour que nos nuages aient une densité comprise entre 10 000 et 1 000 000 points par m² ce qui est préconisée par Steer et al. (2022) pour l'utilisation de G3Point. Nous avons choisi la densité maximum préconisée, ce qui alourdit le temps de traitement mais permet d'avoir une résolution plus élevée.

II.3 G3point, un programme d'estimation de la granulométrie

II.3.1 Description de l'algorithme

II.3.1.1 Principe du programme

Le programme G3Point est un programme Matlab, conçu pour l'analyse granulométrique semi-automatique des surfaces de sédiments. Il vient segmenter les nuages 3D en grains individuels, corriger les erreurs de sur-segmentation, nettoyer la segmentation et ajuster un ellipsoïde à chaque grain (figure 8).



Description des étapes :

- Pré-traitement des nuages de points : il élimine le bruit et les objets indésirables (végétation, arbres, grains fins).
- Segmentation initiale : Il utilise un algorithme de type Watershed, qui vient segmenter par ligne de partage des eaux, en simulant des inondations.
- Correction de la sur-segmentation : il utilise trois critères entre deux grains i, j , la distance entre les sommets, le voisinage spatial et l'angle 3D entre les normales des points de crête des grains i et j . Si ces trois critères sont satisfaits, les deux grains i, j sont fusionnés.
- Nettoyage de la segmentation : plusieurs critères de fusions, allongement des grains, le nombre de points minimum par grains, l'angle 3D entre les normales.
- Modélisations géométriques : G3Point vient d'abord calculer des cuboïdes pour chaque grain puis vient ajuster des ellipsoïdes.

- Description géométrique et statistique des grains : à partir des ellipsoïdes, il calcule la taille des grains (diamètres majeur, intermédiaire et mineur), l'orientation (azimut et inclinaison), le volume et la surface approximative de chaque grain.

II.3.1.2 Les paramètres de G3Point

G3Point a une approche par essais et erreurs. Parmi les différents traitements, il y a différents paramètres modulables. Selon Steer et al. (2022), il y a six paramètres importants, visibles dans le tableau suivant. Pour pouvoir trouver le meilleur jeu de paramètres, ils préconisent une vérification visuelle de la segmentation.

Tableau 3 : Ensemble des paramètres de G3Points. Les paramètres importants dans le calcul sont entourés en noir

Options d'affichage et de sauvegarde (Oui= 1 et Non =0)		Description	
lplot		Affiche les résultats	
saveplot		Sauvegarde les différents graphiques	
savegranulo		Sauvegarde la granulométrie dans un fichier xls	
savegrain		Sauvegarde chaque point dans un nuage de points en.ply	
Traitement optionnel (Oui= 1 et Non =0)	Description	Paramètres de ces traitement	Description
Denoise	Débruite le nuage de points		
Decimate	Décime le nuage de points	res	Nouvelle résolution du nuage de points
Minima	Supprimer les minima locaux pour faciliter la segmentation	nscale	Nombre d'échelles à utiliser
		minscale	Échelle minimale (rayon)
		maxscale	Échelle maximale potentielle (rayon)
		nnptCloud	K voisins les plus proches pour acheminer l'eau avec Fastscape
	<i>Paramètre de segmentation*</i>	cf	Préfacteur utilisé pour déterminer si deux grains doivent être fusionnés
		maxangle1	Angle maximum au-dessus duquel les normales entre deux étiquettes sont considérées différentes
rotdetrend	Tourne et détend le nuage de point		
clean	Nettoie la segmentation	maxangle2	Angle maximum au-dessus duquel les normales entre deux étiquettes sont considérées différentes
		minflatness	Planéité minimale que doit avoir un grain
		nmin	Nombre minimal de points qu'un grain doit contenir (max(nnptCloud, nmin))
	<i>Paramètre d'ajustement*</i>	fitmethod	['direct'] / 'simple' / 'koopmans' / 'inertia' / 'direct_iterative'
		Aquality_thresh	Seuil de couverture de surface minimum pour l'ellipsoïde (en %)
gridbynumber	Effectuer une distribution granulométrique par grille virtuelle	mindiam	Diamètre minimal du grain considéré
		naxis	Quel axe utiliser ? (1= petit axe, 2=axe intermédiaire, 3=grand axe)
		dx_gbn	Espacement de la grille utilisé

* traitement non optionnel

Parmi les traitements optionnels, nous n'avons pas utilisé les traitements suivants :

- Decimate : le paramètre de decimate ne permet pas de choisir une densité de points par m². Nous avons donc préféré créer un programme pour dédensifier nos nuages de points, conformément aux recommandations de Steer et al. (2023).
- Minima : ce traitement est préconisé en cas de nuages SfM qui auraient généré une topographie biaisée des grains, en raison de zones difficiles à observer. Cependant, nous n'avons pas constaté ce problème dans nos nuages de points.

Nous allons maintenant fournir une explication détaillée de chaque paramètre et examiner leur impact sur le traitement des données.

Paramètre de segmentation initiale :

- nnptCloud : détermine le paramètre k, nombres de voisins les plus proches utilisés dans la segmentation. Plus k est petit plus la zone de voisinage considérée diminue. Ceci peut entraîner une sous-segmentation. Il est préconisé de tester plusieurs K compris entre 0 et 100 (selon la densité du nuage de points) et en préférant la sur-segmentation qui pourra être corrigée dans les étapes suivantes.

Paramètre de correction de la sur-segmentation :

- Cf : c'est un facteur d'échelle. Le critère de fusion est $d_{ij} < C_f(l_i + l_j)$, d_{ij} la distance entre les sommets et l_i, l_j leur rayon caractéristique. Il peut varier entre 0 et 1.
- maxangle1 : l'angle entre les normales des points de crêtes doit être inférieur à maxangle1. Il peut varier entre 0 et 90°.

Ces deux paramètres sont importants à choisir de façon concomitante et de façon à obtenir une segmentation visuellement satisfaisante.

Paramètre de nettoyage de la correction :

- maxangle2 : fusionne deux labels i et j si l'angle entre les normales de sommet est inférieur au seuil choisi. Il peut varier entre 0 et 90°.
- minflatness : élimine les grains trop allongés/plats. Elimine les grains si $\frac{d_{min}}{d_{max}} > minflatness$ Avec d : diamètre du grain. Minflatness varier entre 0 et 1.
- nmin : élimine les grains ayant moins que minnpoint

Pour les paramètres d'ajustement nous avons utilisé la méthode préconisée par Steer (2) 'direct'.

Après vérification visuelle de la segmentation, nous avons utilisé les paramètres présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Tableau des valeurs des paramètres finaux choisis par segmentation visuelle

	Site 1	Site 2
nnptcloud	20	20
cf	0.25	0.4
maxangle1	60	60
maxangle2	10	10
minflatness	0.1	0.1
fitmethod	direct	direct
Aquality_thresh	10	10
mindiam	0.001	0.001
nmin	50	50

II.3.2 Technique de comparaison

Pour l'estimation de la granulométrie, G3point effectue deux types de calcul :

- Comptage exhaustif des tailles grains
- Méthodes de type comptage de Wolman virtuel

La méthode Wolman appliquée à l'algorithme consiste à appliquer une grille virtuelle sur le nuage de points et à calculer les tailles des grains aux intersections des nœuds de cette grille. Elle s'approche donc d'une technique d'échantillonnage des grains par surface, permettant une comparaison directe avec les résultats obtenus par une distribution volumétrique. Cette opération est répétée 25 fois afin d'obtenir une moyenne et un écart type, ce qui permet de proposer une incertitude associée à la distribution granulométrique.

Le comptage exhaustif des grains surestime les grains de diamètre fins et ne fournit pas de résultats concluants. En effet, comme mentionné dans la section I.1.1.4, les résultats d'un échantillonnage de surface par grille sont considérés comme équivalant à des résultats d'une volumétrie. Les données seront donc comparées à la méthode de Wolman virtuel.

Pour quantifier les écarts entre nos résultats volumétriques et nos données G3Points, nous avons comparé un certain nombre de centiles considérés comme représentatifs de la distribution (5e, 10e, 16e, 25e, 50e, 75e, 84e, 90e et 95e). Ces centiles ont été obtenus grâce à la formule suivante :

$$\Phi_x = \frac{(d_{max}\Phi_i - d_{max}\Phi_{i+1}) * (centile_x - y_i)}{y_{i+1} - y_i} - d_{max}\Phi_i$$

Pour cela on calcule d'abord la dimension de nos particules en Φ unités ($\Phi = -\log 2$).

Avec $y_i < centile_x < y_{i+1}$

$centile_x$: le centile recherché

$d_{max}\Phi_i$: diamètre maximum (en Φ unités) de la classe i

y_i : fréquence de la classe i

Pour trouver les valeurs des centiles en millimètres, nous utilisons :

$$D_x (mm) = 2^{\Phi_x}$$

II.3.3 Choix du diamètre mesuré par G3Point

Les formes des sédiments sont très différentes sur nos deux terrains, le Cher ayant des grains plus sphériques. Il est intéressant de voir si nos galets peuvent être décrits en utilisant des modèles ellipsoïdaux. Sur G3Point, il est possible de sélectionner les diamètres des ellipsoïdes à prendre en compte pour estimer la distribution des tailles des grains (Figure 8).

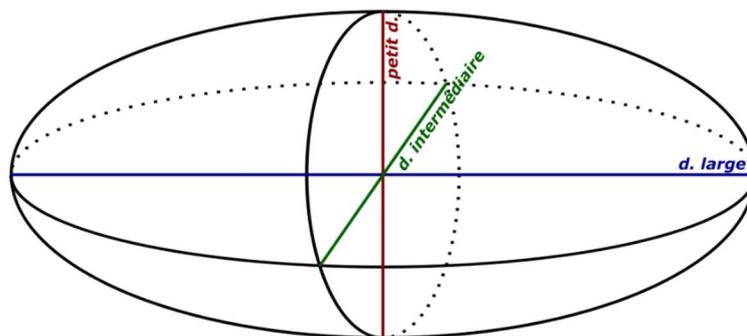


Figure 8 : les trois diamètres (d.) des ellipsoïdes

On cherche à s'approcher des résultats volumétriques portant sur la mesure des axes b. Pour cela, on a choisi de comparer les distributions de taille des sédiments fournies par G3Point pour chacun des trois axes illustrés dans la figure 8 avec à nos données de référence.

III Résultats

III.1 Volumétrie et sphéricité des particules

Le cher possède une plus grande étendue granulométrique et une matrice sableuse (grains inférieurs à deux millimètres), plus importante que l'Armançon (figure 9). En effet, comme le montre la figure 6, la fraction sableuse s'élève à 17,7 % sur l'Armançon, alors qu'elle atteint 29,8 % sur le Cher. De plus, dans le Cher, les grains peuvent atteindre un diamètre allant jusqu'à 128 mm. En revanche, dans l'Armançon, les grains de plus grande taille se trouvent dans la classe de 45 à 64 mm.

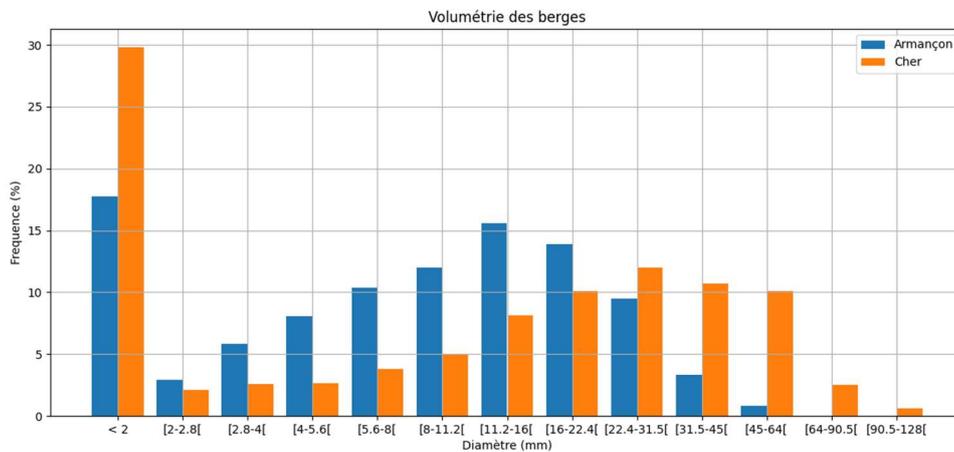


Figure 9 : Histogramme des masses des sédiments par classe de taille des différentes berges

Pour pouvoir évaluer la forme des grains dans chaque classe, nous utilisons l'indice de Sneed and Folk (1958) :

$$\psi_{pi} = \sqrt[3]{\frac{c_i^2}{a_i x b_i}}$$

Plus l'indice tend vers 1, plus le grain mesuré est sphérique. Pour chaque classe granulométrique, nous avons mesuré les trois axes (a, b et c) sur un échantillon de 30 grains et obtenu les indices visibles dans le tableau 2. Les sédiments du Cher avec une moyenne de ψ_{pi} à 0,66, sont donc plus sphériques que ceux de l'Armançon avec une moyenne de ψ_{pi} à 0,54 (tableau 2). Il est intéressant de comparer deux formes et tailles de sédiments différentes pour évaluer la précision de G3Point et déterminer avec quelle configuration il obtient les meilleurs résultats face à ces variations.

Tableau 5 : Sphéricité des sédiments du Cher et de l'Armançon pour chaque classe granulométrique, méthode de Sneed and Folk (1958)

Diamètres (mm)	Indice moyen de Sneed et Folk	
	Armançon	Cher
[5.6-8[	0,61	0,72
[8-11.2[	0,57	0,68
[11.2-16[	0,54	0,64
[16-22.4[	0,52	0,62
[22.4-31.5[	0,52	0,65
[31.5-45[	0,47	0,64
[45-64[	0,59	0,66
[64-90.5[		0,66

III.2 Comparaison des nuages de points SfM/LiDAR

Nous avons comparé sur les mêmes zones, les nuages de points calculés par Metashape à l'aide de méthodes de SfM avec ceux obtenus par LiDAR et calculés par Polycam. Les résultats ont donné des grandes différences sur la rugosité de nos nuages.

Comme on peut le voir sur la figure 10 le rendu de Polycam est très plat. Le nuage de point manque de rugosité. L'aplanissement du nuage LiDAR est bien supérieur à la rugosité du grain le plus gros, il est donc impossible de segmenter ce nuage avec un calcul sur la rugosité de surface tel qu'utilisé par G3Point.

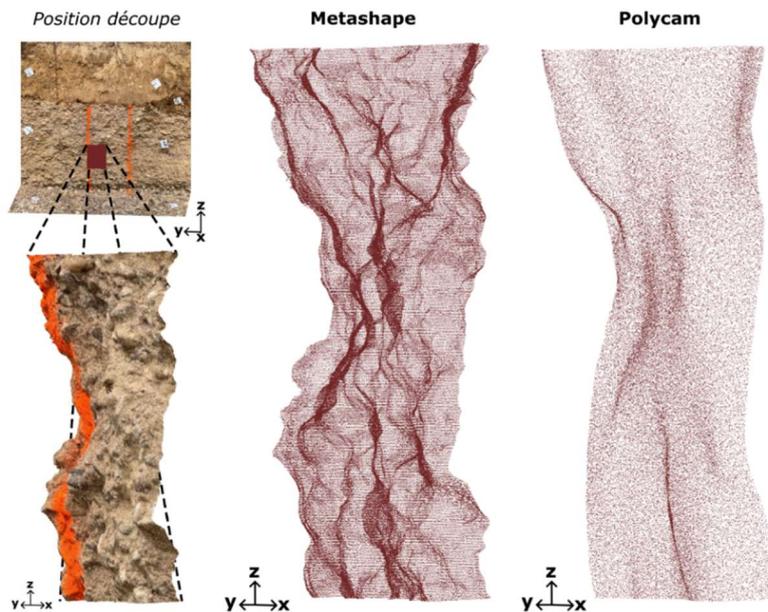


Figure 10 : Différence de rugosité entre les nuages crée par Metashape et Polycam à <50cm de la berge pour la berge de la rivière du Cher

Par ailleurs, plus la distance à la berge est grande, plus le nuage de points devient plat. On voit aussi apparaître des différences d'élévation sur les traits de peinture fait sur la berge (figure 11). Cela montre que Polycam utilise des photos pour générer ses nuages de points, mais ces calculs n'offrent pas une précision optimale. Cela peut être dû au choix de Polycam de privilégier la rapidité de traitement au détriment de la précision. En effet, Polycam est environ 10 fois plus rapide que le traitement avec Metashape.

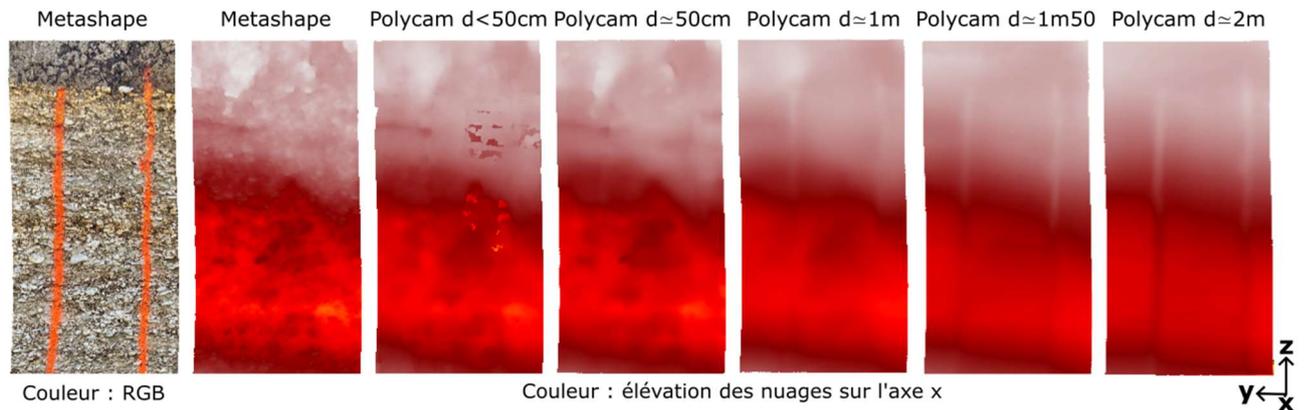


Figure 11 : Comparaison de l'élévation des différents nuages de points pour la berge de l'Armançon, d : distance de la berge

III.3 Estimation de la distribution granulométrique

Le programme G3Point fournit deux distributions granulométriques. La première est tirée de la mesure des axes de la totalité des particules, la seconde de l'ensemble des distributions de chaque itération avec un comptage de type Wolman virtuel.

Dans la figure 12, G3point a estimé la distribution granulométrique à partir du diamètre intermédiaire des ellipsoïdes. Nous pouvons voir que le comptage exhaustif des grains est la distribution ressemblant le moins aux données de référence. Les courbes de la moyenne des itérations de Wolman présentent une plus forte similitude. Nous allons maintenant affiner nos résultats en comparant nos données de référence avec les trois différents diamètres des ellipsoïdes.

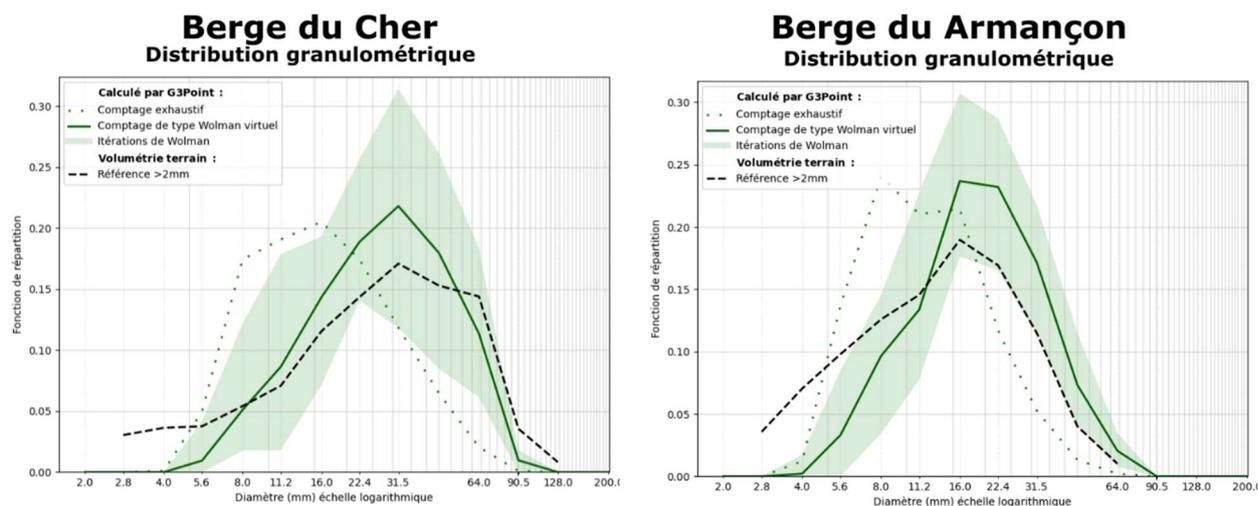


Figure 12 : Distributions granulométriques obtenues par tamisage et par G3point sur les deux sites d'études avec les données photogrammétriques

Pour le Cher, les différences de diamètre pour le D50 entre la référence et celui calculé par G3Point sont de 3,5 mm pour le grand diamètre, de 0,2 mm pour le diamètre intermédiaire et de 3,1 mm pour le petit diamètre. En conséquence, le diamètre des ellipsoïde pris en compte dans l'analyse de G3point qui se rapproche le plus des données de référence est le diamètre intermédiaire (figure 13). Les écarts-types pour les centiles supérieurs à 50, qui correspondent aux valeurs minimales et maximales des centiles sur l'ensemble des itérations, sont nettement plus élevés pour le petit diamètre. En moyenne, ces écarts sont de 22 mm pour le petit diamètre, de 15 mm pour le diamètre intermédiaire et de 9 mm pour le grand diamètre. Cela démontre une précision moindre pour le calcul avec le petit diamètre.

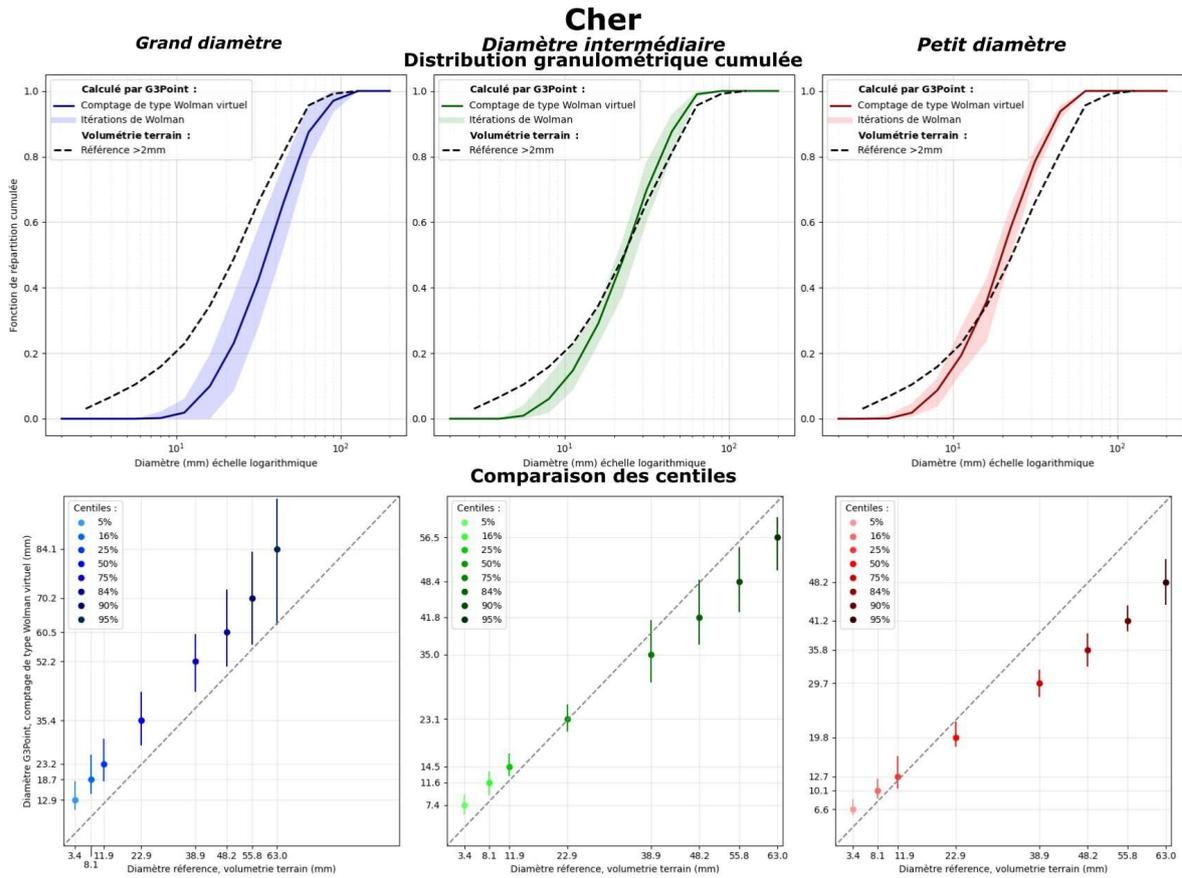


Figure 13 : Comparaison des distributions granulométrique cumulée et centiles clés (5e, 10e, 16e, 25e, 50e, 75e, 84e, 90e, 95e) obtenus par tamisage (mesure de l'axe b) et par G3point sur site d'étude du Cher et pour les 3 diamètres

Tandis que pour l'Armançon, les différences de diamètre pour le D50 entre la référence et celui calculé par G3Point sont de D50 de 12.2 mm pour le grand diamètre, de 4.2 mm pour le diamètre intermédiaire et de 2.2 mm pour le petit diamètre. Ainsi, le petit diamètre est celui qui se rapproche le plus des données de référence (figure 14). On trouve une erreur de Les écarts types restent les plus importants pour le centile supérieur à 50 avec le calcul du petit diamètre 7 mm contre 6 mm pour le diamètre intermédiaire et 5mm pour le petit diamètre.

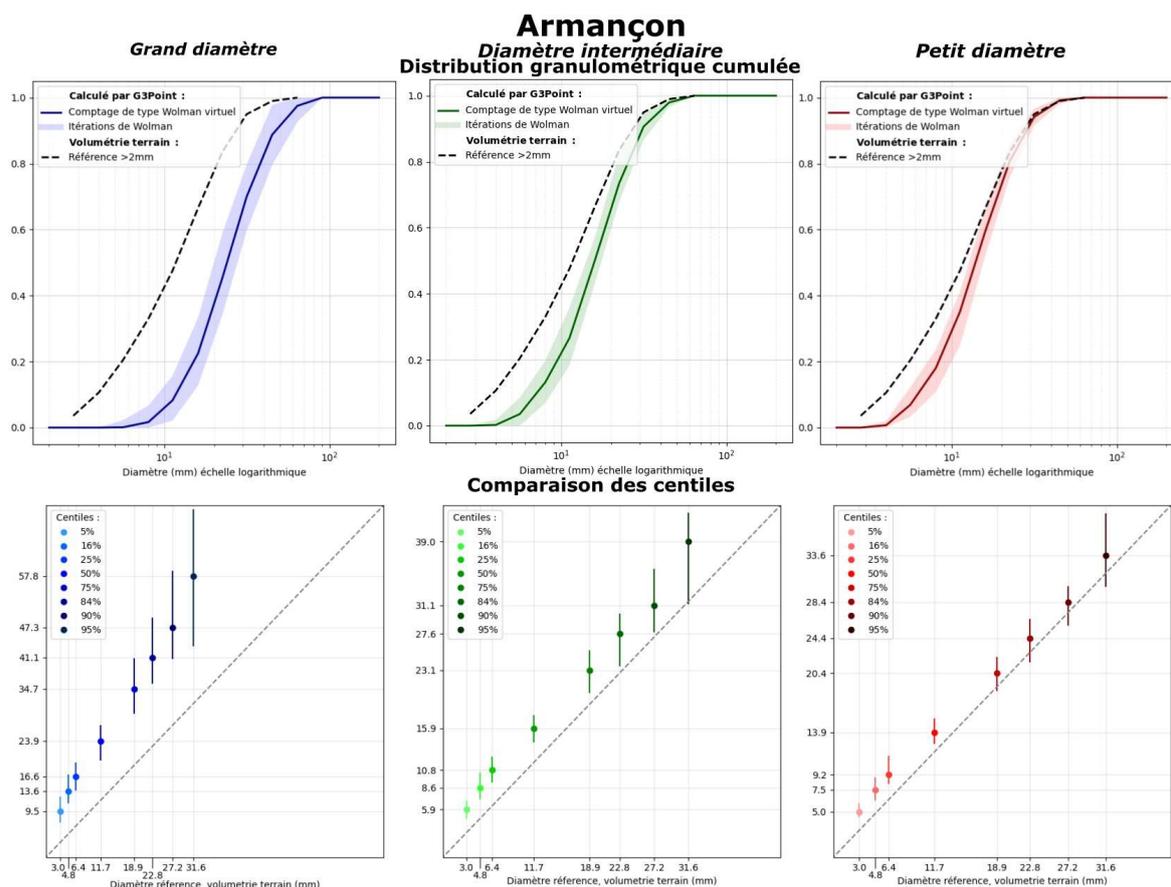


Figure 14 : Comparaison des distributions granulométrique cumulée et centiles clés (5e, 10e, 16e, 25e, 50e, 75e, 84e, 90e, 95e) obtenus par tamisage (mesure de l'axe b) et par G3point sur site d'étude de l'Armançon et pour les 3 diamètres

On observe dans le tableau 6 que les erreurs sont beaucoup plus petites pour la berge du Cher que pour celle de l'Armançon. Les erreurs en pourcentages sont généralement plus élevées pour les plus petits centiles (tableau 6). Cela est dû au fait qu'un même écart affecte davantage les pourcentages des petits diamètres par rapport aux grands diamètres.

Nos résultats pour le Cher, comparés à ceux de l'Armançon, sont plus justes (tableau 6), avec une valeur moyenne calculée plus proche de la valeur de référence, mais moins fidèles (figures 13 et 14), car l'écart type des valeurs est plus grand.

Tableau 6 : Comparaison des pourcentages d'erreur absolue entre les données de référence et celle de G3Point pour les 3 diamètres et pour chaque centiles clés. d. : diamètre et interm. : intermédiaire

Centiles	Cher			Armançon		
	Grand d.	d. interm.	Petit d.	Grand d.	d. interm.	Petit d.
5	278,9	119,0	94,7	215,1	96,4	67,7
16	131,8	43,6	25,1	182,6	78,5	55,7
25	94,1	21,2	6,1	160,4	68,9	43,9
50	54,5	1,0	13,6	104,1	36,0	18,5
75	34,1	10,1	23,6	83,1	22,0	8,0
84	25,6	13,2	25,6	80,7	21,4	7,1
90	25,9	13,3	26,1	74,0	14,5	4,4
95	33,4	10,4	23,5	83,1	23,4	6,2

Visuellement, la segmentation finale présente des grains sur-segmentés. On peut, par exemple, le voir sur le grain en bas à gauche de la figure 15 qui a été segmenté en 4 grains différents. Pour corriger cela, il faudrait donc affiner les paramètres de G3Point qui n'ont pas l'air d'être les plus performants.

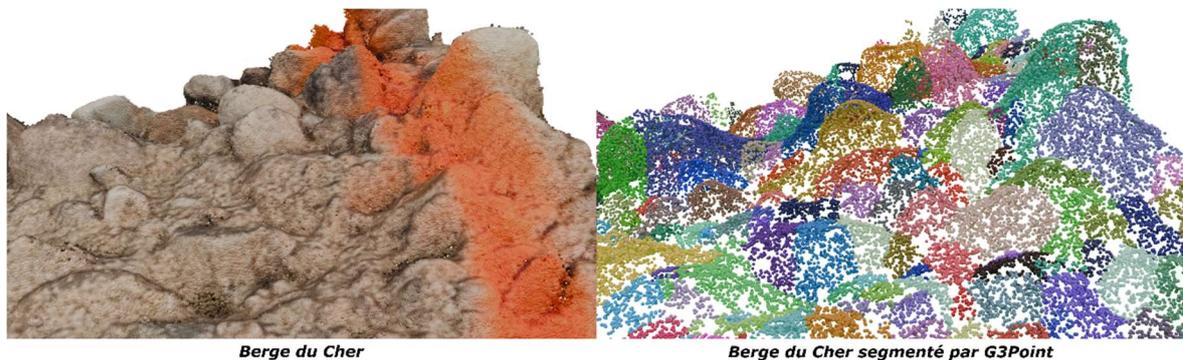


Figure 15 : Résultat de la segmentation de la berge du Cher avec le diamètre intermédiaire

Ces différences ne peuvent pas être expliquées par la forme des grains, car les grains du Cher, étant plus sphériques, devraient théoriquement faciliter l'estimation des plus petits grains. Cependant, ces différences pourraient être dues à une sur-segmentation du nuage de points pour la berge de l'Armançon.

IV Discussion

Au vu de nos résultats, un ajustement des paramètres du programme G3point s'avère nécessaire. Il pourrait également être intéressant de comparer les résultats obtenus à partir de paramètres issus d'une vérification visuelle avec ceux d'une vérification automatique, en utilisant nos données de référence. Pour cela, il faudrait calculer le meilleur ensemble de paramètres pour obtenir une courbe de distribution granulométrique se rapprochant le plus possible des données de référence. Ce qui nécessiterait la création ou la modification du programme G3Point. Une vérification visuelle finale serait ensuite effectuée pour confirmer une segmentation correcte et éviter que de bons résultats ne soient dus à des erreurs compensatoires.

Les données brutes de nos traitements photogrammétriques étant des photos récupérées via l'application Polycam, il serait nécessaire de tester le programme avec d'autres jeux de données pour évaluer dans quelle mesure ces imprécisions ont pu impacter nos résultats finaux. En effet les photos sont de qualité inférieure, résultant de prises de vue non idéales pour les techniques de SfM et de la réduction de résolution effectuée par Polycam.

La technique SfM permet d'obtenir des nuages de points uniformes au regard des nuages LiDAR. Cependant, cette technique peut former des imperfections en raison de l'effet des ombres sur le nuage de points et de la qualité des photographies utilisées. Pour analyser l'impact des effets d'ombre il peut être intéressant de comparer deux nuages de points d'une zone identique, l'un photographié avec des ombres et l'autre sans, afin d'observer les imprécisions liées à ce phénomène. Dans G3Points, un traitement permettant de supprimer les points situés aux minima topographiques locaux pourrait réduire ces imprécisions. Les résultats avec ce traitement pourraient être mis en parallèle avec les résultats du nuage pris sans ombre.

Dans cette étude, nous avons choisi de suivre les préconisations de densité de Steer et al. (2022). Mais il serait intéressant d'étudier comment la diminution de la densité des nuages affecte les résultats selon certaines tailles de grains. Nous pourrions déterminer plusieurs niveaux de densité adaptés en fonction des types de terrains, des tailles de grains et des résultats souhaités. L'intérêt de cela est de pouvoir travailler avec des nuages de

points moins denses, ce qui faciliterait l'ajustement des paramètres et permettrait des traitements plus rapides.

Pour les terrains plus vastes, il est nécessaire de découper les nuages de points, car les traitements de G3Points permettent d'analyser des nuages de points dont la surface est inférieure à 100 m² et le nombre de points inférieures à 10⁶. Un travail complémentaire pourrait consister à développer un programme automatisant le découpage des nuages de points. Il faudrait enlever le lit de la rivière, les dépôts de débordements et la végétation afin de se concentrer uniquement sur les éléments pertinents pour l'étude. Cela faciliterait l'analyse des nuages et surtout un gain de temps dans le traitement des données.

V Conclusion

La taille des particules sédimentaires influence directement l'érosion, la stabilité des berges et la morphologie des cours d'eau, impactant ainsi la biodiversité et les habitats aquatiques. Comprendre et analyser la granulométrie des berges est donc crucial pour gérer efficacement ces écosystèmes. Les cours d'eau étant vastes et parfois inaccessibles, c'est aujourd'hui un enjeu de trouver de nouvelle méthode pour mesurer et analyser la distribution des sédiments. Dans le but d'utiliser un drone le long des rivières, cette étude a exploré le potentiel des données photogrammétriques et LiDAR de l'iPhone pour l'estimation granulométrique sur deux sites fluviaux distincts, l'Armançon et le Cher, ainsi que pour valider une méthode de traitement des données existantes.

Les données LiDAR de l'iPhone présentent un trop grand défaut de planéité pour mesurer la rugosité des grains. L'application Polycam a montré une tendance à aplatir les surfaces, ce qui a affecté la qualité de la segmentation des grains par G3Point. De nombreuses applications pour l'iPhone exploitant le LiDAR pourraient émerger, offrant de nouvelles perspectives dans ce domaine. En particulier, des applications plus avancées pourraient fournir des rendus suffisamment précis pour permettre une analyse granulométrique. Les techniques de photogrammétriques cependant nous ont permis de tester l'algorithme G3Point.

Cet algorithme nous permet d'estimer de façon correcte les distributions des tailles de grains mais nécessite néanmoins une vérité terrain. Notre vérité terrain nous a permis d'observer des différences de résultats entre deux rivières ayant des morphologies de grains différentes. Cependant, ces écarts ne peuvent pas être expliqués uniquement par la différence de sphéricité des grains et par leur distribution de tailles distinctes. L'ajustement des différents paramètres de cet algorithme influant sa segmentation et le nettoyage de cette segmentation reste un grand enjeu. G3Point est capable de segmenter et d'estimer les dimensions des grains de manière satisfaisante, malgré les défis liés à la diversité des formes et tailles de sédiments observée. Cependant, des ajustements sont nécessaires pour optimiser les paramètres du programme afin de minimiser la sur-segmentation et d'améliorer la précision des mesures, notamment sur les grains les plus fins.

En conclusion, bien que G3Point soit un outil prometteur pour l'estimation granulométrique, il est crucial d'affiner ses paramètres pour obtenir des résultats plus précis. Des développements futurs pourraient inclure des améliorations pour le traitement des nuages de points.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

MALAVOI J. et BRAVARD J., 2010. *Eléments d'hydromorphologie fluviale*. Onema., Baume-les-Dames, 224 p.

BUNTE K. ABT S., 2001. *Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-74. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 428 p.

Travaux universitaires

DUBIEZ X., 2024. *Utilisation du LIDAR de l'iPhone pour la caractérisation de l'érosion des berges*. [en ligne] *Sciences de l'ingénieur*, ESGT, 45p.

Disponible sur : < <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/DUMAS/dumas-04410479v1>>. (consulté le 19/02/2024).

Articles de périodiques électroniques

ALIJANI Z., MELOCHE J., MCLAREN A., LINDSAY J., ROY A et BERG A. (2023). A comparison of three surface roughness characterization techniques: photogrammetry, pin profiler, and smartphone-based LiDAR. *International Journal of Digital Earth* [en ligne]. n°15.

Disponible sur : < <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2160842>>, consulté le 20/02/2024

BAE S., YU J., WANG L., JEONG Y., KIM J. et YANG D. (2019). Experimental analysis of sand grain size mapping using UAV remote sensing. *Remote Sensing Letters* [en ligne]. n°10.

Disponible sur : <<https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1629713>>, consulté le 19/02/2024

BUSCOMBE D. (2013). Transferable wavelet method for grain-size distribution from images of sediment surfaces and thin sections, and other natural granular patterns. *Sedimentology* [en ligne]. n°60. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1111/sed.12049>>, consulté le 04/04/2024

BUSCOMBE D. (2019). SediNet: a configurable deep learning model for mixed qualitative and quantitative optical granulometry. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. n°45. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1002/esp.4760>>, consulté le 19/02/2024

BUTLER J., LANE S. et CHANDLER J. (2001). Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing. *Journal of Hydraulic Research* [en ligne]. n°39. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1080/00221686.2001.9628276>>, consulté le 03/04/2024

CHARDON V., SCHMITT L., PIÉGAY H. et 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* [en ligne]. n°45. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1002/esp.4882>>, consulté le 03/12/2023

ENGIN I. (Date). Comparison of the different mathematical methods performed in determining the size distribution of aggregates using LiDAR point cloud data and suggested algorithm. *Earth Science Informatics* [en ligne]. n°12. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/s12145-019-00384-1>>, consulté le 26/02/2024

GAREFALAKIS P., DO PRADO A., MAIR D., DOUILLET G., NYFFENEGGER F. et SCHLUNEGGER F. (2023). Comparison of three grain size measuring methods applied to coarse-grained gravel deposits. *Sedimentary Geology* [en ligne]. n°446. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106340>>, consulté le 19/02/2024

GRAHAM D., ROLLET A., PIEGAY H. et RICE S. (2010). Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques. *Water Resources Research* [en ligne]. n°46. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1029/2008WR006940>>, consulté le 07/03/2024

GUO Q., WANG Y., YANG S. et XIANG Z. (2022). A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. *Scientific Reports* [en ligne]. n°12. Disponible sur : <<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-11351-0>>, consulté le 26/02/2024

IBBEKEN H. et DENZER P. (1998). Clast measurement; a simple manual device and its semiautomatic electronic equivalent. *Journal of Sedimentary Research* [en ligne]. n°58. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1306/212f8e36-2b24-11d7-8648000102c1865d>>, consulté le 01/04/2024

LENDZIOCH T., LANGHAMMER J. et KOOTANOR SHESHADRIVASAN V. (2024). Automated mapping of the mean particle diameter characteristics from UAV-imagery using the CNN-based GRAINet model. *Journal of Hydroinformatics* [en ligne]. n°25. Disponible sur : <<https://doi.org/10.2166/hydro.2023.079>>, consulté le 19/02/2024

ALLEN A., CUNNINGHAM G., MCEWAN I. et SHEEN T. (2000). Estimating the size composition of sediment surfaces through image analysis. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* [en ligne]. n°142. Disponible sur: <<https://doi.org/10.1680/wame.2000.142.4.189>>, consulté le 08/03/2024

MIAZZA R., PASCAL I. et ANCEY C. (2024). Automated grain sizing from uncrewed aerial vehicles imagery of a gravel-bed river: Benchmarking of three object-based methods. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. n°49. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1002/esp.5782>>, consulté le 19/02/2024

MÖRTL C., BARATIER A., BERTHET J. et DUVILLARD P. (2022). GALET: A deep learning image segmentation model for drone-based grain size analysis of gravel bars. Proceedings of the 39th IAHR World Congress [en ligne]. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/publication/362231914_GALET_A_deep_learning_image_segmentation_model_for_drone-based_grain_size_analysis_of_gravel_bars>, consulté le 03/12/2023

OJALA T., PIETIKAINEN M. et MAENPAA T. (2002). Multiresolution grayscale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [en ligne]. n°24. Disponible sur : <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1017623>>, consulté le 02/03/2024

REGIER P., CHEN Y., SON K., BAO J., FORBES B., GOLDMAN A., KAUFMAN M., ROD K. et STEGEN J. (2023). Machine Learning Photogrammetric Analysis of Images Provides a Scalable Approach to Study Riverbed Grain Size Distributions. *Water Resources Research* [en ligne]. Disponible sur : <<https://doi.org/10.31223/X5S10W>>, consulté le 25/03/2023

REN H., HOU Z., DUAN Z., SONG X., PERKINS W., RICHMOND M., ARNTZEN E. et SCHEIBE T. (2020). Spatial Mapping of Riverbed Grain-Size Distribution Using Machine Learning. *Sec. Water and Critical Zone* [en ligne]. n°2. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3389/frwa.2020.551627>>, consulté le 03/12/2023

RICE S. et CHURCH M. (1996). Sampling surficial fluvial gravels; the precision of size distribution percentile sediments. *Journal of Sedimentary Research* [en ligne]. n°66. Disponible sur : <<https://doi.org/10.2110/jsr.66.654>>, consulté le 27/03/2024

SIME L. et FERGUSON R. (2003). Information on Grain Sizes in Gravel-Bed Rivers by Automated Image Analysis. *Journal of Sedimentary Research* [en ligne]. n°73. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/246471785_Information_on_Grain_Sizes_in_Gravel-Bed_Rivers_by_Automated_Image_Analysis>, consulté le 12/03/2024

SNEED E. et FOLK R. (1958). Pebbles in the Lower Colorado River, Texas a Study in Particle Morphogenesis. *Journal of Geology* n°66.

STEER P., GUERIT L., LAGUE D., CRAVE A. et GOURDON A. (2022). Size, shape and orientation matter: fast and automatic measurement of grain geometries from 3D point clouds. *Earth Surface Dynamics* [en ligne]. n°10. Disponible sur : <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03798205v2>>, consulté le 03/12/2023

TAKECHI H., ARAGAKI S. et IRIE M. (2021). Differentiation of River Sediments Fractions in UAV Aerial Images by Convolution Neural Network. *Remote Sensing* [en ligne]. n°13. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/rs13163188>>, consulté le 19/02/2024

TEPPATI LOSE L., SPREAFICO A., CHIABRANDO F. et GIULIO TONOLO F. (2022). Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain. *Remote Sensing* [en ligne]. **n°14**. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/rs14174157>>, consulté le 20/02/2024

TUCERYAN J. et JAIN A. (1998). Handbook of pattern recognition & computer vision. *World Scientific Publishing Co.* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/281297779_Handbook_of_pattern_recognition_computer_vision>, consulté le 06/04/2024

VÁZQUEZ-TARRÍO D., BORGNIE T L., LIÉBAULT F. et 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* [en ligne]. **n°285**. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.039>>, consulté le 03/12/2023

WALICKA A. et PFEIFER N. (2022). Automatic Segmentation of Individual Grains From a Terrestrial Laser Scanning Point Cloud of a Mountain River Bed. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing* [en ligne]. **n°15**. Disponible sur: <<http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3141892>>, consulté le 19/02/2024

WANG C., LIN X. et CHEN C. (2019). Gravel Image Auto-Segmentation Based on an Improved Normalized Cuts Algorithm. *Journal of Applied Mathematics and Physics* [en ligne]. **n°7**. Disponible sur : <<https://doi.org/10.4236/jamp.2019.73044>>, consulté le 19/02/2024

WARRICK J., RUBIN D., RUGGIERO P., HARNEY J., DRAUT A. et BUSCOMBE D. (2009). Cobble cam: Grain-size measurements of sand to boulder from digital photographs and autocorrelation analyses. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. **n°34**. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1002/esp.1877>>, consulté le 25/03/2024

WOLMAN M. (2009). A method of sampling coarse river-bed material. *American Geophysical Union, Transactions* [en ligne]. n°35. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>>, consulté le 20/03/2024

WONG T., KHANAL S., ZHAO K. et LYON S. (2023). Grain size estimation in fluvial gravel bars using uncrewed aerial vehicles: A comparison between methods based on imagery and topography. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. n°49. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1002/esp.5709>>, consulté le 19/02/2024

YAGHOOBI H., MANSOURI H., ALI EBRAHIMI FARSANGI M. et NEZAMABADI-POUR H. (2019). Determining the fragmented rock size distribution using textural feature extraction of images. *Powder Technology* [en ligne]. n°342. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.006>>, consulté le 02/04/2024

Liste des figures

Figure 1 : Axes des sédiments, a l'axe le plus long, b l'axe moyen, c le plus petit	6
Figure 2 : Comparaison des axes visibles des grains sur le lit et sur la berge de la rivière du Cher et représentation de l'orientation des grains dans la berge ; (a) photo du lit de la rivière avec l'axe a et b visibles (b) photo de la berge de la rivière avec l'axe c visible et l'axe b/a difficile à définir à exactement ; (c) positionnement des 3 grains du schéma (d) ; (d) différence entre les axes visibles des 3 grains identiques	9
Figure 3 : Exemple de mesure granulométrique par méthode de décompte en grille réalisée par photo. (Malavoi et Adam, 2007)	10
Figure 4 : Schéma du tamisage des grains grossiers et photo de terrain du tamisage	13
Figure 5 : Localisation des deux sites d'étude, C : le Cher près de St-Armand-Montrond et A : l'Armançon près de Saint Florentin (données cartographiques d'IGN)	17
Figure 6 : Comparaison entre deux nuages de points relevés de façon identique avec deux applications différentes, Polycam et PIX4Dcatch	19
Figure 7 : Principales fonctions de l'algorithme G3Point (Steer et al., 2022)	21
Figure 8 : les trois diamètres (d.) des ellipsoïdes	25
Figure 9 : Histogramme des masses des sédiments par classe de taille des différentes berges.....	26
Figure 10 : Différence de rugosité entre les nuages créés par Metashape et Polycam à <50cm de la berge pour la berge de la rivière du Cher	27
Figure 11 : Comparaison de l'élévation des différents nuages de points pour la berge de l'Armançon, d : distance de la berge	28
Figure 12 : Distributions granulométriques obtenues par tamisage et par G3point sur les deux sites d'études avec les données photogrammétriques.....	29
Figure 13 : Comparaison des distributions granulométrique cumulées et centiles clés (5e, 10e, 16e, 25e, 50e, 75e, 84e, 90e, 95e) obtenus par tamisage (mesure de l'axe b) et par G3point sur site d'étude du Cher et pour les 3 diamètres	30
Figure 14 : Comparaison des distributions granulométrique cumulées et centiles clés (5e, 10e, 16e, 25e, 50e, 75e, 84e, 90e, 95e) obtenus par tamisage (mesure de l'axe b) et par G3point sur site d'étude de l'Armançon et pour les 3 diamètres	31
Figure 15 : Résultat de la segmentation de la berge du Cher avec le diamètre intermédiaire.....	32

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif de différentes études traitant l'analyse de l'estimation des tailles sédiments à partir de diverses méthodes, avec les outils D : drone, P : photographies, L : laser scanner et Li : LiDAR	15
Tableau 2 : Comparaison des diamètres des cibles sur les nuages de points issus de Metashape ...	20
Tableau 3 : Ensemble des paramètres de G3Points. Les paramètres importants dans le calcul sont entourés en noir	22
Tableau 4 : Tableau des valeurs des paramètres finaux choisis par segmentation visuelle.....	24
Tableau 5 : Sphéricité des sédiments du Cher et de l'Armançon pour chaque classe granulométrique, méthode de Sneed and Folk (1958).....	27
Tableau 6 : Comparaison des pourcentages d'erreur absolue entre les données de référence et celle de G3Point pour les 3 diamètres et pour chaque centiles clés. d. : diamètre et interm. : intermédiaire.....	32

Détermination automatique de la granulométrie des remblaiements alluviaux : Exploration du potentiel des données images et LiDAR iPhone

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., 2024

RESUME

Cette étude explore l'utilisation des données photogrammétriques et LiDAR de l'iPhone pour l'estimation de la granulométrie sur les berges des rivières. Ces données ont été comparées avec une vérité terrain par un échantillonnage volumétrique et tamisage sur Cher et Armançon.

Les données LiDAR de l'iPhone ont montré des limites importantes, telles que l'aplatissement des surfaces, ce qui a entravé leur utilisation avec G3Point, un programme Matlab de segmentation de nuages de points, qui permet une estimation semi-automatique de la granulométrie. En revanche, les techniques de photogrammétrie ont permis de tester G3Point. G3Point a produit des résultats satisfaisants en utilisant le diamètre intermédiaire pour le Cher, mais a montré une erreur plus importante pour l'Armançon, potentiellement due à une sur-segmentation. Bien que G3Point soit prometteur pour l'estimation granulométrique, des ajustements et des optimisations sont nécessaires pour améliorer la précision et traiter plus efficacement les nuages de points.

Mots clés : Granulométrie, LiDAR, iPhone, Photogrammétrie, Berge des rivières

SUMMARY

This study explores the use of iPhone photogrammetric and LiDAR data for estimating grain size on the banks. These data were compared with ground truth measurements by volumetric sampling and sieving on Cher and Armançon.

The iPhone LiDAR data showed significant limitations, such as surface flattening, which hindered their use with G3Point, a Matlab program for point cloud segmentation that provides semi-automated grain size estimation. In contrast, photogrammetry techniques allowed for testing G3Point. G3Point produced satisfactory results using the intermediate diameter for the Cher, but showed a greater error for the Armançon, potentially due to over-segmentation. While G3Point is promising for grain size estimation, adjustments and optimizations are needed to improve accuracy and handle point clouds more effectively.

Keywords: Granulometry, LiDAR, iPhone, Photogrammetry, Riverbanks
