



Évaluation du transport solide : synthèse globale et évaluation d'un protocole de mesure de la granulométrie

Mathieu Cassel, Fanny Arnaud, Hervé Piégay, Thomas Depret, Fabien Boultaut, Valentin Chardon

► To cite this version:

Mathieu Cassel, Fanny Arnaud, Hervé Piégay, Thomas Depret, Fabien Boultaut, et al.. Évaluation du transport solide : synthèse globale et évaluation d'un protocole de mesure de la granulométrie. [Rapport de recherche] CNRS UMR 5600 - EVS. 2019. hal-03299170

HAL Id: hal-03299170

<https://hal.science/hal-03299170>

Submitted on 26 Jul 2021

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.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

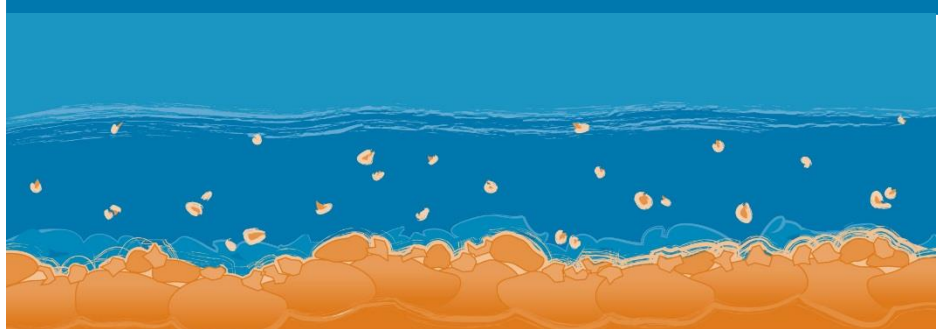
OSR5 2018-2020

Action A2.2 : Évaluation du transport solide : synthèse globale et évaluation d'un protocole de mesure de la granulométrie

Version du 11 juin 2019



Plan
Rhône



Action A2.2 : Évaluation du transport solide : synthèse globale et validation d'un protocole de mesure de la granulométrie

Personnes impliquées	Équipe de recherche
Cassel M., Arnaud F., Piégay H., Dépret T., Boultaut F., Chardon V.	ENS CNRS UMR5600

Pour cette action, l'équipe scientifique de l'OSR a bénéficié d'une collaboration étroite avec les équipes techniques de la CNR (en particulier Christophe Mora et Lionel Méric) pour réaliser les acquisitions granulométriques dans le chenal.

Les travaux menés visent à évaluer la possibilité d'utiliser les techniques acoustiques et d'imagerie subaquatique pour l'échantillonnage in situ des particules, ainsi que l'emploi de logiciels informatiques pour la mesure automatisée, semi-automatisée ou manuelle de la taille de ces particules.

R A P P O R T	6
1. INTRODUCTION	8
2. PRESENTATION DES SECTEURS D'ETUDE	9
2.1. Le secteur de Miribel	9
2.2. Le secteur de Bourg-lès-Valence	10
3. METHODES D'ACQUISITION ET DE MESURE	12
3.1. L'acquisition	12
3.1.1. Échantillonnage massique	12
3.1.2. Échantillonnage par photographie numérique	13
3.1.3. Échantillonnage acoustique par sonar latéral	19
3.2. Mesure et traitement des images	23
3.2.1. Procédure automatisée	23
3.2.2. Procédure semi-automatisée	26
3.2.3. Procédure manuelle	27
4. SYNTHESE ET PERSPECTIVES	29
4.1. Échantillonnage	29
4.2. Mesure	31
A N N E X E S	38

R A P P O R T

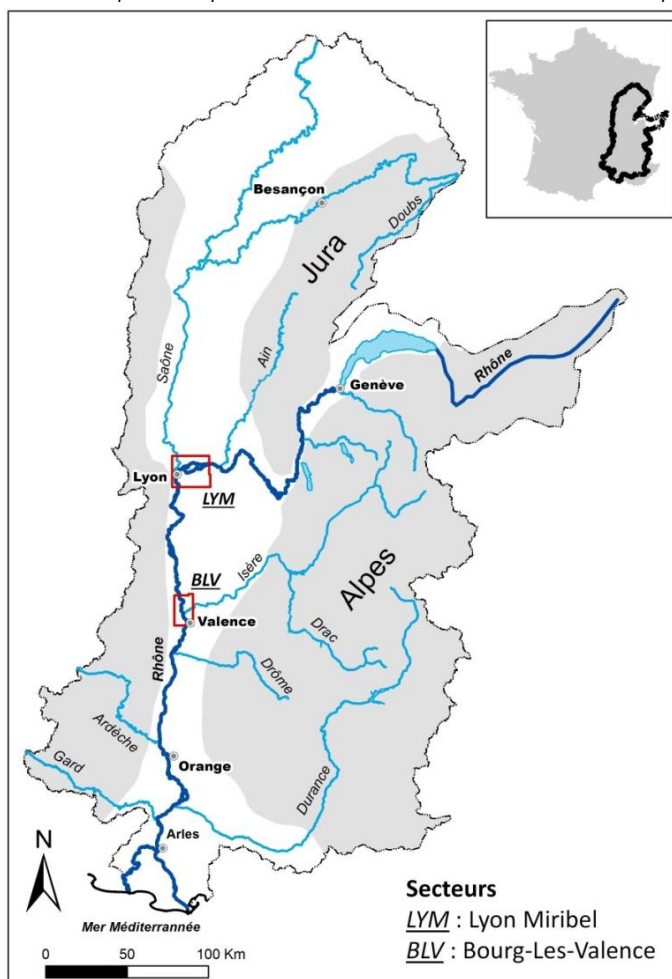
1. INTRODUCTION

L'action A2.2 du programme OSR5 a pour but de compiler et synthétiser les résultats des tests granulométriques effectués dans les précédents programmes OSR sur le fleuve Rhône et de confronter ces tests aux nouveaux développements en cours pour caractériser la granulométrie. La caractérisation de la granulométrie est soumise à une série de compromis liée à des raisons pratiques, logistiques, de moyens humains et financiers, des contraintes de temps et de perturbation du milieu (prélèvements physiques) et il est aujourd'hui nécessaire de bien identifier quelles techniques retenir pour la mesurer, notamment dans le chenal en eau, afin de rendre compte de l'effet des actions réparatoires engagées sur le Rhône.

Des acquisitions granulométriques ont été réalisées dès l'OSR1 pour décrire le continuum sédimentaire du Rhône du Léman à la Méditerranée et de nouveaux dispositifs ont été testés dans l'OSR3. Les développements effectués dans l'OSR4 ont concerné l'intégralité de la chaîne de traitements permettant la caractérisation granulométrique. Les éléments synthétisés et discutés dans ce rapport portent sur les protocoles **d'acquisition des données brutes et la mesure des axe-b**.

L'objectif de ce rapport est donc de réaliser une synthèse des acquisitions granulométriques réalisées à ce jour dans l'OSR, de comparer et discuter les dispositifs d'acquisition des données et d'échantillonnage, les méthodes de mesure et traitement des données, et d'en tirer des recommandations en fonction des environnements fluviaux. Plus particulièrement, les tests, menés sur les tronçons court-circuités de Miribel et de Bourg-lès-Valence (Figure 1), visaient notamment à évaluer le potentiel i) des techniques acoustiques et d'images subaquatiques pour l'acquisition des données *in situ*, ii) des logiciels informatiques pour l'échantillonnage et la mesure automatisée, semi-automatisée ou manuelle de la taille des particules. D'un point de vue opérationnel, l'une des questions posées est de savoir s'il est possible de définir un protocole d'acquisition et de traitement des données qui soit pertinent dans le chenal en eau et qui permette : i) de statuer sur l'efficacité de mesures de restauration des formes et/ou processus alluviaux, ii) d'aider à la modélisation de la capacité de transport et des changements morphologiques, iii) de disposer d'une granulométrie suffisamment précise et représentative pour proposer une estimation fiable des volumes charriés.

Figure 1. Localisation des RCC de Miribel et Bourg-Lès-Valence dans le bassin versant du Rhône.



2. PRESENTATION DES SECTEURS D'ETUDE

Les deux secteurs d'étude sont localisés sur le Rhône moyen et le Bas-Rhône et présentent une charge sédimentaire graveleuse dont le transit a été perturbé depuis le XIX^{ème} siècle par une série d'aménagements sur lesquels nous reviendrons succinctement. Toutefois, tandis qu'au sein du secteur de Miribel un transport solide actif est toujours observé, le secteur de Péage de Roussillon ne présente qu'un transport solide résiduel.

2.1. Le secteur de Miribel

Le secteur de Miribel s'étend sur un linéaire d'environ 25 km et intègre deux sections distinctes (Figure 2) :

- La section amont s'étend de la confluence avec l'Ain jusqu'au barrage de Jons sur une longueur d'environ 8 km. Elle correspond pour l'essentiel à la retenue de l'ouvrage et présente un fonctionnement hydro-sédimentaire dépendant des modes de gestion du barrage ;
- La section aval comprend :
 - o le canal de Miribel (18 km), qui correspond au lit court-circuité du Rhône et dont la dynamique fluviale a été profondément modifiée depuis le milieu du XIX^{ème} siècle par plusieurs phases d'aménagement (concentration des écoulements dans le canal de Miribel de 1848 à 1897, construction de la dérivation de Jonage de 1894 à 1899 et du barrage de Jons en 1937, exploitation des sédiments du lit mineur). Ces aménagements ont concouru à transformer le style en tresses du tronçon en un chenal unique, et l'ajustement des formes fluviales ne se réalise plus guère que dans la dimension verticale.
 - o le canal de Jonage (20 km), qui alimente l'usine hydro-électrique de Cusset.

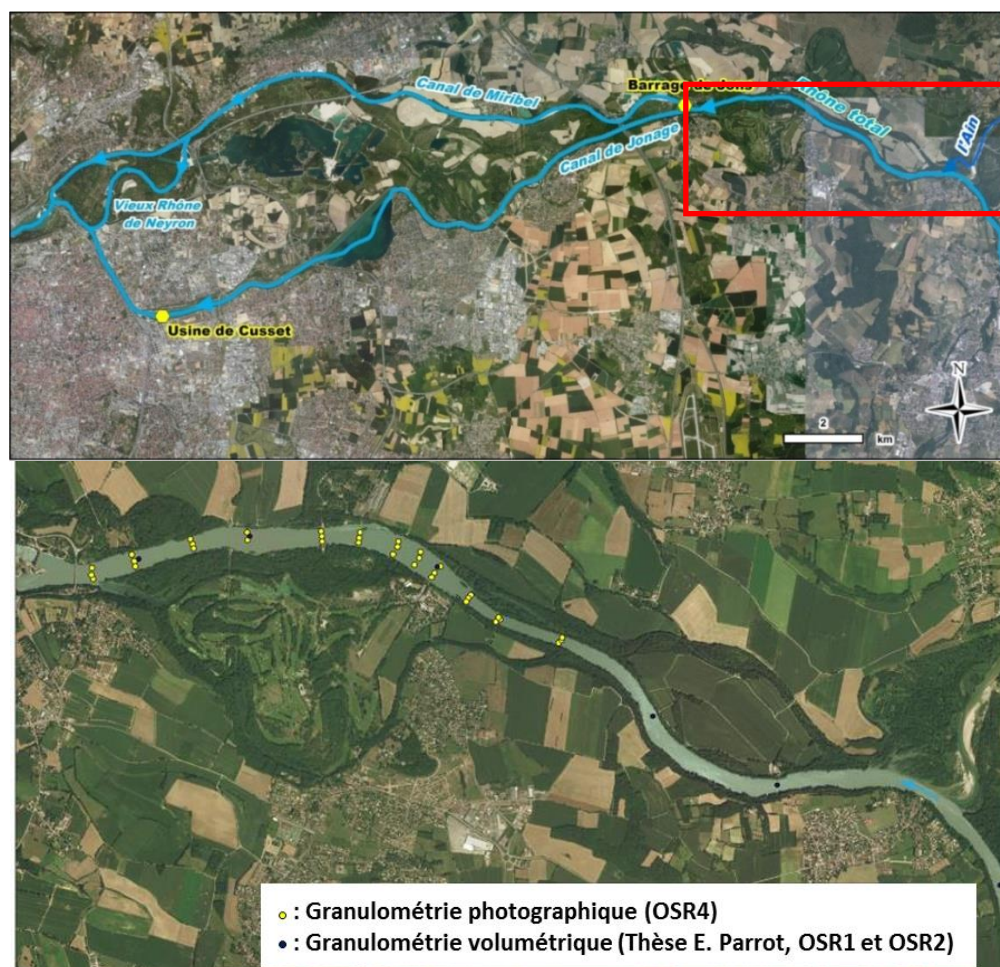


Figure 2. Vue d'ensemble du secteur de Miribel-Jonage (en haut) et des campagnes d'échantillonnages granulométriques réalisées en amont du barrage de Jons (en bas).

Actuellement, le barrage de Jons est transparent pour la charge de fond, et l'essentiel des matériaux provenant de l'amont (soit un volume annuel moyen estimé entre 30 et 40 000 m³ fourni par l'Ain) transite par le canal de Miribel. La transparence est partielle à partir d'un débit à l'amont de Jons de 900 m³.s⁻¹ et totale au-delà de 2100 m³.s⁻¹, soit pour des crues de période de retour 2 et 4 ans, respectivement (calcul par ajustement de Gumbel avec la chronique de débits journaliers à la station de Lyon pour la période 1920-2013). Malgré la gestion de l'ouvrage en transparence, la grande mobilité de la charge de fond (40 et 30 jrs de dépassement des seuils de mobilité partielle et totale, respectivement (Petit et al., 1996)) et l'abondance de cette dernière, la section endiguée du chenal contribue à l'export rapide des particules ayant entrainé d'après Malavoi (2000) un enfouissement du lit de deux à trois mètres en moyenne entre 1952 et 1996.

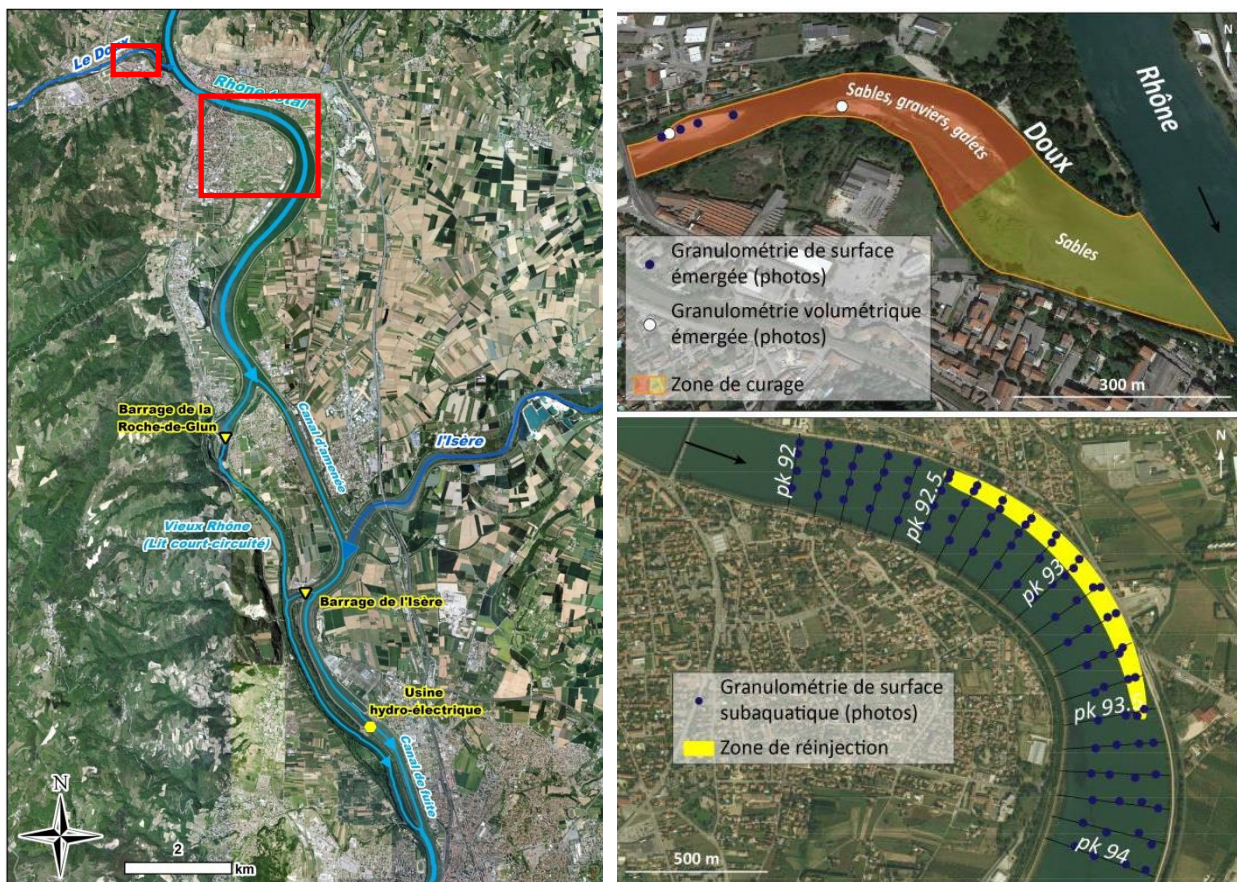
Dans ce contexte, une étude visant à améliorer notre compréhension des modalités de transit, stockage et déstockage de la charge de fond sur le secteur de Miribel-Jonage (retenue + canal de Miribel) en employant deux approches complémentaires a été réalisée dans le cadre de l'action 1.2 de l'OSR4 : i) des suivis de traceurs sédimentaires, ii) un modèle hydraulique 1D confronté à des mesures *in situ* de la granulométrie. La granulométrie a été caractérisée par des mesures de surface (photographies subaquatiques) et volumétriques (données de thèse E. Parrot – OSR1 et OSR2).

2.2. Le secteur de Bourg-lès-Valence

Situé sur le Rhône moyen, en amont de la confluence avec l'Isère (Figure 1), ce secteur s'étend sur 10 km entre les Pks 90 et 99.4, soit de la confluence avec le Doux jusqu'au barrage de la Roche-de-Glun. Il englobe l'essentiel de la retenue créée par ce barrage. Le Rhône présente ici une largeur moyenne de 306 m (comprise entre 161 et 431 m), un débit moyen annuel de 1067 m³.s⁻¹ (établi sur la période 1956-2013) et un régime hydrologique peu contrasté avec une faible différence entre débits mensuels minimum et maximum (707 et 1414 m³.s⁻¹ en septembre et février, respectivement). L'ouvrage de Bourg-lès-Valence a été mis en service en 1968. Le débit d'équipement (c.-à-d. le débit maximal pouvant être turbiné par l'ouvrage) de l'usine hydro-électrique de Bourg-lès-Valence est de 2200 m³ s⁻¹. Lorsque le débit du Rhône total (moins le débit de l'Isère) est supérieur à cette valeur, les six vannes de fond du barrage de la Roche-de-Glun sont ouvertes de sorte que le débit excédentaire est dérivé dans le Vieux Rhône.

Depuis la mise en service du barrage en 1968, la partie terminale du Doux, située dans la zone de remous de la retenue, constitue un piège à sédiment pour l'intégralité de la charge de fond et une partie des sédiments fins. Ce piégeage résulte de l'élargissement de l'embouchure du Doux pratiquée par la CNR au moment de la création de la retenue. Ces travaux étaient destinés à réduire les apports en sédiments grossiers au Rhône car ils sont susceptibles d'entraver la navigation. Les dépôts ont induit un exhaussement du lit du Doux à l'origine d'une augmentation du risque inondation sur ce secteur. Afin de réduire ces effets collatéraux, la CNR et la CCT (Communauté de Communes du Tournonnais) procèdent régulièrement au curage du lit du Doux. Auparavant extraits du lit puis revendus, les sédiments curés sont désormais réintroduits dans le Rhône entre les Pks 92,5 et 93,5, au niveau de la concavité d'une boucle dessinée dans le réservoir. On distingue deux types de curage et de réinjection en fonction de la granulométrie des sédiments concernés. Le premier concerne les sédiments fins (argiles, limons, sables), le second les sédiments grossiers (sables, graviers, galets). Jusqu'en 2011, les prélèvements ne concernaient que les sédiments fins. Le volume total s'élève à 130262 m³ et on ignore s'ils ont fait l'objet de réinjections. Depuis 2012, 98990 m³ de sédiments grossiers ont été réinjectés au cours de quatre campagnes distinctes.

Dans ce contexte, un diagnostic du fonctionnement hydrosédimentaire du tronçon situé entre la confluence du Doux et le barrage de la Roche-de-Glun, a été réalisé dans le cadre de l'action 1.3 de l'OSR4. Celui-ci s'est appuyé sur la comparaison des résultats d'un modèle hydraulique 1D de transport sédimentaire et des mesures granulométriques (Figure 3) de surface (photographies émergées et immergées) et subsurface (massique/volumique). Une campagne de mesure par sonar latéral a également été menée sur la même zone que celle où a été réalisé l'échantillonnage par photographie immergée.



3. METHODES D'ACQUISITION ET DE MESURE

3.1. L'acquisition

Nous définissons l'acquisition comme un prélèvement physique, l'échantillonnage ou la capture du ou des support(s) de l'information à mesurer. Il peut s'agir des particules sédimentaires elles-mêmes, d'une ou plusieurs photographies numériques (en deux dimensions) ou encore de sonagramme(s), voire d'un nuage de points LiDAR.

En matière d'acquisition granulométrique, plusieurs questions se posent :

➤ Comment et où capture-t-on l'information ?

Il s'agit là de la phase d'acquisition proprement dite. Deux approches sont communément retenues. Une approche classique, discrète, à partir de laquelle on va échantillonner le lit (soit par prélèvement direct en nombre ou en masse, soit par photo) (avec comme question sous-jacente celle de la représentativité des échantillons). Une plus récente, via des mesures optiques ou acoustiques, qui permet de couvrir l'intégralité des surfaces d'intérêt.

L'échantillonnage en nombre peut se faire en surface et en subsurface. L'échantillonnage en masse intègre généralement couches de surface et de subsurface. Il est également possible d'échantillonner en nombre en surface et en masse en subsurface.

Cette dichotomie, opposant couches de surface et subsurface, repose sur le fait que la plupart des patrons granulométriques observés présentent une structuration verticale.

Dans le cadre des travaux menés au sein de l'OSR, il est également nécessaire de distinguer les méthodes d'échantillonnage en milieu émergé et en milieu immergé, tant les contraintes opérationnelles propres à ces deux environnements présentent un contraste fort. Celles-ci sont particulièrement limitantes dans les chenaux en eau, notamment du fait de la variabilité spatiale des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement.

➤ - Comment mesure-t-on la taille des sédiments ?

Dans le cas de prélèvements, l'approche discrète en nombre nécessite un échantillonnage sur une grille. L'approche massique repose également sur un échantillon dont la masse totale dépend de la taille de la plus grosse particule. Les autres approches sont aréolaires et prennent en compte toutes les particules de la surface. Il s'agit néanmoins une fois encore d'un échantillon si elles sont discrètes (cas des photos) et se pose la question de leur représentativité par rapport à la tache granulométrique observée.

Parmi les méthodes testées ou déployées dans l'OSR, nous présenterons ci-dessous les échantillonnages massiques, surfaciques par photographie numérique (émergée et immergée) et par sonar latéral.

3.1.1. Échantillonnage massique

L'échantillonnage massique consiste à prélever un grand volume de particules, fonction du diamètre ($D_{\max}$) ou de la masse de la plus grosse particule de l'échantillon (Church et al., 1987), en un point donné. Ceci peut être réalisé suivant de nombreux protocoles employant divers outils (pelle, carottage à l'azote liquide, etc... Bunte and Abt, 2001 ; Figure 4 et Figure 5) avec l'objectif de collecter toutes les particules présentes sur une certaine surface et une certaine épaisseur de la couche d'intérêt jusqu'à atteindre la masse totale nécessaire. Les plus grosses particules sont ensuite mesurées sur place à l'aide de gabarit(s) ou d'un pied à coulisse. Les particules restantes sont calibrées par tamisage sur le terrain, ou en laboratoire pour les plus petites (< 11 ou 8 mm). Les différentes fractions granulométriques sont finalement pesées.

Figure 4. Dispositif mis en place pour l'échantillonnage massif en milieu émergé, sur le Doux.
(Source : Rapport A1.3 de l'OSR4)



Figure 5. Dispositif d'échantillonnage massif subaquatique composé d'une embarcation tractant un préleveur Cooper Scooper, à gauche ou une drague « CNR », à droite (Clichés : E. Parrot 2015 – OSR1 et 2).

Dans le cadre de l'OSR, l'échantillonnage massif présente un double intérêt. Il est adapté aux milieux émergés et immergés. Pour ces derniers, le prélèvement n'est possible que si le pavage ou l'armure ne sont pas trop développés. Il intègre en outre inévitablement la couche de surface et de subsurface. Ces échantillonnages massifs présentent d'importants inconvénients. Très chronophages (plusieurs heures selon le volume nécessaire), ils nécessitent une lourde manutention et parfois le transport des échantillons pour leur tamisage, limitant ainsi la répétition et la multiplication des prélèvements sur un site d'étude. Cette méthode permet donc de caractériser la granulométrie en un point donné mais est aussi la moins adaptée pour l'obtention d'une information spatialisée. Elle est néanmoins la seule à fournir toute la gamme granulométrique, y compris les fines, et est importante lorsque l'on envisage une modélisation du transport solide.

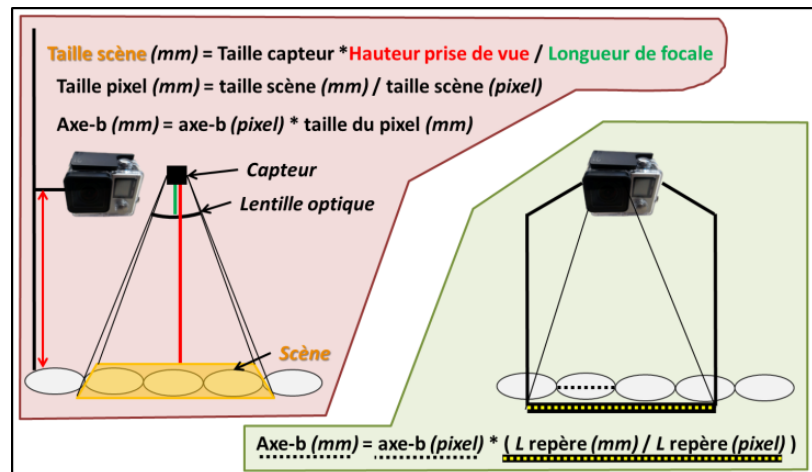
3.1.2. Échantillonnage par photographie numérique

La méthode d'échantillonnage par photographie offre les avantages suivants : elle est non-intrusive et rapide en termes d'acquisition. Elle évite le rapatriement de matériaux au laboratoire. Elle permet de caractériser la seule couche de surface et non un mélange de la couche de surface et de subsurface et d'appréhender ainsi le pavage. Les travaux pionniers utilisaient des photographies argentiques (Kellerhals and Bray, 1971; Adams, 1979; Ibbeken and Schleyer, 1986) pour caractériser la granulométrie sur des surfaces de petites tailles (par ex. 1 à 2 m²). À l'ère du numérique, l'échantillonnage par photographie repose sur le principe de conversion du pixel en millimètre. Cela peut être réalisé de deux manières différentes (Figure 6) :

- soit on utilise la hauteur de prise de vue, la longueur de focale et la taille et le nombre des photo-sites (cellules photo-électriques composant le capteur qui réagissent à la lumière et la convertissent en énergie électrique) pour calculer la taille d'un pixel en mm avec le théorème de Thalès (encadré rouge) ;
- soit on dispose d'un repère, dont les dimensions sont connues, présent sur la scène et qui permet de calculer le facteur de conversion de la valeur en mm de l'axe b (encadré vert).

Dans les deux cas, on suppose que la surface composée par les photo-sites du capteur est parallèle à la surface investiguée et que cette dernière est relativement plane.

Figure 6. Schématisation des méthodes d'échantillonnage photographique et de conversion du pixel en millimètre



Les conditions idéales lors d'un échantillonnage par photographie sont d'obtenir à la fois :

- une taille de scène suffisamment grande pour que l'échantillon soit composé d'un nombre de particules statistiquement représentatifs de la surface d'intérêt (au moins 100 pour obtenir un D50 relativement fiable) ;
- la meilleure définition possible pour que les plus petites particules (c.-à-d. les sables) soient constituées de plusieurs pixels, entre 3 (Rubin, 2004; Warrick et al., 2009; Buscombe, 2013) et 20 (Graham et al., 2005a, 2005b, 2005c; Detert and Weitbrecht, 2012) selon le mode de traitement des images, afin de pouvoir les identifier individuellement.

En pratique, puisque la définition maximale des photographies est limitée, un compromis doit être souvent trouvé entre la résolution au sol (en mm/pixel) et l'emprise spatiale de la photographie (Figure 7). En effet, le nombre maximum de photo-sites d'un capteur numérique est fixe et ne peut être ajusté en fonction de la hauteur de prise de vue que jusqu'à une valeur maximale de résolution. Or, plus on augmente la hauteur de prise de vue, plus la résolution au sol, en millimètre par pixel, augmente et la définition des particules les plus petites (c.-à-d. le nombre de pixels représentant ces particules) diminue.

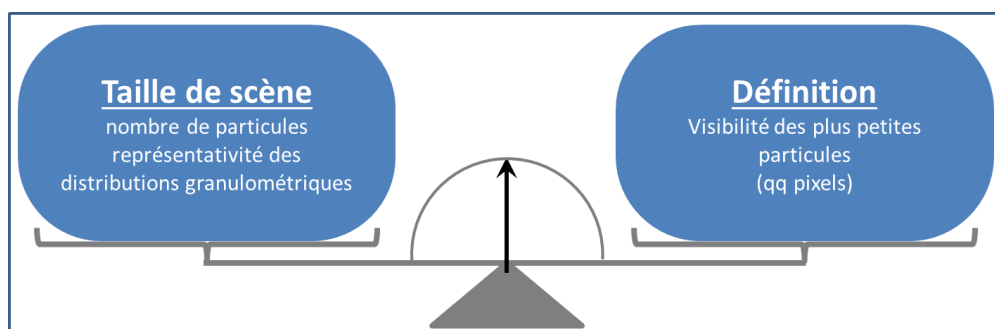


Figure 7. Illustration du compromis entre taille de la scène et résolution au sol.

La résolution croissante des capteurs numériques a permis d'embarquer les capteurs sur des engins volants (avion, ULM ou encore drone) pour réaliser des prises de vue de très grandes scènes (plusieurs km²) et caractériser la granulométrie jusqu'à l'échelle du réseau hydrographique (Carbonneau et al., 2004b, 2005; Black, 2013; Black et al., 2014). Toutefois, ces études sont basées sur des échantillonnages de surfaces émergées ou très peu profondément émergées (inf. à 50 cm). Or, en milieu immergé les contraintes sont plus nombreuses et plus marquées (cf. Figure 11).

Dans le cadre de l'OSR, différents dispositifs ont été testés ces dernières années par le laboratoire EVS. Le dispositif *EVS 1* est constitué d'un appareil photographique Reflex de 6 millions de pixels logé dans un caisson étanche (Figure 8) dont la hauteur de prise de vue est ajustable et permet un échantillonnage jusqu'à des profondeurs comprises entre 0.5 et 2.5 m (selon les vitesses d'écoulement. Tableau 1. Comparatif des dispositifs d'échantillonnage par photographie). L'appareil offre un retour visuel en direct grâce à une connexion USB à une tablette numérique de terrain.

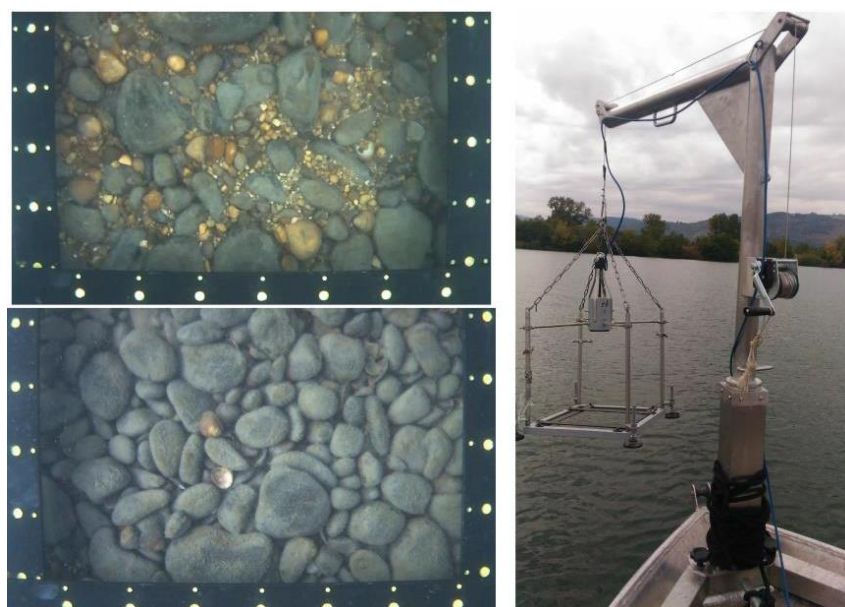


Figure 8. Dispositif EVS 1 (à gauche) et exemple de prise de vue (à droite).

Le dispositif CNR (Figure 9) est constitué d'une caméra de surveillance (caméra submersible 50m IP Full HD UW-UW-6020IP, Allwan Security®) fixée sur une structure métallique et manœuvrée à l'aide d'une poulie fixée à la proue d'un bateau (équipement et personnel technique mis à disposition par la CNR). La hauteur de prise de vue n'est pas ajustable car la base de la structure, parallèle au plan de focale de l'appareil, est composée d'un cadre fixe sur lequel des règles sont dessinées. L'emprise spatiale des photographies est de 32.6 x 21.8 cm. Le dispositif permet l'échantillonnage à des profondeurs allant de 0,9 m à au moins 15 m (pour des écoulements lents). Tableau 1).

Figure 9. Dispositif CNR (à droite) et exemples de prise de vue immergée (à gauche).

(Source : Rapport A1.2 de l'OSR4)



De nombreux tests ont été réalisés à différentes périodes de l'année et dans différents environnements aux conditions hydrauliques contrastées (profondeurs et vitesses d'écoulement). Ils ont permis de formaliser le cadre opérationnel suivant pour l'échantillonnage par photographie immergée (Figure 11). Deux composantes majeures conditionnent la qualité des images obtenues :

- le profil hydrodynamique du capteur et de sa structure associée (caisson étanche ou cube évidé pour les structures utilisées). Lié notamment à la taille du dispositif, le profil conditionne le déploiement de ce dernier. Les caractéristiques optiques et numériques du capteur conditionnent la qualité finale de l'acquisition (taille de la zone et résolution) (Figure 7) ;
- les conditions environnementales, regroupant à la fois les conditions hydrauliques (hauteur d'eau soit insuffisante, ce qui limite la taille de la scène, soit trop importante, ce qui empêche toute réalisation de prises de vue ; vitesses d'écoulement trop élevées pour permettre le déploiement du capteur), la luminosité (conditionnée par le rayonnement solaire, la turbidité et la profondeur, trois éléments qui contrôlent contrastes sur l'image), la granularité des sédiments (détermine la taille de scène) et enfin la présence ou l'absence d'éléments biologiques masquant (algues ou couques).

	EVS1 (Figure 8)	CNR (Figure 9)	EVS2 (Figure 10)
Profondeur minimale de déploiement	Sup. à 0.50 m	Sup. à 1 m	Sup. à 0.50 m
Profondeur maximale de déploiement	Inf. à 2 m	Jusqu'à 15 m	Jusqu'à 3 m
Nb d'opérateurs nécessaires	2	3-4	2-3
Hydrodynamisme	-	0	+
Embarcation nécessaire	Non	Bateau à coque alu. 6 pers.	Non
Maniabilité	Moyenne	Faible	Grande
Mesures complémentaires ?	Hauteur prise de vue	Aucune	Hauteur prise de vue

Tableau 1. Comparatif des dispositifs d'échantillonnage par photographie

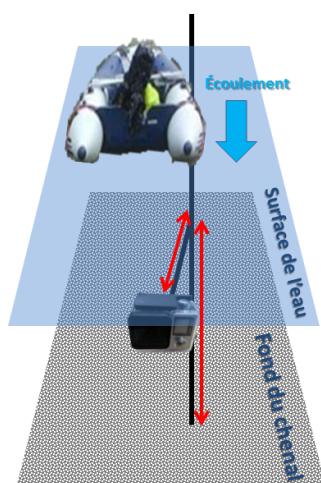


Figure 10. Vue schématique du nouveau dispositif EVS.

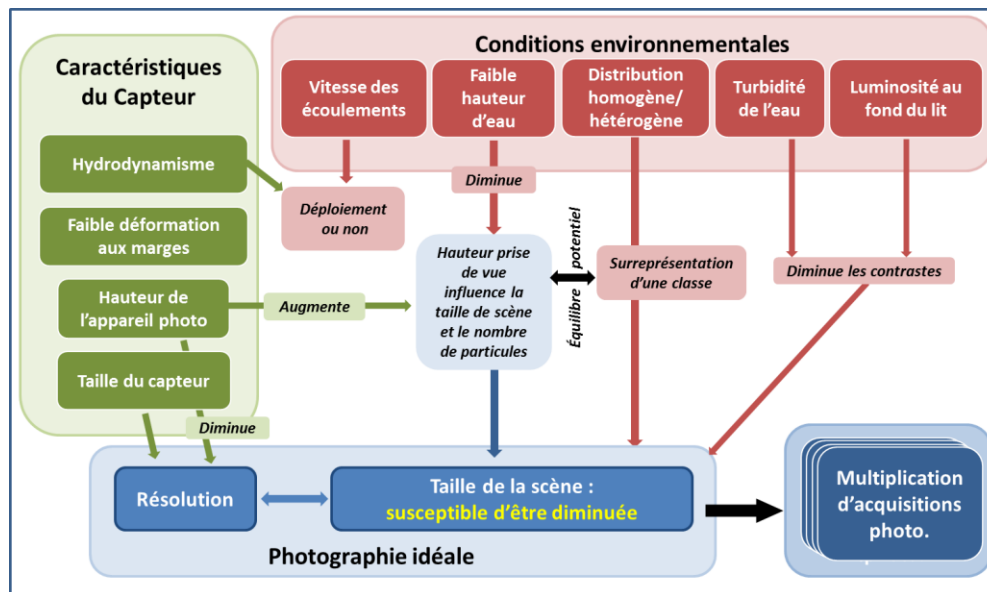


Figure 11. Cadre opérationnel des contraintes à l'échantillonnage par photographie immergée.

En dépit de ces nombreuses contraintes d'acquisition, la photographie numérique immergée présente de nombreux avantages et un grand intérêt pour l'OSR. En effet, la grande vitesse des acquisitions permet de renseigner des surfaces étendues et/ou de couvrir de façon assez dense les zones d'étude. La caractérisation granulométrique à grande échelle n'est cependant possible qu'à condition de disposer de méthodes de mesure et de programmes de traitement des images efficaces. Ces derniers éléments sont abordés en section 3.2. Par ailleurs, les dispositifs EVS 1 ou CNR n'autorisent actuellement qu'un plan d'échantillonnage par quadrillage systématique. Or, cet aspect discontinu de l'échantillonnage est pénalisant pour la spatialisé / cartographie de la granulométrie à l'échelle des formes fluviales, qui est par exemple préconisée dans les suivis des travaux de restauration. C'est pourquoi une méthode d'échantillonnage continu, par sonar acoustique latéral, a été testée à Bourg-Lès-Valence (voir section 3.1.3).

Les nombreux échantillons photographiques réalisés nous ont permis de formaliser un certain nombre de recommandations pour la réalisation de photographies de bonne de qualité (Tableau 2). Une photographie est considérée comme étant de bonne qualité, lorsque les particules sont propres, présentent des contours bien délimités par des contrastes marqués, sont dépourvues d'éléments masquant (algues, coques, sédiments fins). La qualité et les caractéristiques de la photographie influencent grandement les méthodes, programmes et temps de traitement des images pour la mesure des particules (voir section 3.2). C'est pourquoi, certaines précautions quant à la planification des campagnes de terrain devraient être observées afin d'imager des surfaces dont la granulométrie peut être déterminée automatiquement. Les campagnes d'acquisition doivent ainsi être réalisées :

- avant la période de développement du biofilm qui masque les contours des particules ;
- ou après les crues les plus mobilisatrices de charge de fond, de sorte que les particules mobilisées aient été nettoyées ;
- ou avant des crues de plus faible ampleur qui pourraient déposer une couche de sédiments fins, et diminuer ainsi les contrastes aux bordures des particules (Figure 12);
- en évitant les journées ensoleillées car la diffusion du rayonnement solaire par les particules en suspension dans l'eau (turbidité) provoque une forte luminosité, diminuant également les contrastes aux bordures des particules (Figure 12);

Dans le cadre de l'OSR3, l'influence des conditions météorologiques et de turbidité sur la qualité des photographies immergées avait été synthétisée (Tableau 3).

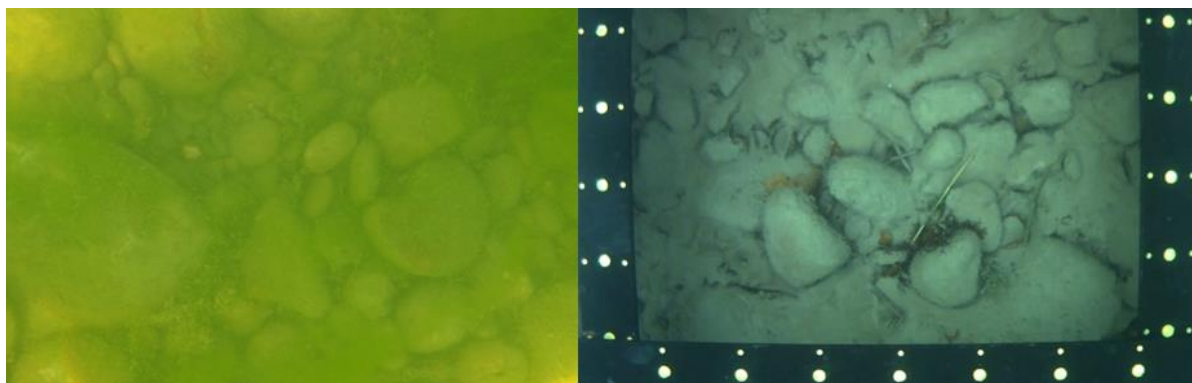


Figure 12. Exemples d'échantillons de mauvaise qualité due à du biofilm et à des fines.

	Environnement extérieur	Capteur		Visibilité		Particules	
Qualité du cliché	Luminosité	Mise au point	Angle de vue	Turbidité	Éléments masquant les contours*	Agencement**	Lithologie(s)
Excellent	Bonne, Homogène, sans rayonnement ni ombre	Bien nette	Verticale	Nulle	Aucun	Nul	Homogène Non-grenue
Très bon	Bonne, Homogène, sans rayonnement ni ombre	Nette	Verticale	Très faible	Rare(s) ou léger(s)	Nul à faible	peu hétérogène mais non-grenue
Bon	Forte ou faible mais homogène et sans rayonnement ni ombre	Nette	Très légèrement oblique	faible	Rare(s) ou léger(s)	Faible	Hétérogène mais non-grenue
Moyen	Forte ou faible Avec rayonnement et/ou ombre	Légèrement floue	Peu oblique	faible	Plusieurs mais légers	Faible	Hétérogène mais non-grenue
Mauvais	Trop forte et/ou trop faible, hétérogène, avec fort rayonnement et ombrage	Floue	Oblique	Forte	Nombreux ou marqué(s)	marqué	Hétérogène dont grenue
Très mauvais	Trop forte et/ou trop faible, hétérogène, avec fort rayonnement et ombrage	Franchement floue	Très oblique	Très Forte	Très nombreux et/ou très marqués	Très marqué	Hétérogène dont grenue
					* : végétation, biofilm, coque,	** : tuillage	

Tableau 2. Critères d'évaluation de la qualité des échantillons photographiques immergés pour la mesure granulométrique automatique par des programmes de traitement d'image.

Conditions météorologiques	Turbidité		
	Faible < 5 mg/L	Moyenne > 5 et < 10 mg/L	Forte > 10 mg/L
Pluie	--	--	---
Nuageux	+++	++	-
Variable	++	+	--
Ensoleillé	+++	-	---
+ Vent	-	--	---

Tableau 3. Grille de sélection des conditions optimales pour la prise de photographies immergées en fonction des conditions météorologiques et de la turbidité.

Le vent est un facteur défavorable supplémentaire. Ainsi une journée ensoleillée avec une faible turbidité mais un vent fort est classée comme (-)

3.1.3. Échantillonnage acoustique par sonar latéral

Les techniques acoustiques ont d'abord été utilisées pour l'exploration des fonds, la recherche d'objets ou la caractérisation de dépôts en milieu marin et côtier (Alexandrou and Pantartzis, 1993; Borgeld et al., 1999; Goff et al., 2000; Collier and Brown, 2005; Ferrini and Flood, 2006; Medialdea et al., 2008) avant d'être testées en rivière à la fin des années 2000 (Amiri-Simkooei et al., 2009). L'intérêt majeur de la technique acoustique est de permettre la caractérisation des fonds même sur une large gamme de profondeurs (de 1-2 m à plusieurs centaines de mètres), relativement rapidement (quelques heures) et sur de grandes surfaces (plusieurs hectares). Les sonars sont généralement déployés à partir d'embarcations dont la taille peut être très variable selon les environnements. Les sonars fonctionnent tous selon un même principe consistant en l'émission d'une impulsion acoustique, qui est réfléchié spéculairement (en un seul rayon sans diffusion) et dont on enregistre l'écho (c'est pourquoi le terme « écho sondeur » est parfois employé dans la littérature). Suivant les modèles, une ou plusieurs impulsions acoustiques (« *beam* » ou « *pulse* » en anglais) dans les hautes fréquences (à partir de 100 ou 500 kHz selon la résolution recherchée) sont émises par une première antenne. On parle de sonar « latéral » lorsque les impulsions sont émises sur les côtés, perpendiculairement à l'axe de l'embarcation. Les échos sont enregistrés par une seconde antenne qui peut être située dans un module tout intégré ou dans un module « poisson » du sonar tracté à l'arrière de l'embarcation. Plus un sonar peut émettre et enregistrer des impulsions à différentes fréquences simultanément, plus la résolution du sonagramme sera précise : du centimètre au mètre d'après Buscombe et al. (2014).

Même si la littérature fait état d'une utilisation grandissante de cette méthode d'acquisition, elle ne permet pour l'instant qu'une mesure qualitative de la granulométrie (Kaesler et al., 2013; Hamill et al., 2016, 2018; Buscombe et al., 2017). Elle présente en revanche l'avantage de spatialiser de façon continue la granulométrie des lits (Figure 13). Ces résultats ne s'obtiennent qu'au moyen d'une cartographie supervisée, c.-à.-d. une digitalisation manuelle qui nécessite une certaine expertise pour interpréter les contrastes du sonagramme (Figure 14). Suivant les études, les caractéristiques des capteurs et les contrastes granulométriques locaux, les auteurs choisissent de retenir 3 à 5 classes granulométriques, s'échelonnant des limons aux blocs en passant par le sable et avec parfois une distinction entre graviers fins et grossiers. Cette méthode d'échantillonnage peut aussi être associée à une validation visuelle par photographie immergée (Grams et al., 2013; Peteuil et al., 2017). Une partie des recherches actuelles concerne le développement d'un processus automatique, et donc sans biais, pour la caractérisation et la cartographie des ensembles granulométriques homogènes.

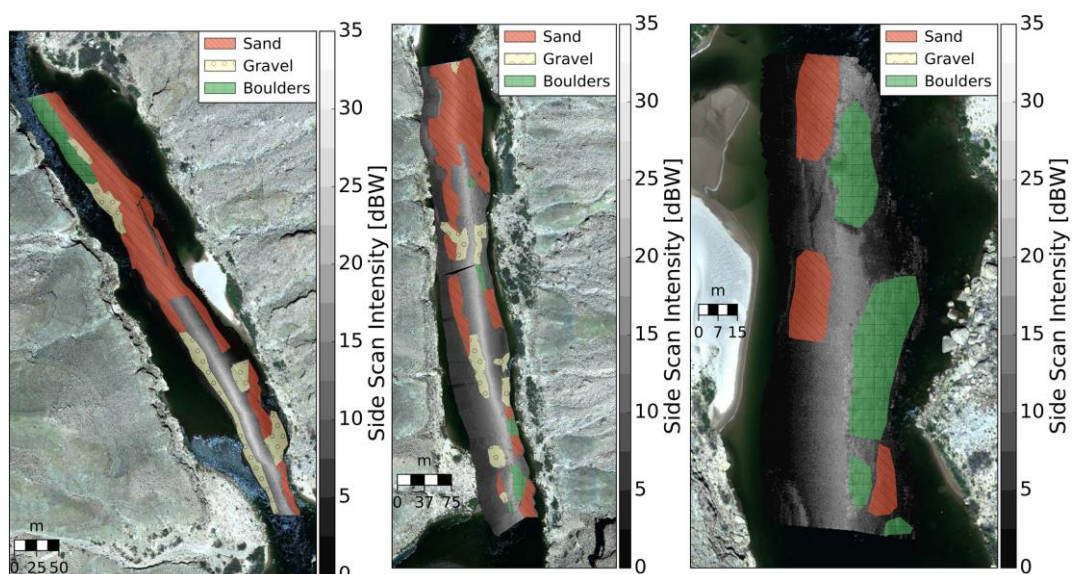


Figure 13. Exemple de cartographie manuelle du substrat à partir d'un sonagramme. (Source : Hamill et al. (2016)).

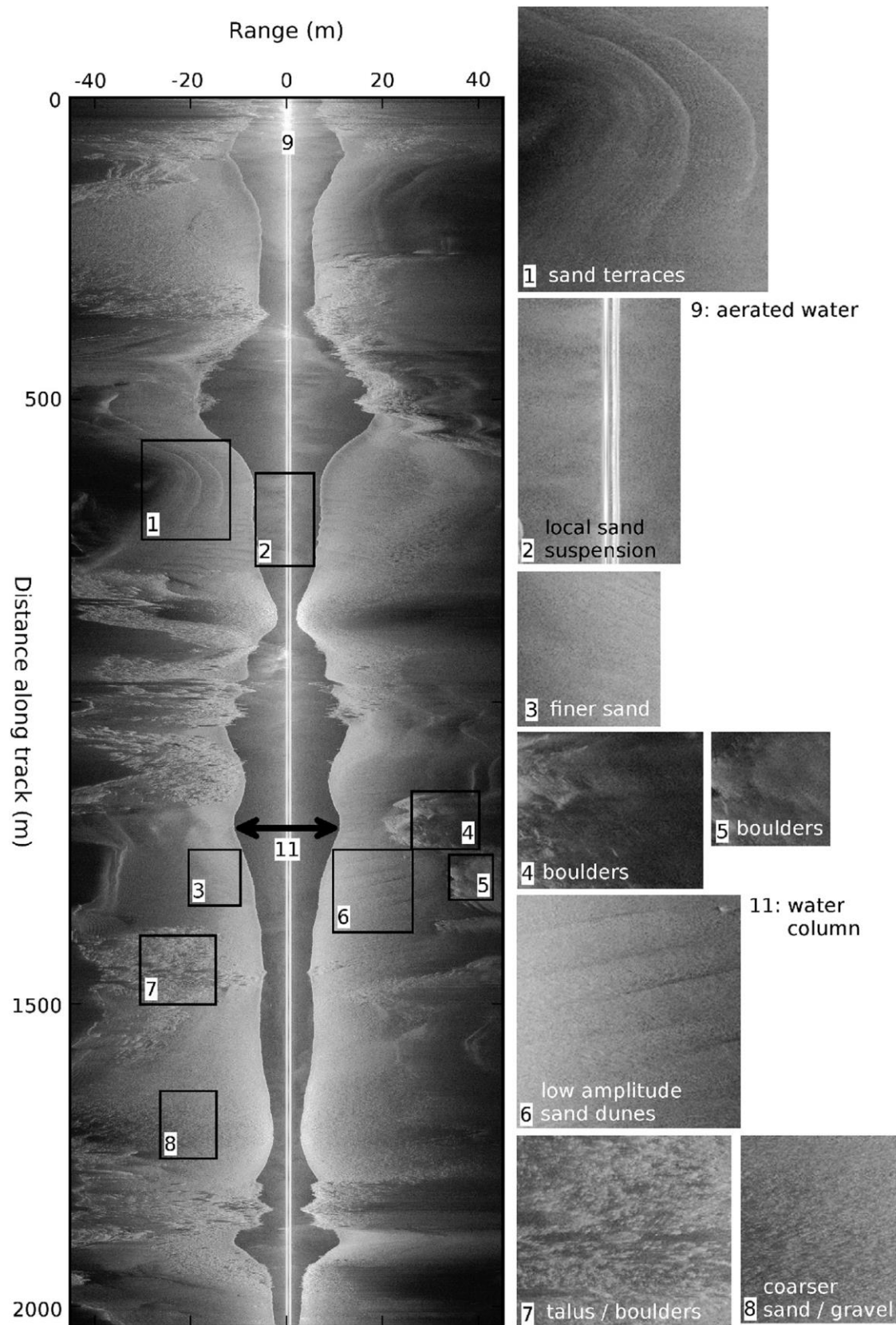


Figure 14. Exemple de sonagramme et des contrastes liés aux formes alluviales et à la granulométrie du fond.

(Source : Buscombe (2017))

Le dispositif employé par la CNR est un sonar latéral (*SYSTEM 3900 SIDE SCAN SONAR*) émettant deux signaux : un à 455 kHz et un autre à 900 kHz pour des profondeurs d'échantillonnage atteignant 200 m. Il est compact et maniable, ce qui permet son déploiement dans des chenaux rapides et profonds mais aussi dans des retenues (Figure 15).

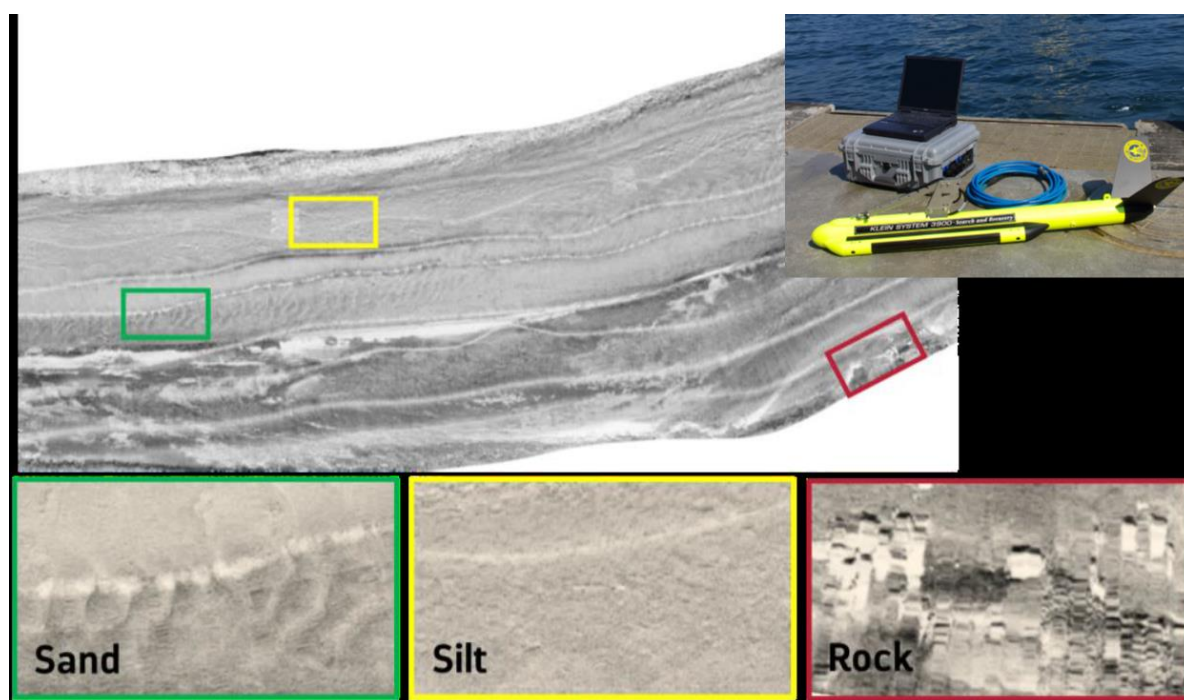


Figure 15. Sonar latéral CNR et exemple d'acquisition.
(Source : Peteuil et al. (2017)).

Ce sonar a été déployé à Bourg-Lès-Valence sur le site de réinjection sédimentaire, dans la concavité en aval de Tournon-sur-Rhône et Tain-l'Hermitage. Il a permis l'échantillonnage d'environ 66 ha, c'est-à-dire la surface échantillonnée par photographie immergée (Figure 16). 31 sonagrammes individuels ont été nécessaires pour générer le sonagramme couvrant toute la zone échantillonnée par les 89 points de photographie (Figure 9). La résolution d'un pixel du sonagramme est de 60 * 50 mm, ce qui est bien supérieur à certaines valeurs de résolution relevées dans la littérature (Buscombe, 2017). Cette haute résolution permet d'identifier des structures comme les épis plongeants du système Girardon et la présence de blocs, mais elle est insuffisante pour déterminer la granulométrie des fonds. En effet, les D50 (28 et 31 mm) et D90 (118 et 111 mm) obtenus à partir des échantillons massiques réalisés dans la partie terminale du Doux sur les matériaux curés, sont du même ordre de grandeur que la taille du pixel du sonagramme. Les D50 et D90 représentent environ ½ et 2 pixels respectivement, une telle résolution ne permettant pas l'identification individuelle des particules. Par ailleurs, cette résolution (en mm/pixel) ne permet pas de distinguer des classes granulométriques puisqu'elle est nettement supérieure aux dimensions de la plupart des particules en place.

Toutefois, cette technique d'acquisition, dont les premiers résultats obtenus ces dernières années dans les environnements fluviaux sont très encourageants, constitue une source d'innovations (capteurs + traitements des sonagrammes) sur laquelle il serait judicieux de prévoir des développements.

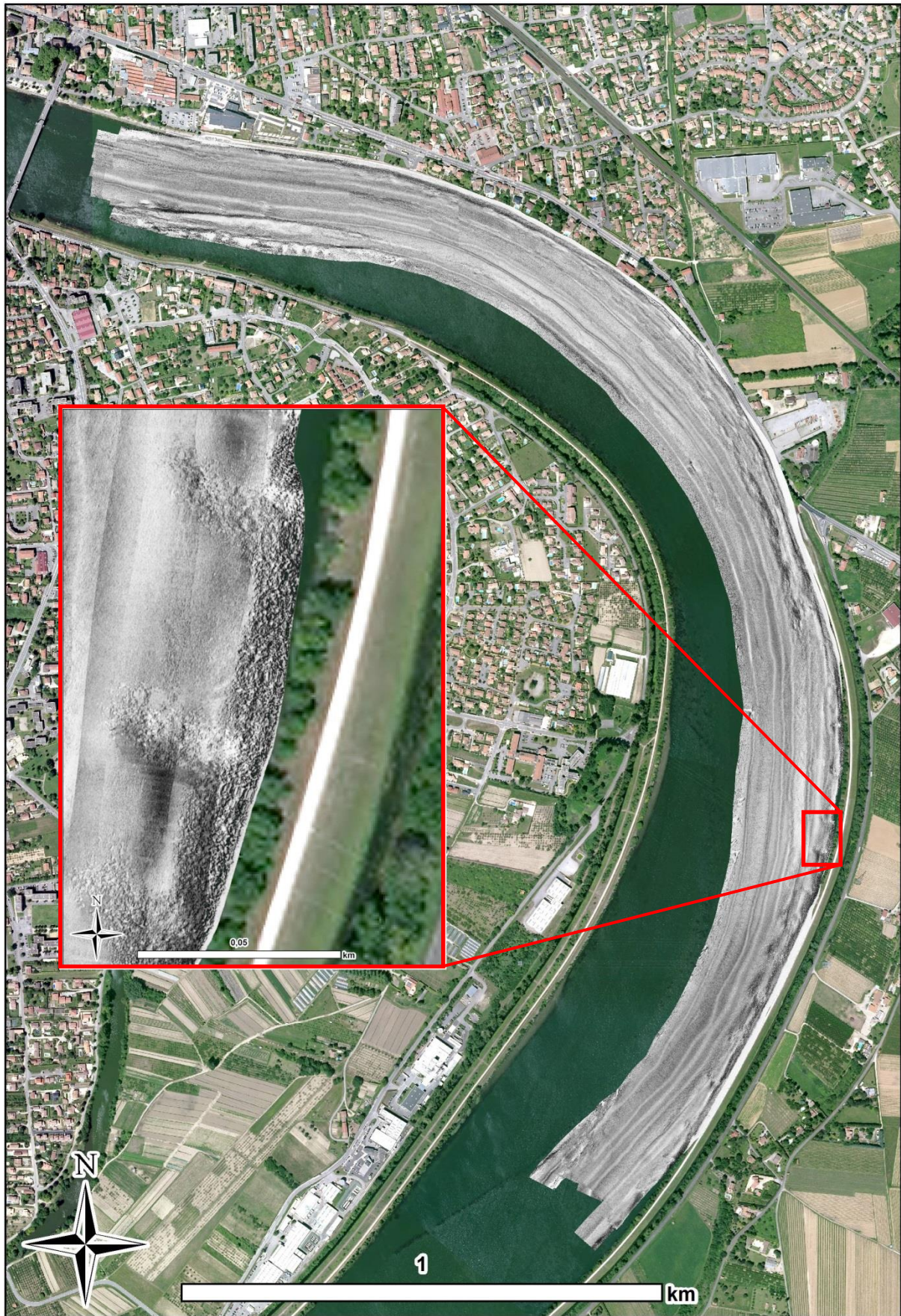


Figure 16. Sonagramme échantillonné entre la confluence du Doubs et la retenue de la Roche-de-Glun. (Données CNR).

3.2. Mesure et traitement des images

La mesure constitue le second aspect de la caractérisation granulométrique. Elle consiste en une quantification en millimètres des axes, ou une qualification en classe(s) granulométrique(s) des particules qui constituent l'échantillon. Les récents développements, décrits dans la littérature ou réalisés dans l'OSR, concernent les traitements des sonagrammes et des photographies numériques. Nous nous concentrerons sur ces dernières car parmi les échantillons réalisés dans l'OSR, les photographies numériques ont nourri de nombreuses réflexions tandis que les sonagrammes, comme présentés dans la section 3.1.3., ne présentent pas encore une résolution suffisante. Les traitements peuvent être réalisés de façon automatisée, semi-automatisée ou manuelle.

La mesure des dimensions des particules sur des photographies numériques est au cœur de nombreux développements depuis une quinzaine d'années. Lorsqu'elle est réalisée à partir de photographies en deux dimensions, elle repose sur une analyse des contrastes générés par les ombres au niveau des discontinuités entre particules. Elle présente donc une limite identifiée par Graham et al. (2010), liée à l'agencement des particules qui détermine la partie de chaque particule visible par le capteur (Figure 17).

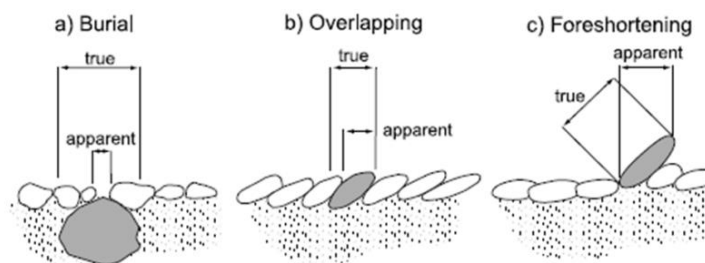


Figure 17. Effets de l'agencement des particules sur la mésestimation de la granulométrie de surface par photographie (Graham et al. 2010).

3.2.1. Procédure automatisée

Les traitements automatisés sont classés par Buscombe et al. (2010) selon deux approches :

- celles dites géométriques, qui s'appuient sur une série de traitements de l'image (seuillage, filtrage et segmentation, principalement) permettant d'individualiser les particules et de mesurer ensuite leurs axes (Graham et al., 2005a; Chang and Chung, 2012; Detert and Weitbrecht, 2012). Toutefois, la plupart des programmes adoptant des approches géométriques sont semi-automatiques, puisqu'un travail de l'opérateur est souvent nécessaire pour assurer un filtrage correct des images et/ou corriger des erreurs de segmentation (action d'individualiser l'aire des particules) ;
- celles dites statistiques, qui ne mesurent pas les grains de manière individuelle, mais procèdent à une mesure de la texture de l'image par auto-corrélogramme (Rubin, 2004; Warrick et al., 2009), semi-variogramme (Carbonneau et al., 2004a, 2005) ou par une combinaison de méthodes impliquant une approche fractale (Buscombe and Masselink, 2009) et des matrices de co-occurrence des niveaux de gris des pixels (Dugdale et al., 2010).

Nous allons ici aborder certains aspects du fonctionnement des programmes Opensource disponibles dans la littérature, ainsi que les résultats de tests réalisés via ces programmes avec diverses méthodes de mesure. Nous verrons notamment comment le recours à une méthode plutôt que l'autre est fonction de la qualité des photographies.

Les traitements automatisés requièrent un minimum d'intervention humaine, ce qui leur confère l'avantage de ne pas présenter de biais opérateur. Leur utilisation, relativement simple, ne nécessite pas un degré d'expertise élevé. L'inconvénient est qu'ils peuvent présenter un aspect « boîte noire », car les étapes des calculs et opérations sur lesquels ils reposent ne sont pas accessibles et/ou compréhensibles par l'utilisateur non-expert. On peut prendre pour exemple le programme « Digital Grain Size Project » de

Buscombe (2013) qui est (ou était car le lien de téléchargement *github* mène aujourd'hui sur un page d'erreur 404) facilement et gratuitement disponible sur internet. Sa calibration s'effectue en renseignant la dimension d'un pixel en millimètre, puis seulement deux paramètres (d'aplatissement et de filtrage), seuls leviers d'intervention de l'utilisateur. Ceux-ci permettent d'effectuer un filtrage des couleurs pour optimiser les contrastes des images. Un traitement statistique par ondelette permet ensuite de calculer instantanément les 5^{ème}, 10^{ème}, 16^{ème}, 25^{ème}, 50^{ème}, 75^{ème}, 84^{ème}, 90^{ème} et 95^{ème} percentiles, les parts de fines, sables, graviers et blocs, la moyenne et les indices de tri et d'asymétrie de la distribution granulométrique (Figure 18). Cela équivaut à des données obtenues par la mesure manuelle de l'axe-b de 100 particules échantillonnées selon une grille régulière couvrant l'ensemble de la scène imagée.

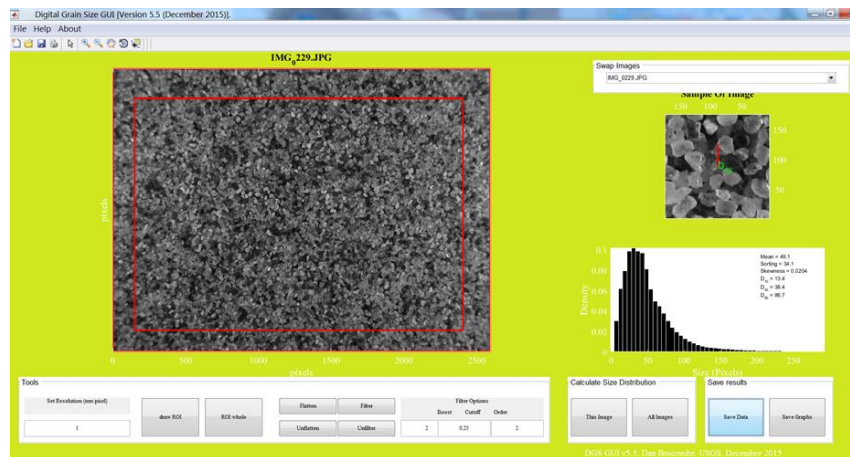


Figure 18. Capture d'écran du programme Digital Grain Size Project de Buscombe (2013).

L'outil fournit donc de nombreux descripteurs granulométriques pertinents, mais le fonctionnement par ondelette n'est pas facile à appréhender et le petit encart de visualisation du D50 (Figure 18 : en haut à droite) ne permet pas une bonne ou rassurante appréhension des résultats obtenus. D'après les tests que nous avons menés sur des échantillons de graviers et de galets, les résultats de cet outil sont très performants dans l'analyse d'échantillons de matériaux très propres (par exemple, fraîchement déposés) et avec une lithologie non grenue (sans filon ou contraste intra-particule majeur, comme ce peut être le cas des roches métamorphiques ou granitiques). L'outil fournit des résultats plus hasardeux dans les cas contraires (Figure 19). À gauche, l'analyse par le logiciel de particules plus grossières avec des filons et des contrastes intra-particules marqués produit un D50 inférieur à celui obtenu à partir de particules plus petites avec des contrastes plus faibles.



Figure 19. Exemple de deux images aux particules grossières et à la lithologie hétérogène et grenue. Les D50 ont été obtenus par mesures automatiques par ondelette.

On peut raisonnablement supposer que cette limite est liée au contexte et aux objectifs de développement du programme de Buscombe (2013), puisque celui-ci a été conçu pour la mesure des sables (grains homogènes, souvent remobilisés et très nombreux sur une scène, même de petite taille ; Cf. Figure 20).

Figure 20. Exemple d'une image test fournie avec le logiciel Digital Grain Size Project de Buscombe (2013).
(Crédit photo : David Rubin).



Sur des échantillons de galets fraîchement remobilisés et d'une lithologie non grenue, comme les calcaires de l'Ain, les tests se sont montrés concluants et ont démontré la pertinence d'utiliser de ce programme dans ce contexte (Figure 21).

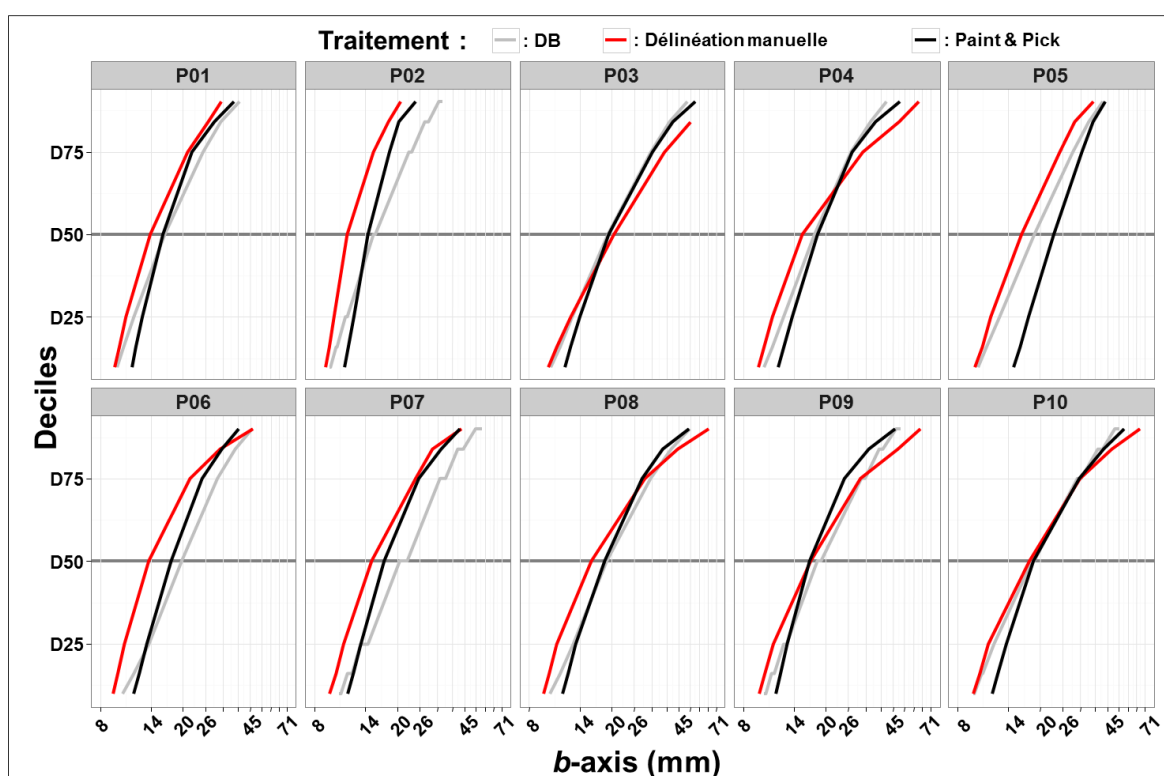


Figure 21. Comparaison des déciles caractéristiques des courbes granulométriques obtenues par traitement par ondelette (BD), par grille ou aréolaire (P&P) de dix images émergées de particules calcaires de l'Ain.

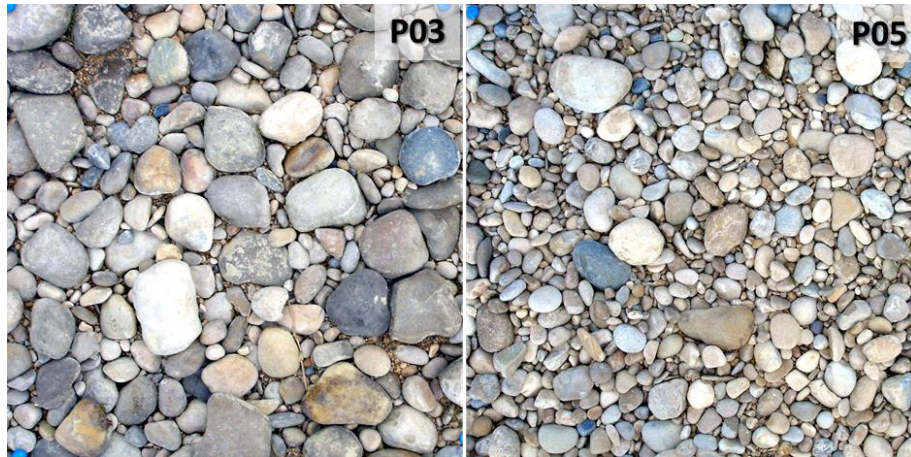


Figure 22. Exemples d'images émergées des calcaires de l'Ain utilisées pour la comparaison des résultats des traitements d'image Figure 21.

3.2.2. Procédure semi-automatisée

Les traitements semi-automatisés nécessitent une intervention de l'utilisateur à diverses étapes de la procédure. La plupart des outils reposent ici sur une approche géométrique, qu'on peut aussi appeler orientée-objet, puisque chaque particule présente sur la photographie définit un objet unique dont on mesure les dimensions. Dès lors, la partie automatisée de la procédure consiste en une délinéation des contours des particules individualisées en bouclant des segments de lignes de pixels aux contrastes similaires par rapport aux pixels adjacents. Elle comprend plusieurs étapes : le filtrage du bruit, le seuillage des valeurs des pixels (niveaux de gris, etc.) et leur ségrégation (en particules ou en interstices), la délimitation et l'individualisation des particules et enfin la mesure des dimensions.

Les filtrages/seuillages et la ségrégation sont réglés par plusieurs paramètres renseignés par l'utilisateur. Ils sont nécessaires pour maximiser la détection des interstices inter-particules constituant les segments de lignes à boucler. Une expertise de l'utilisateur, qui se développe à l'usage, est ici nécessaire. Elle permet de développer des chaînes de filtrage des images et une calibration des paramètres en fonction des caractéristiques des échantillons (lithologie, luminosité, présence d'éléments masquants).

La dernière étape fait intervenir l'opérateur afin de corriger les erreurs de segmentation des particules. Celles-ci sont inévitables et inhérentes aux outils adoptant l'approche orientée-objet que nous avons testé : *BaseGrain* (développé par le Swiss Federal Institute of Technology (ETH) de Zurich) et *GranuloAnalyzer* (développé par le laboratoire EVS - ENS de Lyon). Il peut s'agir de sur-segmentation : la division d'une particule en au moins deux particules de plus petite(s) taille(s) ; ou de sous-segmentation : la fusion de plusieurs particules en une particule plus grossière (Figure 23).

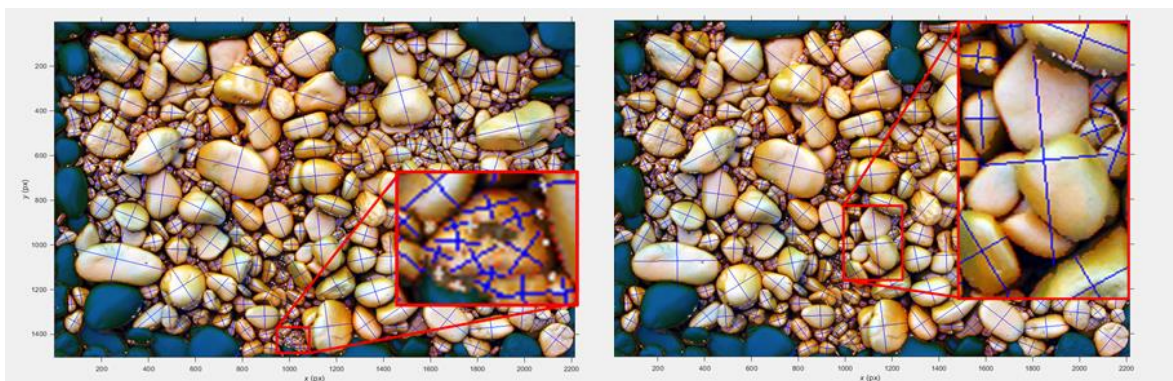


Figure 23. Exemple de sur- (à gauche) et sous-segmentation (à droite) de particules avec *BaseGrain*.

L'opérateur procède à la fusion des éléments sur-segmentés ou au découpage des éléments agglomérés. Suivant la qualité des échantillons, les traitements semi-automatiques peuvent s'avérer très chronophages (plusieurs dizaines de minutes par image), que ce soit lors de l'étape de filtrage/seuillage, du fait des nombreuses combinaisons de paramètres possibles, ou de l'étape de correction de la segmentation. C'est pourquoi, comme nous allons le voir ci-après, un traitement manuel est parfois plus judicieux et le laboratoire EVS a fait le choix d'incrémenter cette méthode dans son logiciel *GranuloAnalyzer*, de sorte que l'outil offre les deux possibilités de traitement afin de pouvoir traiter des données homogènes en terme de campagne d'acquisition mais généralement hétérogènes en terme d'état de surface, certaines pouvant être facilement traitées automatiquement alors que d'autres nécessiteront l'intervention d'un opérateur.

3.2.3. Procédure manuelle

Le traitement manuel des images est très chronophage mais il permet l'exploitation de photographies pour lesquelles le traitement automatique échoue, et les traitements semi-automatiques sont si chronophages qu'ils perdent leur avantage. La mesure manuelle consiste à tracer les seuls axes b ou à digitaliser les contours des particules échantillonnées. De nombreux programmes peuvent être utilisés (ArcGIS, Scion, etc.). Du fait du temps nécessaire à la mesure manuelle lorsque les photographies sont composées d'un grand nombre de particules, plusieurs tests ont été menés pour optimiser le temps de traitement, notamment en diminuant le nombre de particules à mesurer. Pour ce faire, deux procédures ont été mises en place et testées :

- une sélection des particules aux intersections d'un quadrillage surimposé à la photographie à l'aide du programme ***Granulo Analyzer*** développé par EVS, qui distribue sur un nombre prédéfini de croix indiquant les particules à mesurer manuellement (Figure 24) ;
- une sélection aléatoire par ***Granulo Analyzer*** d'un quadrillage surimposé à l'image distribue sur un nombre prédéfini de croix indiquant les particules à mesurer manuellement (Figure 25) est également possible quoique questionnable ;



Figure 24. Capture d'écran du logiciel *Granulo Analyzer* avec les croix d'identification des nœuds du quadrillage pour la sélection des particules à échantillonner et l'encart de zoom.

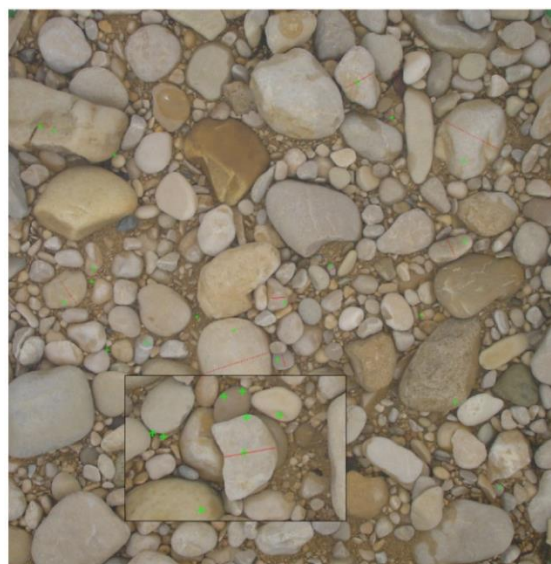


Figure 25. Capture d'écran du logiciel *Granulo Analyzer* avec les croix d'identification des particules à échantillonner et l'encart de zoom.

- une sélection par l'opérateur des dix particules estimées les plus grossières de l'échantillon. Cette méthode proposée par Houbrechts et al. (2011) repose sur le fait que la taille moyenne des 10 plus grosses particules est un bon indicateur de la taille maximale de l'échantillon, proche du D95 que les auteurs considèrent comme le meilleur descripteur de la compétence d'un cours d'eau. Les tests réalisés à partir de 92 échantillons de photographies immergées de l'Ain, montrent une bonne relation entre les D50 des échantillons complets et des échantillons composés des dix particules les plus grossières (Figure 26). Qui plus est, lorsque deux opérateurs (l'un expert, l'autre non) sélectionnent sans se concerter les dix particules qu'ils estiment être les dix plus grossières, les valeurs de « D50 10+ » qu'ils obtiennent ne présentent pas de différences significatives (Figure 27). Ces tests indiquent que cette méthode peut constituer une solution de mesure rapide, sans biais opérateur pour estimer manuellement la granulométrie d'échantillons constitués d'image de mauvaise à très mauvaise qualité. Il importe toutefois de noter que la relation D50 / D50 10 + présentée sur la Figure 22 est représentative d'un site d'étude, et sera donc potentiellement différente en fonction du terrain et de la période d'acquisition.

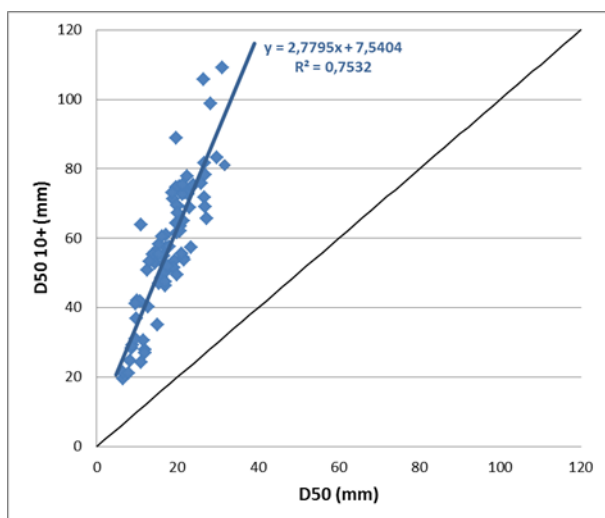


Figure 26. Relation entre les valeurs médianes de l'échantillon complet (D50) et des dix plus grosses particules (D50 10+) de 92 images de la campagne « Haute vallée de l'Ain avril 2014 »

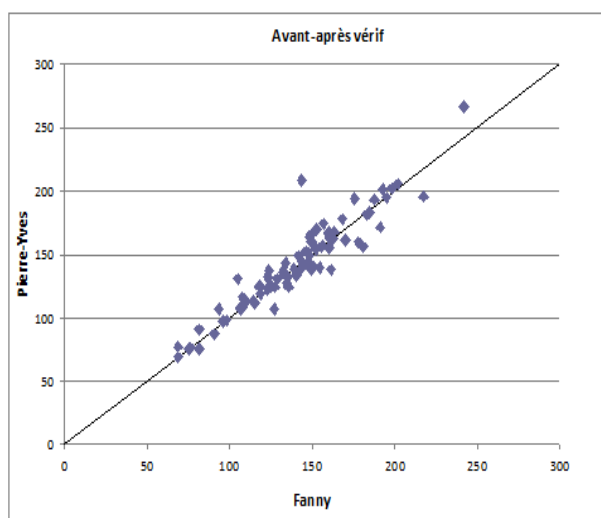


Figure 27. Comparaison des valeurs médianes de mesures manuelles des 10 particules les plus grossières réalisées par deux opérateurs différents sur 76 images de la campagne « basse vallée de l'Ain avril 2014 ».

(expert en abscisses et non-expert en ordonnées).

4. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Les acquisitions de données granulométriques et les différents dispositifs de traitement testés dans les précédents programmes OSR soulignent que les méthodes existantes sont efficaces et pertinentes, mais fortement inféodées à des thématiques d'étude (cartographie des faciès granulométriques, suivi des effets d'opérations de restauration, modélisation du transport solide, etc.) et des conditions environnementales (émergée, immergée, profonde ou non). A ce jour, il n'existe pas une méthode unique qui soit applicable aux conditions environnementales contrastées observées sur Rhône. Les zones peu profondes (inf. à 50 cm) à écoulement rapide (sup. à 2 m/s) demeurent notamment très complexes à échantillonner. Par ailleurs, la caractérisation fine de la granulométrie sur des surfaces continues n'est pas encore réalisable. Toutefois, de riches enseignements nous permettent de formaliser les éléments opérationnels suivants pour l'échantillonnage par imagerie et pour la mesure de la granulométrie à partir de ces échantillons.

4.1. Échantillonnage

Les méthodes déployées pour l'acquisition des données seront avant tout fonction (Figure 28) :

- du type d'information recherchée : cartographie des faciès granulométriques au sein des différentes formes fluviales composant le lit, identification des déciles caractéristiques de la distribution granulométrique dans les formules du transport solide, détection d'une réponse granulométrique à une action de restauration ;
- des conditions de déploiement du matériel, notamment la profondeur d'eau et les vitesses d'écoulement.

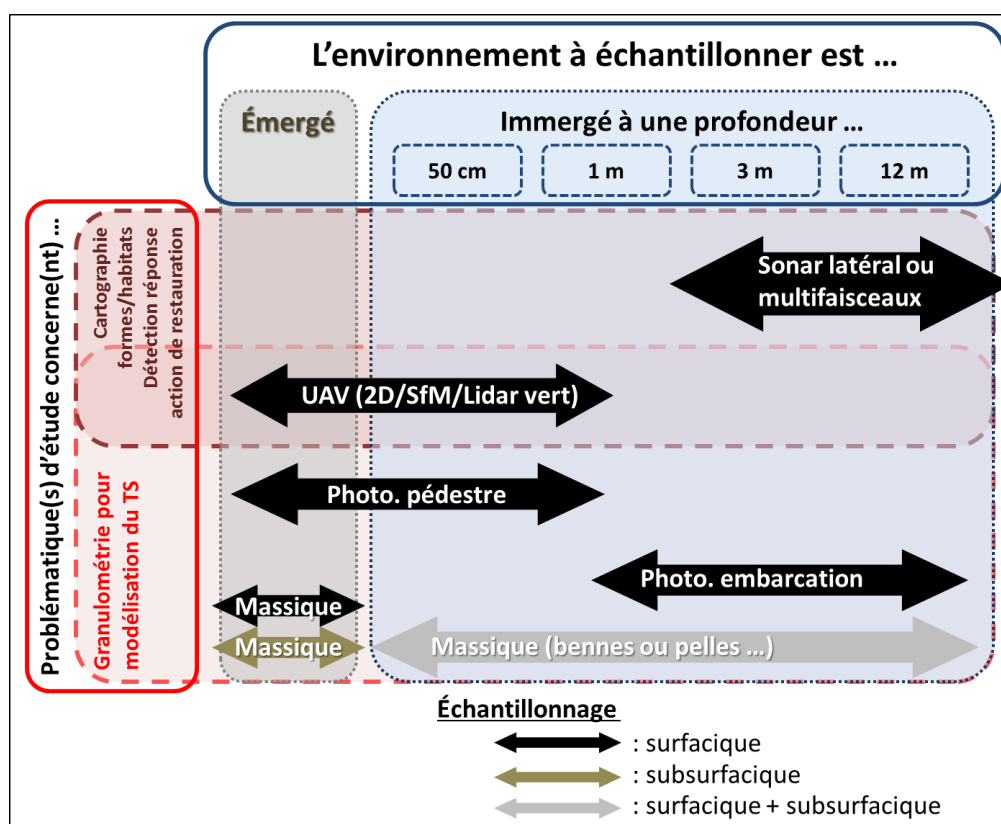


Figure 28. Méthodes d'échantillonnage possibles en fonction des conditions hydrauliques et des problématiques d'étude.

Les campagnes d'acquisition doivent ainsi être réalisées :

- avant la période de développement du biofilm qui masque les contours des particules ;
- ou après les crues les plus mobilisatrices de charge de fond, de sorte que les particules mobilisées aient été nettoyées ;
- ou avant des crues de plus faible ampleur qui pourraient déposer une couche de sédiments fins, et diminuer ainsi les contrastes aux bordures des particules (Figure 12) ;
- en évitant les journées ensoleillées car la diffusion du rayonnement solaire par les particules en suspension dans l'eau (turbidité) provoque une forte luminosité, diminuant également les contrastes aux bordures des particules (Figure 12) ;

Parmi les méthodes de cartographie de la granulométrie de surface en conditions immergées, les sonars latéraux ou multifaisceaux et les capteurs embarqués sont au cœur des développements actuels, que ce soit au niveau des capteurs eux-mêmes (lidar bathymétrique et sonar par ex.) ou des vecteurs (drones aériens ou aquatiques). Ces développements offrent de nombreuses perspectives, notamment pour l'amélioration de la résolution au sol des pixels, car les méthodes existantes ne fournissent que des cartographies qualitatives validées ou calibrées par des échantillonnages photographiques complémentaires. Ces méthodes pourraient à terme répondre aux attentes des opérateurs en conditions immergées pour la cartographie des habitats et le suivi des actions de restauration dans le cadre de l'OSR ainsi que pour la modélisation du transport solide, à condition d'atteindre des résolutions au sol inférieures à 20 mm par pixel.

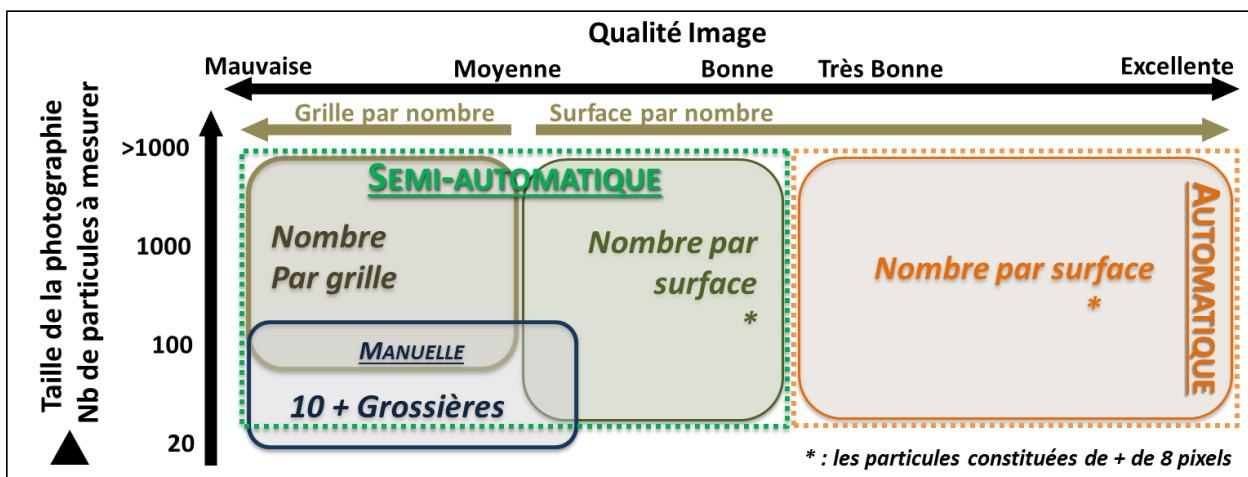
Néanmoins, en l'état actuel des développements, le protocole d'acquisition par photographies demeure le plus efficace car il permet d'être déployé lors de campagnes à la fois émergées et immergées, et pour des conditions immergées elles-mêmes contrastées, ce qui assure l'acquisition d'un jeu de données unique et représentatif des différentes conditions de milieu. Ce protocole peut s'appuyer sur :

- le dispositif CNR, rôdé et opérationnel, qui permet la récolte de données depuis une embarcation lourde à des profondeurs d'eau comprise entre 1 et 15 m (Figure 9) ;
- un nouveau dispositif *EVS 2* conçu pour être déployé à pied ou en embarcation légère, à des profondeurs comprises en 0.5 et 3 m dans des écoulements relativement rapides (sup. à 1 m/s), mais encore non testé (
- Figure 10 et Tableau Annexe). Ce dispositif sera composé d'une petite caméra GoPro enchâssée dans un caisson étanche dont la hauteur par rapport au fond sera réglable, le tout étant connecté à une tablette numérique avec un retour vidéo direct. L'hydrodynamisme de ce dispositif a été amélioré par rapport au dispositif *EVS 1* afin d'en faciliter la mise en œuvre et d'élargir l'éventail des conditions de déploiement, notamment en écoulements rapides. Ces deux dispositifs permettent/tront d'échantillonner rapidement et aisément un large éventail de conditions d'écoulement et de profondeurs observées sur le Rhône. En l'état, la multiplication des échantillons photographiques est l'unique méthode pour obtenir une information robuste sur la granulométrie de surface, en attendant une solution pour une cartographie complète de la granulométrie des formes fluviales. La multiplication des échantillons peut s'appuyer sur les méthodes de traitement et de mesure des images proposées ci-dessous. Par ailleurs, les campagnes d'échantillonnage doivent être planifiées en tenant compte des recommandations faites pour assurer de bonnes conditions environnementales (cf. section ...), et permettre ainsi l'acquisition d'images de la meilleure qualité possible, ce qui facilitera leur traitement.

4.2. Mesure

Le traitement des données acquises par imagerie subaquatique peut s'appuyer sur plusieurs méthodes complémentaires. Le choix du programme de mesure à utiliser est fonction des caractéristiques des images (Figure 29) :

- Les images présentant une qualité allant de très bonne à excellente et sur lesquelles l'hétérogénéité colorimétrique intra-particulaire est très faible (cf. Tableau 3) peuvent être traitées automatiquement à l'aide du programme *Digital Grain Size Project* de Buscombe (2013). Ce traitement doit systématiquement s'accompagner d'une comparaison sur un échantillon de photos du percentile ainsi mesuré avec un percentile mesuré par un traitement manuel afin de s'assurer que le traitement automatique est performant. L'ensoleillement a un effet sur l'estimation des percentiles à partir de DGS et les acquisitions doivent donc se faire dans les mêmes conditions ou celles-ci doivent également être bien prises en compte (sous-prédiction des percentiles qui peut aller jusqu'à 20%, cas de sur-prédiction également) (Chardon, thèse in prep.).
- Les images de moins bonne qualité peuvent être traitées avec les programmes *BaseGrain* ou *GranuloAnalyzer* :
 - o soit en adoptant une approche par segmentation semi-automatique (pour les images de qualité moyenne avec un grand nombre de particules) ;
 - o soit par la mesure manuelle (possible avec *GranuloAnalyzer*):
 - d'un certain nombre de particules désignées par le programme aléatoirement ou sur une grille ;
 - des dix plus grosses particules lorsqu'elles sont facilement identifiables et que le traitement ci-avant est trop long à mettre en œuvre et/ou que l'opérateur n'a besoin que d'un percentile grossier (D84 ou D90) ;
 - de toutes les particules si leur nombre est limité (inf. à 50).



Les échantillonnages surfaciques aréolaires (type photographie), la représentativité des D50 soulève la question de la surface minimale à échantillonner. Petrie and Diplas (2000) recommandent une surface d'échantillonnage équivalente à 100 fois celle de la particule la plus grossière même s'il semble acceptable de pouvoir descendre jusqu'à 40 fois la surface de la particule la plus grossière selon les conditions de tri des particules constituant la surface.

Des distributions granulométriques déterminées de manières différentes ne sont pas directement comparables. Si on veut comparer des granulométries échantillonnées par échantillonnage aréolaire ou par grille, il faut convertir les valeurs des déciles ou des centres géométriques des fractions granulométriques considérées.

La formule général de conversion est proposée par Graham et al. (2012) :

$$p(proc_1)_i = K p(proc_2)_i D_{ic}^x$$

Avec :

- $p(proc_1)_i$: le pourcentage de la fraction de taille i obtenue avec la méthode d'échantillonnage n
- D_{ic}^x : le centre géométrique de la même fraction de taille
- K : une constante
- x : le facteur de conversion

Les facteurs de conversion adaptés sont donnés dans le Tableau 4.

Conversion à

Conversion de	Volume exprimé en masse (Volume-by-weight)	Grille exprimé en nombre (Grid-by-number)	Grille exprimée en masse (Grid-by-weight)	Surface exprimée en nombre (Area-by-number)	Surface exprimée en masse (Area-by-weight)
Volume par masse	1 0	1 0	D^3 3	$1/D^2$ -2	D 1
Grille par nombre	1 0	1 0	D^3 3	$1/D^2$ -2	D 1
Grille par masse	$1/D^3$ -3	$1/D^3$ -3	1 0	$1/D^5$ -5	$1/D^2$ -2
Surface par nombre	D^2 2	D^2 2	D^5 5	1 0	D^3 3
Surface par masse	$1/D$ -1	$1/D$ -1	D^2 2	$1/D^3$ -3	1 0

Tableau 4. Facteur théorique de conversion entre les différentes méthodes d'échantillonnage d'après Kellerhals and Bray (1971) et modifié par Bunte and Abt (2001) dans Graham et al. (2012).

Toutefois, cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter une perte d'information lorsque les valeurs individuelles d'axe-b doivent être transformées en fraction granulométrique. C'est pourquoi, il reste délicat de disposer d'un jeu de données cohérent et comparer les données entre les campagnes.

Bibliographie

- Adams J. 1979. Gravel Size Analysis from Photographs. *Journal of the Hydraulics Division* **105** : 1247–1255.
- Alexandrou D, Pantzartzis D. 1993. A methodology for acoustic seafloor classification. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **18** : 81–86. DOI: 10.1109/48.219527
- Amiri-Simkooei A, Snellen M, Simons DG. 2009. Riverbed sediment classification using multi-beam echo-sounder backscatter data. *The Journal of the Acoustical Society of America* **126** : 1724. DOI: 10.1121/1.3205397
- Black M. 2013. An investigation into reach scale estimates of sub-pixel fluvial grain size from hyperspatial imagery., Durham University [online] Available from: <http://etheses.dur.ac.uk/6924/> (Accessed 11 December 2014)
- Black M, Carbonneau P, Church M, Warburton J. 2014. Mapping sub-pixel fluvial grain sizes with hyperspatial imagery. *Sedimentology* **61** : 691–711. DOI: 10.1111/sed.12072
- Borgeld JC, Hughes Clarke JE, Goff JA, Mayer LA, Curtis JA. 1999. Acoustic backscatter of the 1995 flood deposit on the Eel shelf. *Marine Geology* **154** : 197–210. DOI: 10.1016/S0025-3227(98)00113-3
- Bunte K, Abt SR. 2001. Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel-and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring . U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Ft. Collins, CO [online] Available from: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/4580> (Accessed 8 October 2018)
- 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** : 1709–1732. DOI: 10.1111/sed.12049
- Buscombe D. 2017. Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar. *Environmental Modelling & Software* **89** : 1–18. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.12.003
- Buscombe D, Grams PE, Kaplinski MA. 2014. Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 1. Spectral properties of scattering. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **119** : 2674–2691. DOI: 10.1002/2014JF003189
- Buscombe D, Grams PE, Kaplinski MA. 2017. Compositional Signatures in Acoustic Backscatter Over Vegetated and Unvegetated Mixed Sand-Gravel Riverbeds: ACOUSTIC RIVER SUBSTRATE CLASSIFICATION. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **122** : 1771–1793. DOI: 10.1002/2017JF004302
- Buscombe D, Masselink G. 2009. Grain-size information from the statistical properties of digital images of sediment. *Sedimentology* **56** : 421–438. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2008.00977.x
- Buscombe D, Rubin DM, Warrick JA. 2010. A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment: GRAIN SIZE FROM IMAGES OF SEDIMENT. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **115** DOI: 10.1029/2009JF001477 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2009JF001477> (Accessed 8 October 2018)
- Carbonneau PE, Bergeron N, Lane SN. 2005. Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes: SIZE MEASUREMENTS OF FLUVIAL GRAIN SIZES. *Water Resources Research* **41** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2005WR003994
- Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. 2004a. Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery. *Water Resources Research* **40** : W07202. DOI: 10.1029/2003WR002759
- Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. 2004b. Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery: MAPPING GRAIN SIZE IN GRAVEL BED RIVERS. *Water Resources Research* **40** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2003WR002759

- Chang F-J, Chung C-H. 2012. Estimation of riverbed grain-size distribution using image-processing techniques. *Journal of Hydrology* **440–441** : 102–112. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.03.032
- Church M, McClean DG, Wolcott JF. 1987. River bed gravels: sampling and analysis. In *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, Thorne CR, Bathurst JC, and Hey RD (eds). Chichester; 43–88.
- Collier JS, Brown CJ. 2005. Correlation of sidescan backscatter with grain size distribution of surficial seabed sediments. *Marine Geology* **214** : 431–449. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.11.011
- Detert M, Weitbrecht V. 2012. Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. *River Flow* **2012** : 595–600.
- Dugdale SJ, Carbonneau PE, 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. DOI: 10.1002/esp.1936
- Ferrini VL, Flood RD. 2006. The effects of fine-scale surface roughness and grain size on 300 kHz multibeam backscatter intensity in sandy marine sedimentary environments. *Marine Geology* **228** : 153–172. DOI: 10.1016/j.margeo.2005.11.010
- Goff JA, Olson HC, Duncan CS. 2000. Correlation of side-scan backscatter intensity with grain-size distribution of shelf sediments, New Jersey margin. *Geo-Marine Letters* **20** : 43–49. DOI: 10.1007/s003670000032
- Graham DJ, Reid I, Rice SP. 2005a. Automated Sizing of Coarse-Grained Sediments: Image-Processing Procedures. *Mathematical Geology* **37** : 1–28. DOI: 10.1007/s11004-005-8745-x
- Graham DJ, Rice SP, Reid I. 2005b. A transferable method for the automated grain sizing of river gravels: METHOD FOR GRAIN SIZING RIVER GRAVELS. *Water Resources Research* **41** DOI: 10.1029/2004WR003868 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004WR003868> (Accessed 11 October 2018)
- Graham DJ, Rice SP, Reid I. 2005c. Comment: Photographic Techniques for Characterizing Streambed Particle Sizes. *Transactions of the American Fisheries Society* **134** : 1599–1603. DOI: 10.1577/T04-146.1
- Graham DJ, Rollet A-J, Piégay H, Rice SP. 2010. Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques: IMAGE-BASED SURFACE SEDIMENT SAMPLING. *Water Resources Research* **46** DOI: 10.1029/2008WR006940 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008WR006940> (Accessed 11 October 2018)
- Graham DJ, Rollet A-J, Rice SP, Piégay H. 2012. Conversions of Surface Grain-Size Samples Collected and Recorded Using Different Procedures. *Journal of Hydraulic Engineering* **138** : 839–849. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000595
- Grams PE, Topping DJ, Schmidt JC, Hazel JE, Kaplinski M. 2013. Linking morphodynamic response with sediment mass balance on the Colorado River in Marble Canyon: Issues of scale, geomorphic setting, and sampling design. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **118** : 361–381. DOI: 10.1002/jgrf.20050
- Hamill D, Buscombe D, Wheaton JM. 2018. Alluvial substrate mapping by automated texture segmentation of recreational-grade side scan sonar imagery. Hewitt J (ed). *PLOS ONE* **13** : e0194373. DOI: 10.1371/journal.pone.0194373
- Hamill D, Wheaton J, Buscombe D, Grams P, Melis T. 2016. Bed texture mapping in large rivers using recreational-grade sidescan sonar. 306–311 pp. 24 June [online] Available from: <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9781315644479-51> (Accessed 17 May 2018)
- Houbrechts G, Levecq Y, Vanderheyden V, Petit F. 2011. Long-term bedload mobility in gravel-bed rivers using iron slag as a tracer. *Geomorphology* **126** : 233–244. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.11.006
- Ibbeken H, Schleyer R. 1986. Photo-sieving: A method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* **11** : 59–77. DOI: 10.1002/esp.3290110108

Kaesler AJ, Litts TL, Tracy TW. 2013. USING LOW-COST SIDE-SCAN SONAR FOR BENTHIC MAPPING THROUGHOUT THE LOWER FLINT RIVER, GEORGIA, USA: LOW-COST SONAR BENTHIC MAPPING IN RIVERS. *River Research and Applications* **29** : 634–644. DOI: 10.1002/rra.2556

Kellerhals R, Bray DI. 1971. Sampling Procedures for Coarse Fluvial Sediments. *Journal of the Hydraulics Division* **97** : 1165–1180.

Malavoi J-R, HYDRATEC. 2000. Etude géomorphologique du canal de Miribel . Rapport d'étude. VNF: Lyon

Medialdea T et al. 2008. Multibeam backscatter as a tool for sea-floor characterization and identification of oil spills in the Galicia Bank. *Marine Geology* **249** : 93–107. DOI: 10.1016/j.margeo.2007.09.007

Peteuil C, Alliau D, Wirz C, Fretaud T, Decachard M, Roux S, Reynaud S, Boisson N, Vollant A, Baux Y. 2017. Evaluating favorable conditions for sediment transport in reservoirs: Champagneux dam case study, France. th Annual Meeting : 12.

Petrie J, Diplas P. 2000. Statistical approach to sediment sampling accuracy. *Water Resources Research* **36** : 597–605. DOI: 10.1029/1999WR900321

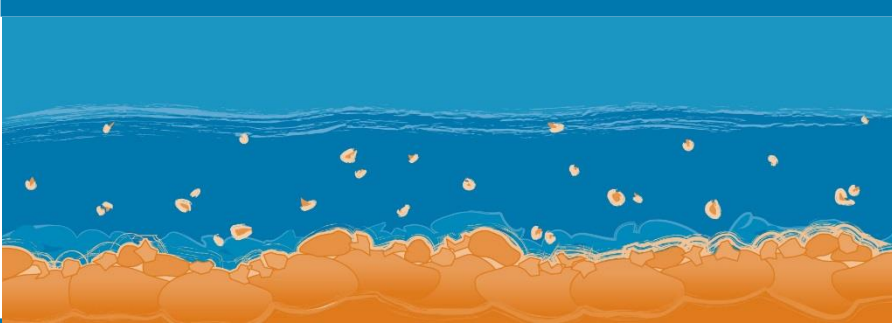
Rubin DM. 2004. A Simple Autocorrelation Algorithm for Determining Grain Size from Digital Images of Sediment. *Journal of Sedimentary Research* **74** : 160–165. DOI: 10.1306/052203740160

Warrick JA, Rubin DM, Ruggiero P, Harney JN, Draut AE, Buscombe D. 2009. Cobble cam: grain-size measurements of sand to boulder from digital photographs and autocorrelation analyses. *Earth Surface Processes and Landforms* **34** : 1811–1821. DOI: 10.1002/esp.1877

A N N E X E S

Annexe 1 — Tableau de conversion entre méthodes d'analyse et d'échantillonnage granulométrique

Conversion de → à	Factor
<u>Différences entre méthodes d'analyse :</u>	
Fréquence de masse → Fréquence de nombre	$1/D^3$
Fréquence de nombre → Fréquence de masse	D^3
<u>Différences entre méthodes d'échantillonnage :</u>	
Volume → Grille (<i>Volume → Grid</i>)	D^3
Grille → Volume (<i>Grid → Volume</i>)	$1/D^3$
Volume → Surface (<i>Volume → Area</i>)	D
Surface → Volume (<i>Area → Volume</i>)	$1/D$
Surface → Grille (<i>Area → Grid</i>)	D^2
Grille → Surface (<i>Grid → Area</i>)	$1/D^2$



Observatoire
des Sédiments
du Rhône



Plan
Rhône



La Région
Auvergne-Rhône-Alpes



RÉGION SUD
PROVENCE ALPES CÔTE D'AZUR



ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires



IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



ZABR



Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact : dad.roux@graie.org