



HAL
open science

Guide méthodologiquesynthèse du projet DEAR Mieux comprendre les processus de dépôt et d'érosion des sédiments fins sur les bancs de galets

Eric Valette, Benoît Camenen, Céline Berni, Nicolas Claude, Guillaume Dramais, Magali Jodeau, Marianne Laslier, Caroline Le Bouteiller, Jérôme Le Coz, Cédric Legoût, et al.

► To cite this version:

Eric Valette, Benoît Camenen, Céline Berni, Nicolas Claude, Guillaume Dramais, et al.. Guide méthodologiquesynthèse du projet DEAR Mieux comprendre les processus de dépôt et d'érosion des sédiments fins sur les bancs de galets. INRAE RiverLy; EDF; IGE – Institut des Géosciences de l'Environnement. 2023. hal-04167714

HAL Id: hal-04167714

<https://hal.inrae.fr/hal-04167714>

Submitted on 21 Jul 2023

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.



Guide méthodologique – synthèse du projet DEAR

Mieux comprendre les processus de dépôt et d'érosion des sédiments fins sur les bancs de galets

Eric Valette, Benoît Camenen, Céline Berni, Nicolas Claude, Guillaume Dramais, Magali Jodeau, Marianne Laslier, Caroline Le Bouteiller, Jérôme Le Coz, Cédric Legoût, Rémi Loire, Sébastien Proust, Pablo Tassi, & Sébastien Zanker

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	2
1 LE PROJET DEAR	5
1.1 LE PROJET	5
1.2 PRESENTATION DES SITES D'ETUDES	7
1.2.1 Le Galabre	7
1.2.2 L'Isère en Combe de Savoie	7
1.3 LES INTERVENANTS	8
2 SYNTHÈSE DES PROCESSUS ETUDIÉS DANS LE CADRE DU PROJET	10
2.1 MIEUX COMPRENDRE ET CARACTERISER LES SOURCES DE SEDIMENTS FINS	10
2.1.1 Impact de l'altération physique des marnes sur les exports sédimentaires.....	10
2.1.2 Erosion et transfert des sédiments dans un bassin versant de taille moyenne.....	11
2.1.3 Caractériser la part de sédiments fins dans la matrice graveleuse et évaluation des stocks de sédiments fins à l'échelle de la rivière.....	12
2.1.4 Définir les propriétés physiques des sédiments fins déposés à la surface des bancs.....	15
2.2 MESURER LES FLUX DE MES	17
2.2.1 Calibration de la relation MES Turbidité	17
2.2.2 Un bilan des flux de MES sur l'Arc et l'Isère	18
2.2.3 Incertitude sur les flux de MES.....	19
2.2.4 Mesures de la charge sableuse en suspension.....	22
2.3 L'INTERACTION FINS-GRAVIERS SUR LES BANCS.....	25
2.3.1 Echanges avec la matrice graveleuse, dynamique des bancs de galets	25
2.3.2 Transfert et dépôt des sédiments en suspension sur les plaines d'inondation.....	25
2.4 CARACTERISER ET SUIVRE L'EVOLUTION DES BANCS	27
2.4.1 Caractériser la morphodynamique à l'échelle du tronçon	27
2.4.2 Mesurer les surfaces de dépôt par analyse photo	31
2.4.3 Caractérisation de la mobilité des graviers sur le banc par placettes peintes et chaînes d'érosion.....	34
2.4.4 Caractérisation de l'évolution des bancs par analyse d'orthophotos.....	35

2.4.5	Caractériser la dynamique des bancs à l'aide de mesures par carroyage.....	37
2.4.6	Caractériser la submersion des bancs	38
2.5	MODELISER LES FLUX.....	41
2.5.1	Les données à acquérir.....	41
2.5.2	La modélisation 2D à l'échelle d'un secteur de quelques kilomètres	41
2.5.3	La modélisation large échelle	45
3	MESURES DE RESTAURATION SUR LES BANCs DE GRAVIERS DANS UNE RIVIERE ALPINE AMENAGEE.....	47
3.1	ELEMENTS DE GESTION	47
3.1.1	Evénements hydro-sédimentaires	47
3.1.2	Gestion mécanique des bancs	48
3.1.3	Essartement.....	49
3.2	OBJECTIFS DE LA RESTAURATION, UNE DEMARCHE ITERATIVE : EXEMPLE DE LA COMBE DE SAVOIE	51
3.2.1	Introduction sur la restauration de bancs de graviers	51
3.2.2	Première analyse et évolution du suivi	52
4	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	55
4.1	EN CE QUI CONCERNE LES SOURCES DE SEDIMENTS FINS	55
4.1.1	Au niveau des bassins versants	55
4.1.2	Au niveau des bancs eux-mêmes	55
4.2	LA MESURE DES FLUX	55
4.3	L'INTERACTIONS FINS GRAVIERS.....	56
4.4	METHODES POUR CARACTERISER ET SUIVRE L'EVOLUTION DES BANCs.....	57
4.5	LA MODELISATION DES FLUX.....	57
4.6	LES MESURES DE RESTAURATION	57
4.7	EN CONCLUSION.....	58
5	REFERENCES.....	59
6	ANNEXES.....	65
	ANNEXE I : MESURES DE L'ALTERATION DES MARNES	66
	ANNEXE II : MESURES DE LA PROPORTION DE SEDIMENTS FINS DANS LA MATRICE GRAVELEUSE.....	68
	ANNEXE III : PLACETTE PEINTE.....	70

ANNEXE IV : CHAINE D'EROSION	72
ANNEXE V : PROTOCOLE DE MESURE DE L'EPaisseur DE FINE, DE L'EVOLUTION ALTIMETRIQUE ET DE LA COUVERTURE VEGETALE DES BANCS PAR CARROYAGE	74
ANNEXE VI : MESURES IN SITU DU TAUX D'EROSION	77
ANNEXE VII : MESURE DE LA CHARGE SABLEUSE.....	82
ANNEXE VIII : ANALYSE DES DEPOTS DE SURFACE PAR PHOTOS	84
ANNEXE IX : SUIVI AUTOMATISE DE LA CARACTERISATION DES BANCS A PARTIR DE LEVES LIDAR ET PHOTOS AERIENNES.....	86

1 LE PROJET DEAR

1.1 LE PROJET

Dans les hydrosystèmes de montagne et de piémont, les rivières à graviers sont caractérisées par des systèmes de bancs alternés principalement dus à la présence de contraintes latérales telles que les digues. Ces rivières alpines transportent souvent de grandes quantités de sédiments fins, généralement produits par des sous-bassins érosifs. Le matériau des sédiments fluviaux est généralement un mélange de particules grossières et fines qui peuvent interagir ensemble. Les modifications anthropiques telles que les travaux de restauration des terrains de montagne, la régression des activités de pastoralisme, les constructions d'infrastructures (digues, épis, ponts, etc.), les activités de gestion des barrages ou l'exploitation des graviers dans le lit des rivières ont modifié de manière significative la quantité relative des différents types de sédiments transportés.

De nos jours, il y a un manque général d'apport de particules grossières, et donc un excès relatif de particules fines. Le système déséquilibré qui en a résulté a entraîné l'érosion du chenal principal, la surélévation et la fixation des bancs de gravier en raison des dépôts massifs de sédiments fins et de la croissance de la végétation riveraine (Jourdain et al., 2017). Les mécanismes de stabilisation et de colonisation des bancs par les plantes riveraines doivent donc être étudiés si l'on souhaite réduire la dégradation de la qualité écologique de la rivière (Girel et al., 2003), diminuer le risque d'inondation dû à la capacité d'écoulement totale réduite, et prévenir le risque d'érosion dans le chenal principal, et d'optimiser les stratégies de gestion du fleuve (Lauters et al., 2012).

Des travaux coûteux sont réalisés pour réduire ces impacts. Ces travaux consistent principalement à enlever mécaniquement la végétation existante et les dépôts fins et à remodeler les bancs de gravier afin d'améliorer la dynamique sédimentaire. Un exemple typique est le projet de restauration de la rivière Isère en Combe de Savoie géré par SISARC. Environ 200 000 m³ de sédiments fins ont été extraits de la rivière en 2017 et 2018 après avoir supprimé la végétation sur deux biefs de 2,5 km de long, pour un coût total de près de 8M€ (Figure 1).

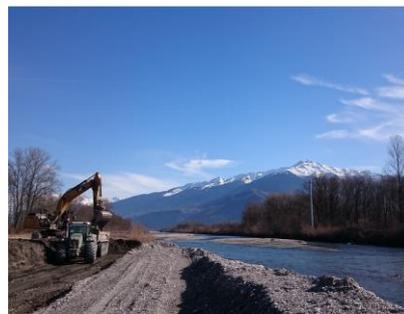


Figure 1: Végétalisation de banc et dépôt massifs de sédiments fins sur les bancs de l'Isère (gauche) et travaux de restauration (droite)

L'une des principales préoccupations de ces opérations coûteuses étant liée à la durabilité à long terme, les questions opérationnelles suivantes se posent :

- Quels sont les processus de transport de sédiments dans les rivières alpines, quels phénomènes régissent les dépôts et remises en suspension sur les bancs de gravier ? Y a-t-il un tri granulométrique ?
- Comment la végétation riveraine affecte-t-elle la dynamique des sédiments fins ? Comment limiter la végétalisation sur les bancs de gravier des rivières alpines ?

Les scientifiques ne sont pas encore en mesure d'apporter des réponses satisfaisantes à toutes ces questions. La sédimentation et la bio-géomorphologie sont des paramètres clés. Le projet DEAR s'est concentré sur le réseau fluvial, non sur la compréhension ou la modélisation de l'apport sédimentaire à l'échelle du bassin versant.

Les principaux objectifs scientifiques du projet ont été de :

- O1 : Caractériser le dépôt et l'érosion des sédiments fins à la surface du lit des rivières alpines
- O2 : Évaluer les échanges de sédiments fins entre écoulement et lit (infiltration, exfiltration)
- O3 : Comprendre les variations spatiales et temporelles du transport des sédiments fins (flux)
- O4 : Quantifier les effets de forçage de la morphologie des bancs, de l'hydrologie, de l'apport sédimentaire, de la végétation riveraine sur la dynamique des sédiments fins.

Au-delà de ces quatre objectifs scientifiques, il a été proposé une intégration de ces objectifs O1, O2, O3 & O4 au sein d'un guide (synthèse technique) pour fournir des outils qui contribueront à la mise en place de mesures de suivi de la restauration des rivières (O5). L'objectif final du projet DEAR est d'aider les gestionnaires de rivières à augmenter la durabilité des travaux de restauration.

La présente note s'inscrit dans cette optique :

Le chapitre 2 est une synthèse des différentes études scientifiques menées dans le cadre du projet.

Le chapitre 3 donne quelques pistes de gestions opérationnelles pouvant être mise en place et les questions qui peuvent se poser au travers d'un exemple.

Enfin, lorsque des techniques de mesures nous semblaient être suffisamment abouties pour permettre une application en routine sur le terrain, elles ont fait l'objet d'une annexe.

Le projet a été divisé en quatre lots de travail (Work packages WP). Les trois premiers WP correspondent aux trois principales échelles spatiales et temporelles suivantes : (WP1) l'échelle locale (~mètres) et instantanée (~secondes), (WP2) l'échelle des bancs (~ kilomètres) sur des périodes d'échelle d'événements (~ jours à mois), (WP3) l'échelle du tronçon de rivière (~ 100 km) sur le long terme (décennies). Les processus associés aux sédiments fins ont été étudiés à travers la combinaison d'expériences en laboratoire, de mesures sur le terrain et de modélisations numériques et à trois échelles spatiales et temporelles complémentaires.

Le WP4 correspond à la coordination scientifique et à la diffusion.

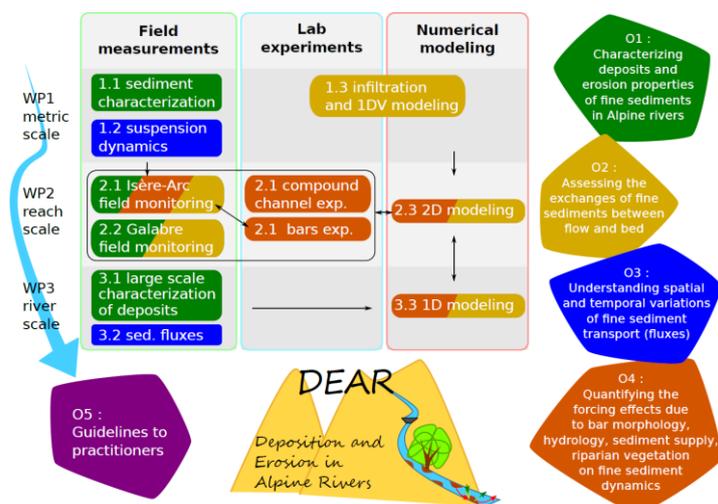


Figure 2 : Schéma expliquant l'organisation des tâches à travers les trois échelles, les trois approches (terrain, expérimentation en laboratoire et modélisation numérique) et les cinq objectifs. Chaque tâche est colorée en fonction des objectifs correspondants. Les flèches noires rendent explicite le lien entre les processus impliqués dans la dynamique des sédiments fins.

Deux sites ont été choisis pour des expérimentations de terrain (Figure 3) car ils représentent des configurations fluviales alpines typiques, soit avec un niveau élevé d'anthropisation (système fluvial Arc-Isère) soit au contraire assez naturel (l'observatoire Draix-Bléone).



Figure 3: Photo de dépôts observés sur un banc de gravier de l'Arc (à gauche) et photo d'un paysage typique de terre noires de l'observatoire Draix-Bléone (à droite)

1.2 PRESENTATION DES SITES D'ETUDES

1.2.1 Le Galabre

Le Galabre est une rivière des Alpes du Sud située quelques kilomètres au nord de Dignes les Bains. Le bassin versant du Galabre est instrumenté dans le cadre du SNO Draix Bléone. Deux stations hydrosédimentaires installées depuis 2007 et 2018 sur le Galabre amont (20km²) et aval (34 km²) permettent un suivi des débits liquides et des concentrations en matières en suspension toutes les 10 minutes. Les détails sur l'instrumentation et le bassin versant ainsi que les accès aux données sont présents dans Legout et al. (2021). Le Galabre est une rivière sans ouvrages majeurs et peu endiguée. Le bassin versant amont présente des zones sources de sédiments (i.e. badlands) développées dans différentes lithologies (marnes, molasses, calcaire et dépôts quaternaires) générant des flux en suspension moyens de 640 t/km²/an. Ces flux sont transportés à deux périodes de l'année, en fin de printemps début d'été où les débits sont faibles (<1 m³/s) et les concentrations élevées (jusqu'à 350 g/l), et en fin d'automne début d'hiver où les concentrations dépassent rarement 10 g/l mais les débits sont élevés (jusqu'à 34 m³/s). A l'aval de la station amont, la morphologie du Galabre change avec une bande active du lit qui s'élargit (max 70 m) en lien avec son changement de pente (2% en moyenne sur les 2,5 km qui séparent les 2 stations). Certains bancs sont végétalisés, le syndicat mixte Asse Bléone ayant récemment engagé des travaux d'essartement et de mise à blanc de ces bancs sur la partie aval du Galabre.

1.2.2 L'Isère en Combe de Savoie

L'Isère est un cours d'eau du Sud-est de la France confluant avec le Rhône à hauteur de Valence. La Combe de Savoie correspond à la plaine de l'Isère qui s'étend sur un linéaire de 40 kilomètres environ entre sa confluence avec l'Arly (au niveau d'Albertville) et Pontcharra à la frontière entre les départements de la Savoie et de l'Isère (Figure 4).

Sur ce tronçon, le lit est endigué et occupé par des bancs ayant tendance à se fixer, s'exhausser et se végétaliser (Figure 4a). Le dépôt de sédiments fins sur les bancs (transportés en suspension dans l'écoulement) en présence de végétation abondante créant un « effet peigne » a contribué significativement à leur aggradation entre 1980 et 2015. Par ailleurs, la végétalisation du lit contraint fortement les écoulements en crue en réduisant la section hydraulique. Cet effet peut engendrer d'importants dysfonctionnements sur les digues ou favoriser les inondations dans le lit majeur. Cette dynamique a contraint les gestionnaires locaux à définir puis à réaliser un programme de travaux important à l'échelle du territoire. Ces opérations consistent 1) à restaurer les bancs exhaussés et végétalisés en retirant les plantes et la couche de sédiments fins présentes sur les galets pour retrouver une plus grande section hydraulique, et 2) à remodeler ces derniers afin de rendre ces travaux les plus pérennes possibles. Ces travaux ne concernant que quelques bancs ponctuels dans un premier temps se sont généralisés à partir de 2017 dans le cadre du PAPI.

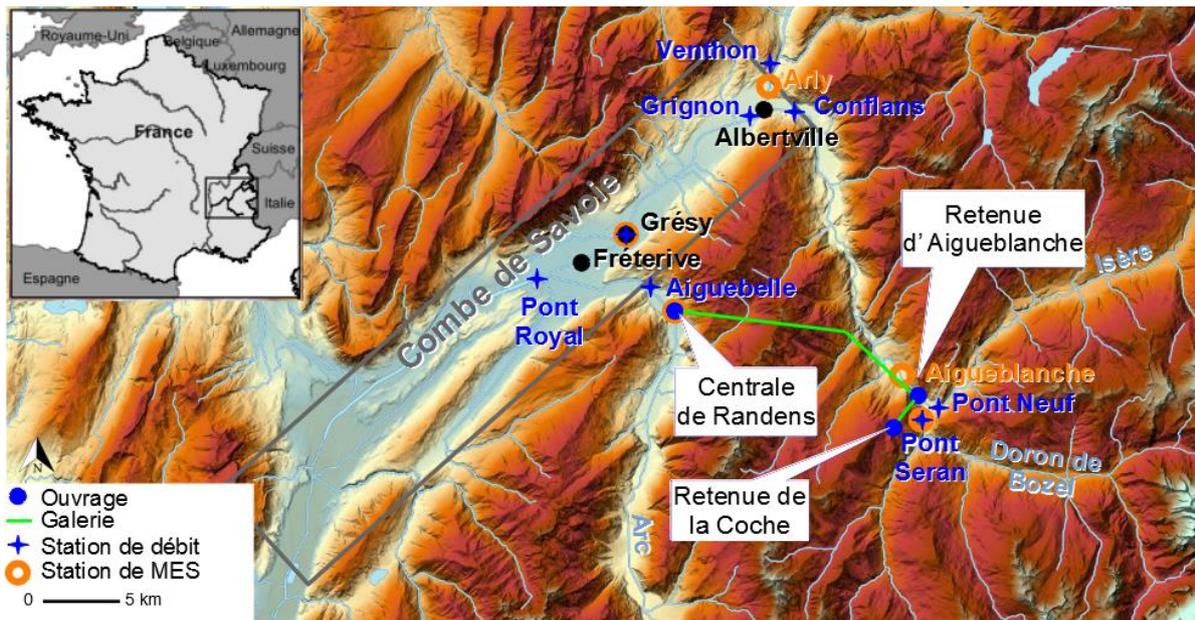


Figure 4 : Localisation du site d'étude (Isère en Combe de Savoie) et exemple de travaux (essartement, arasement et remodelage des bancs) réalisés sur le secteur de Fréterive sur l'Isère en Combe de Savoie. a) Lit avant travaux en 2016, b) lit après travaux en 2017.

1.3 LES INTERVENANTS

1.3.1.1 INRAE

INRAE (équipes "Hydraulique des rivières" de l'unité de recherche RiverLy et "STRIM" - tranSPorT solide, géomoRphologie, envlronneMent - de l'unités de recherche 'ETNA) est l'un des principaux instituts français travaillant sur la mesure et la modélisation du transport sédimentaire. De nombreux appareils de mesures sont utilisés voire développés à INRAE, que ce soit pour la mesure de débit (ADCP, LSPIV, etc.), de la charge de fond (échantillonneurs) ou en suspension (échantillonneurs isocinétiques, turbidimètres) ou de granulométrie (LISST portable, LISST 200X). INRAE a une grande expérience des mesures sur le terrain et en laboratoire, et suit le transport des sédiments dans la rivière Arc et le bassin versant de la Draix-Bléone depuis plus de 10 et 35 ans respectivement. Plusieurs canaux de différentes tailles sont également disponibles à INRAE pour développer des expériences de laboratoire tant sur l'hydraulique (projet ANR FLOWRES coordonné par S. Proust, 2015-2018) que sur le transport sédimentaire (doctorats E. Perret, 2014-2017 ; C. Carbonaril, 2015-2018 ; et S. Gupta, 2019-2023, dans le cadre de ce projet). Par ailleurs, l'équipe "Hydraulique des rivières" développe des modélisations numériques 1D pour évaluer le transport et les bilans sédimentaires (codes RubarBE et AdisTS). Ces deux logiciels ont été validés respectivement pour les sédiments grossiers (Camenen et al., 2017) et les sédiments fins (Guertault et al., 2016). AdisTS a été tout particulièrement utilisé dans le cadre de la thèse de Junjian Deng (2022). INRAE a été impliqué dans le WP1 (tâches 1.2 et 1.4),

WP2 (tâches 2.1 et 2.2), et WP3 (tâches 3.1, 3.2 et 3.3). Cette implication majeure de l'équipe Hydraulique des rivières dans la plupart des tâches du projet, y compris les trois approches complémentaires proposées (c'est-à-dire les analyses de laboratoire, de terrain et numériques), en a fait un partenaire naturel pour la coordination du projet.

1.3.1.2 IGE Hydrimz

L'institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) est unité mixte de recherche regroupant des personnels du CNRS, de l'IRD, de l'Université Grenoble Alpes et de Grenoble-INP. L'IGE mène ses recherches sur le cycle de l'eau, le climat et l'anthropisation de notre planète. Il est constitué de 8 équipes de recherche dont l'équipe HYDRIMZ ayant participé à ce projet de recherche. L'équipe HYDRIMZ se compose d'une quinzaine de chercheurs et enseignants chercheurs permanents travaillant sur les transferts d'eau et de matières dissoutes et particulaires dans les eaux de surface et souterraines depuis l'échelle des pores jusqu'aux bassins versants de quelques milliers de km². Les échelles de temps investiguées sont courtes, de l'évènement pluvieux de quelques heures à quelques décennies. L'axe de travail sur l'érosion et le transport solide est développé selon des approches basées sur l'observation et la modélisation à base physique distribuée. Les membres de l'équipe travaillant sur cet axe sont ainsi impliqués dans le co-portage de deux services nationaux d'observation (SNO Draix Bléone et OHMCV de l'infrastructure de recherche OZCAR) ainsi que du site atelier Arc Isère (Zone atelier du bassin du Rhone de l'infrastructure de recherche RZA). Des efforts importants sont consacrés depuis une dizaine d'années aux développements d'instruments ou de méthodes originaux pour mesurer et caractériser les flux solides (e.g. station RIPLE, SCAF, hydrophone).

1.3.1.3 EDF

Trois entités différentes d'EDF, premier groupe hydroélectrique européen, ont participé au projet : le laboratoire de R&D EDF-LNHE est le principal développeur du code de calcul open source Telemac-Mascaret (<http://www.opentelemac.org>). Le LNHE est impliqué dans plusieurs travaux sur le site d'Arc-Isère ; et il réalise également des études en laboratoire, y compris des modèles à petite échelle et des campagnes de terrain. EDF est l'un des rares (sinon le seul) énergéticiens mondiaux à disposer d'un département de recherche aussi important. Plusieurs ingénieurs de recherche EDF font partie du Laboratoire d'Hydraulique de St-Venant, un laboratoire de recherche commun entre le EDF R&D et l'Ecole des Ponts Paristech ; la deuxième entité d'EDF participant au projet DEAR est EDF-DTG spécialisé dans la mesure et en charge du suivi des débits et des flux de sédiments. La troisième entité est EDF-CIH, le bureau d'études et d'assistance à maîtrise d'ouvrage de l'exploitant hydroélectrique. Il a été en charge dans ce projet de mesures de terrain, de travaux SIG et de l'intégration des travaux de recherche vers l'opérationnel.

2 SYNTHÈSE DES PROCESSUS ETUDIÉS DANS LE CADRE DU PROJET

2.1 MIEUX COMPRENDRE ET CARACTERISER LES SOURCES DE SEDIMENTS FINS

2.1.1 Impact de l'altération physique des marnes sur les exports sédimentaires

Thèse de Coline Ariagno (Ariagno C. 2022)

Objectif : L'objectif de ce travail était d'analyser les facteurs de contrôle de la production de sédiments fins par des petits bassins versants marneux, et en particulier d'investiguer l'impact de l'altération physique des marnes sur la variabilité intra et interannuelle des exports sédimentaires. Le travail a été basé sur l'observatoire Draix-Bléone qui dispose de longues chroniques de données climatiques, hydrologiques et érosives.

Méthodes : Le travail a mis en œuvre trois approches : (1) Une analyse rétrospective des données de température du sol à différentes profondeurs et des données de flux sédimentaires, (2) Un suivi régulier (4x/an) de l'état de surface du régoilite, couche altérée en surface des marnes (Cf. Annexe I), et (3) Une modélisation de type « landscape evolution modeling » à l'échelle du bassin versant.

Résultats : L'analyse de données a mis en évidence une grande variabilité temporelle, tant saisonnière qu'inter-annuelle, des exports sédimentaires. A l'échelle saisonnière, il existe un cycle d'hystérèse entre pluie et export sédimentaire qui suggère que les exports sont gouvernés par les intensités de pluie en début d'année, puis limités par la ressource en sédiments disponible en fin d'année. A l'échelle interannuelle, le travail a montré que les exports sédimentaires annuels sont en premier lieu gouvernés par l'intensité des précipitations. Le second facteur de contrôle qui a été mis en évidence est l'intensité de l'altération hivernale sous l'effet du processus de frost-cracking. L'altération génère un régoilite fin et fragmenté qui peut ensuite être mobilisé par l'érosion. Ainsi, après un hiver doux générant peu d'altération, l'export sédimentaire de l'année suivante sera limité par une ressource en régoilite restreinte.

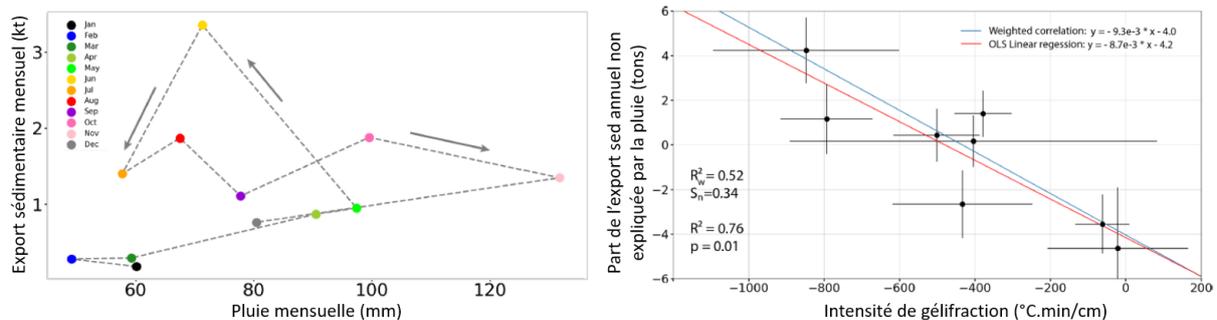


Figure 5: (a) Relation d'hystérèse entre pluie et exports sédimentaires mensuels, et (b) influence de la gélification sur les exports sédimentaires annuels

Le suivi régulier du régoilite a mis en évidence un cycle annuel de variation de la granulométrie (D_{50}) et de la résistance de la surface. Ces variations ont pu être attribuées à l'alternance de périodes hivernales pendant lesquelles l'altération génère un régoilite plus fin, et de périodes estivales pendant lesquelles les averses mobilisent et exportent la couche la plus fine de surface, laissant apparaître une granulométrie plus grossière, et donc plus difficilement mobilisable par les derniers épisodes d'automne. Ce cycle du régoilite explique donc la diminution des exports sédimentaires observée en fin d'année.

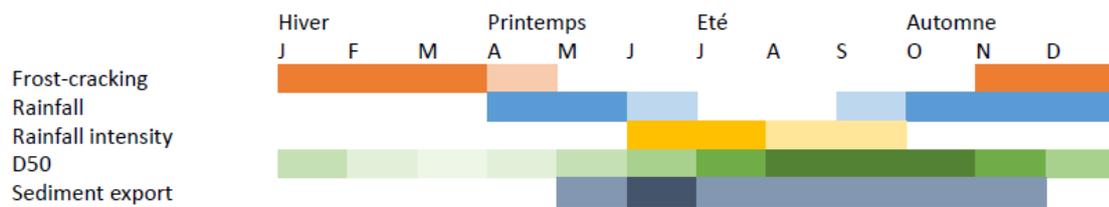


Figure 6: Cycle saisonnier de l'état du régolithe, des précipitations et des exports sédimentaires

Le modèle a été construit en couplant processus d'altération, de transport sur les versants et dans le réseau hydrographique, pour reproduire au mieux la dynamique sédimentaire saisonnière. Le terme d'altération permet de rendre compte de la production de régolithe annuelle. L'ajout, dans la loi d'érosion de versant, d'un terme de dépendance à l'épaisseur de régolithe, permet de simuler correctement la diminution des exports en fin d'année. L'ajout d'un terme de dépendance à l'intensité de précipitation dans les lois de transport (sur les versants et dans le réseau hydrographique), permet de simuler les exports importants observés en début d'été lors des orages. Le modèle construit permettra donc de prédire la réponse sédimentaire de ces bassins versants à des changements de température impactant l'altération d'une part, et à des changements de précipitations impactant l'érosion et le transport des sédiments d'autre part.

2.1.2 Erosion et transfert des sédiments dans un bassin versant de taille moyenne

2.1.2.1 Stage de Suffiyan Safdar de mars à aout 2021

Contexte : L'objectif de la thèse de [Uber \(2020\)](#) était de comprendre l'origine de la variabilité temporelle des flux de Matières En Suspension (MES) dans les bassins versants de moyenne échelle comme celui du Galabre (20km²). En combinant des approches de traçage low cost de l'origine lithologique des sources de MES avec du traçage numérique des MES à l'aide du modèle Iber, son travail met en évidence à la fois une stabilité et une forte variabilité intra-événementielle de la contribution des différentes sources lithologiques de versant au flux de MES en fonction des crues. Les différents scénarii de modélisation testés ont permis d'identifier le contrôle important joué par la variabilité spatiotemporelle de la pluie dans l'explication de la variabilité des contributions des différentes sources de versant. L'ensemble de la variabilité temporelle des flux de MES n'a cependant pas pu être expliquée dans ce cadre de travail ne prenant pas en compte les processus de stockages intermédiaires de fines.

En parallèle de ce travail, [Misset \(2019\)](#) montre que les stocks de fines présents dans les lits de plusieurs rivières alpines (100-1000 km² d'aire drainée) peuvent contribuer significativement aux flux de MES à l'aval mais que ces contributions dépendent des configurations morphologiques des sources (e.g. distances à l'exutoire des sources de versant par rapport à celles des zones en tresses du lit). Le déstockage des fines dépend des interactions avec le charriage et les changements morphologiques et donc des magnitudes et durées des événements.

Objectif : [S. Safdar \(2021\)](#) s'est donc intéressé dans son stage à la mise en évidence de dynamiques de stockages et de remobilisation de fines dans les lits de rivières pour des tailles de bassins versants inférieures à celles étudiées par [Misset \(2019\)](#), de l'ordre de quelques dizaines de km².

Résultats : Le travail a été mené au cours de ce projet sur un tronçon du Galabre à l'aval de la station étudiée par [Uber \(2020\)](#). Une approche par bilan sédimentaire a été mise en place sur ce tronçon de 2,5 km suite à l'installation fin 2018 de la station hydrosédimentaire Riple 2,5 km à l'aval de la station étudiée par [Uber \(2020\)](#). Les premiers résultats mis en évidence par [Safdar \(2021\)](#) sont que :

- Les plus forts flux observés sur la période 2019-2020 à la station aval sont liés aux crues hivernales. A noter que l'année 2019 a été une année particulière dans les Alpes du sud avec un flux annuel de MES deux fois plus élevé que le flux moyen annuel de 650 t km⁻² observé depuis 2007 à la station amont.

- Les bilans sédimentaires réalisés entre les deux stations montrent une saisonnalité marquée avec des périodes d'érosion et donc d'export en automne hiver pour des débits liquides élevés (max. $1,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$) alors que du stockage semble avoir lieu en été lors d'évènements présentant des concentrations en MES très élevées (max. 200 g l^{-1}). Cette tendance estivale au stockage de fines en été doit être confirmée pour un plus grand nombre d'évènements, ce nombre étant limité par la difficulté à mesurer correctement les gammes basses de débits liquides à la station aval.

Ces premiers résultats sont actuellement retravaillés dans le cadre de la thèse de C. Delcourt démarrée en septembre 2021, de manière à les replacer dans une série temporelle élargie jusqu'à fin 2021.

2.1.2.2 Post-doc Marteen Baaker 2021

Contexte : Dans le cadre d'un suivi réalisé sur la Séveraisse ($>100\text{km}^2$), [Misset \(2019\)](#) a montré que l'enregistrement dans le sol en berge des vibrations générées par le transport solide pouvaient permettre de suivre la dynamique du charriage au cours des crues. Les puissances sismiques mesurées dans la gamme 20-80Hz présentaient une corrélation significative avec les mesures directes de flux de charriage réalisées lors de crues. La mise en relation des séries temporelles de puissances sismiques (i.e. proxy du charriage) avec celles de turbidité (proxy de la suspension) a montré que ces deux grandeurs étaient très liées pendant la période de fonte alors qu'elles l'étaient beaucoup moins en été. Pour un bassin versant de taille méso comme celui de la Séveraisse, cela suggère donc que les flux de MES sont contrôlés par les interactions avec le lit de la rivière en période de fonte alors que les MES proviendraient plutôt des versants en été sans lien direct avec les processus de charriage.

Objectif : L'objectif du travail de M. Baaker était donc d'évaluer le potentiel des mesures sismiques pour caractériser les processus hydrosédimentaires sur un bassin versant de taille plus petite que celui étudié par Misset et présentant une bande active de rivière moins développée.

Résultats : Ce travail a été réalisé sur le site du Galabre du SNO Draix Bléone. Il s'avère plus difficile sur un site comme le Galabre d'utiliser les mesures sismiques comme proxy du charriage et donc du relargage de sédiments fins piégés dans la matrice grossière. En effet l'absence de mesures directes du charriage sur le site du Galabre n'a pas permis pas de distinguer de manière évidente la part des vibrations liées à la turbulence de l'écoulement de celles liées aux impacts des éléments grossiers. Des plaques mesurant les impacts ont été installés à 4 endroits dans le lit mineur du tronçon étudié du Galabre fin 2021 pour tenter d'obtenir des mesures de l'occurrence du charriage qui pourraient être confrontées aux mesures sismiques. L'absence de crue morphogène depuis fin 2021 n'a pas permis pour l'instant d'avancer sur les gammes de fréquence les plus discriminantes pour le suivi du charriage sur un site comme le Galabre. Le suivi par sismomètres combinés aux plaques à impact est donc actuellement poursuivi sur le site du Galabre. En revanche, au cours de son travail d'analyse, M. Bakker a mis en évidence l'enregistrement de signatures de la pluie par les mesures sismiques. Alors que ces signatures étaient soulignées dans la littérature comme du bruit, aucun travail n'avait cherché à quantifier le lien entre des descripteurs de la pluie et les puissances sismiques. [Bakker et al. \(2022\)](#) montre que les mesures sismiques permettent une bonne estimation de l'énergie cinétique de la pluie, variable pertinente pour caractériser les processus d'érosion sur versant, en particulier le détachement de particules par la pluie.

2.1.3 Caractériser la part de sédiments fins dans la matrice graveleuse et évaluation des stocks de sédiments fins à l'échelle de la rivière

Contexte : Une difficulté aujourd’hui est d’estimer les stocks de sédiments fins disponibles dans l’objet rivière et leur potentielle remobilisation lors des événements hydrologiques.

Objectif : Développer des méthodes « de terrain » permettant de caractériser les stocks de sédiments fins dans la matrice ; Apporter une information sur la quantité potentielle de sédiments qui peut être relargué en crue et disposer d’une idée sur la nécessité ou pas d’intégrer les apports du lit dans l’analyse des flux / une modélisation.

Un premier protocole a été proposé par INRAE dans le cadre de la thèse de [Junjian Deng \(2022\)](#). Un second protocole possible est le carottage cryogénique.

2.1.3.1 Caractérisation des stocks de sédiments fins dans la matrice (protocole INRAE)

Résultats : La méthode proposée se base sur les travaux de [Misset et al. \(2021\)](#) en intégrant une mesure complète de la granulométrie de l’échantillon et tout spécifiquement les sables (cf. Annexe II). La méthodologie inclue les principales étapes suivantes :

- Mesures ponctuelles in-situ de des stocks de fines (cf. section 2.1.3.2 et Annexe II) ;
- Zonage en zones homogènes le site étudié en y incluant les mesures ponctuelles. Ce zonage peut se faire in-situ (mesure DGPS) ou via un SIG si des photos aériennes sont disponibles sur la même période d’étude. Ce zonage permet ainsi de spatialiser les mesures ponctuelles sur l’ensemble du cours d’eau étudié ;
- Estimation du volume remobilisé suite à un ou plusieurs événements hydrologiques. Cela peut être estimé à l’aide de mesures bathy-topo détaillées en diachronique ou via une modélisation numérique, soit avec évolution des fonds, soit utilisée pour évaluer une épaisseur d’érosion sur les différentes zones homogènes.

Cette méthodologie a été tout d’abord appliquée sur le Galabre ([Deng et al., 2022d](#)). Les stocks de fines sont en général d’environ 15% en surface et 20% en subsurface de la masse totale des sédiments. Une grande partie de ces stocks correspond toutefois aux sables grossiers (entre 500µm et 2mm) et les très fines (argiles et limons) ne représente en moyenne que 30% en surface et 20% en subsurface (Figure 7). En faisant le lien avec l’avulsion du chenal observé suite aux crues au printemps 2020, il a été estimé qu’un stock de fines de 2500 tonnes environ a pu être remis en suspension (1700 par une érosion verticale, 800 du fait de l’avulsion du chenal), ce qui est du même ordre de grandeur que les différences de flux estimées par les stations hydro-sédimentaires amont et aval au site d’étude.

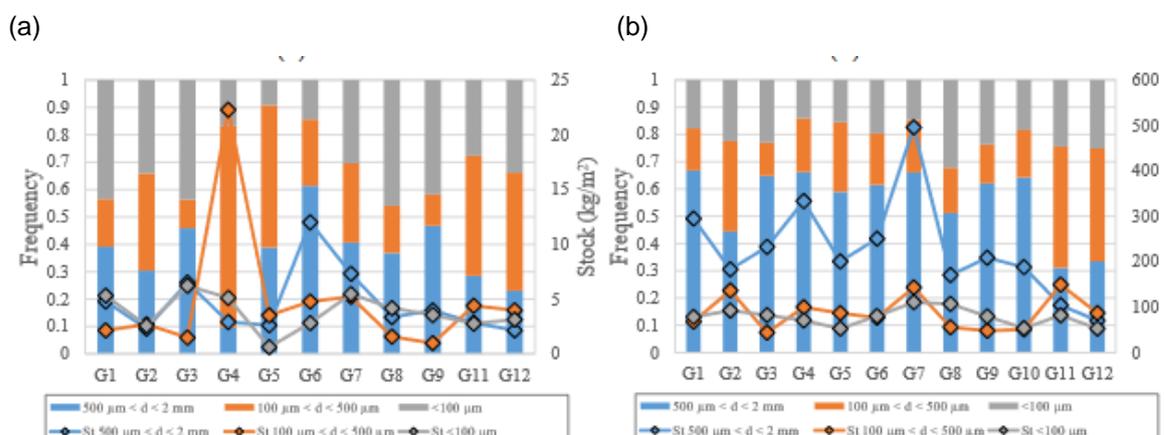


Figure 7: Distribution granulométrique des stocks de fines en surface (a) et subsurface (b)

Sur l’Arc et l’Isère, les résultats ont permis de montrer que la qualité des stocks était relativement homogène en surface et sub-surface tout le long du système Arc-Isère avec des valeurs d’environ 10 kg/m² et 2 kg/m² (sables et très fines, i.e. argiles et limons) en surface et d’environ 350 kg/m³ et

70 kg/m³ (sables et très fines) en subsurface. Les quantités de sable sont ainsi 4 fois supérieure aux quantités de très fines en surface et 6 fois supérieure en subsurface. Il est à noter aussi que des dépôts très importants de fines sont observés sur la partie haute de nombreux bancs, en partie dans l'Isère ; ces quantités doivent se rajouter aux stocks de surface.

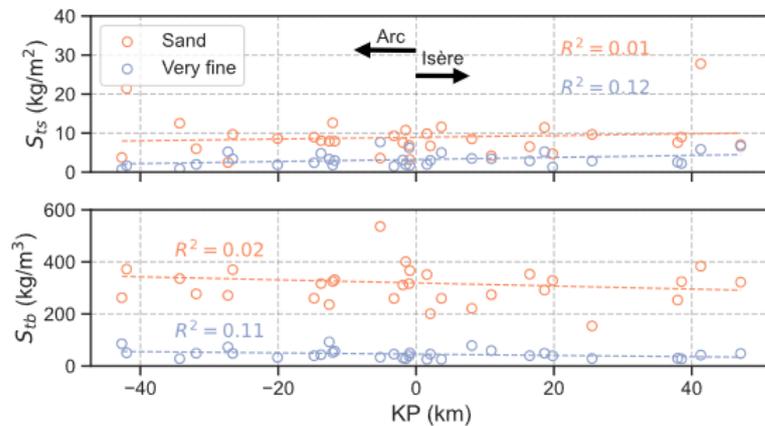


Figure 8: Variation longitudinale du stock de l'Arc et l'Isère

Du fait de l'absence de données (photographies aériennes ou levée Lidar) sur l'ensemble du système Arc-Isère sur la période des campagnes de mesures, l'analyse des potentiels volumes érodés pour une crue donnée a été réalisé en combinant les résultats d'une modélisation 1D et du levée Lidar réalisé en 2013 (Piednoir, 2021). Les stocks totaux estimés sur l'Arc et l'Isère ont ainsi été estimés à $M_{tsAI} = 1.2 \times 10^6$ tonnes en subsurface et $M_{tsAI} = 0.3 \times 10^6$ tonnes en surface (Deng et al., 2022a). La Figure 9 présente les résultats de stocks mobilisés selon l'occurrence de la crue. Il apparaît logiquement que les stocks de surface sont plus rapidement mobilisés en particulier pour l'Isère car les bancs de l'Isère sont plus rapidement submergés (pour des débits d'occurrence relativement faibles). Par contre, les stocks en surface sont difficilement remobilisables. Seuls quelques tronçons de l'Arc peuvent subir une érosion suffisante lors des crues rares pour remobiliser les sédiments de subsurface. Il est cependant à noter que seule l'érosion verticale est prise en compte ici (pas l'érosion latérale) et sur la base d'une modélisation 1D ; les incertitudes sont donc assez élevées. Selon ces calculs, nous avons estimés que la part des sédiments du lit de l'Arc et de l'Isère sur les flux mesurés à Grenoble est d'environ 5% pour des débits d'occurrence courante (0.1 à 1%) et d'environ 3% pour des débits d'occurrence rare (<0.1%).

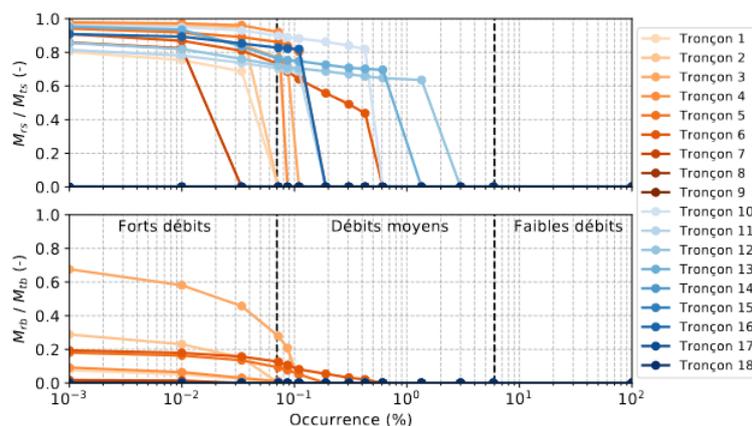


Figure 9: Stocks potentiellement remobilisables adimensionnés par les stocks totaux pour chacun des tronçons en fonction de l'occurrence de débit et des 18 tronçons homogènes définis depuis l'Arc à SMLP à l'Isère à Grenoble.

2.1.3.2 Carottage cryogénique

Résultats : EDF a réalisé plusieurs expérimentations de carottage cryogénique en partenariat avec les bureaux d'étude Athos Environnement et Ginger Burgeap. Cette méthode prometteuse permet avec des moyens relativement limités (pas d'utilisation de moyens mécaniques lourds) de prélever dans la masse un certain nombre de carottes afin de se faire une idée de la stratigraphie et de la granulométrie de la matrice du banc.

Sur l'Isère en Combe de Savoie, une expérimentation a été réalisée en 2018 (EDF2018). La Figure 10 illustre les résultats obtenus sur un banc. La matrice du banc est composée de fines non cohésives et de sables (seulement quelques pourcents de fines inférieures à 63 microns et de l'ordre de 40 % de sédiments inférieurs à 1 millimètre).

L'intérêt du carottage cryogénique est de pouvoir visualiser les couches alternatives de sédiments composant le banc.



Ouverture tamis (mm)	% Passant (moyenne)
200	
150	
100	
80	100%
63	96%
50	92%
40	89%
31.5	84%
20	74%
12.5	64%
10	59%
5	48%
2	40%
1	36%
0.50	26%
0.20	8%
0.10	4%
0.063	3%



Figure 10 : Illustration d'une carotte prélevée sur le banc dit de « Fréterive » sur l'Isère en combe et composition granulométrique moyenne de l'ensemble des carottes (photos BURGEAP-EDF)

2.1.4 Définir les propriétés physiques des sédiments fins déposés à la surface des bancs

Thèse de [Hanna Haddad \(2022\)](#)

Objectif : L'objectif scientifique de ce travail était de caractériser la variabilité spatiale et temporelle des propriétés physiques des sédiments fins déposés à la surface des lits de rivières alluviales, en particulier

leurs propriétés d'érosion et de sédimentation, afin d'améliorer la compréhension et la modélisation des dynamiques de dépôt et de reprise des stockages intermédiaires de fines. L'objectif méthodologique associé était de comparer différents dispositifs de mesures de ces propriétés physiques, d'évaluer les plus pertinents pour le suivi des dépôts de fines dans le contexte spécifique des rivières à graviers et de proposer quelques recommandations sur les protocoles de mesure.

Méthodes : La démarche suivie dans la thèse de Hanna Haddad a été de combiner de la modélisation numérique hydrosédimentaire 2D avec des mesures in situ sur les deux sites d'étude principaux du projet ANR DEAR, l'Isère en Combe de Savoie et le Galabre. Ceci constitue la principale originalité de ce travail puisqu'aucun travaux de ce type n'existait dans ce contexte de rivière à graviers.

L'axe de modélisation a essentiellement consisté à analyser la sensibilité des variables de sorties comme les masses de fines érodées sur des tronçons de rivière sans chercher à reproduire exactement les flux de MES observés. Différents scénarios de modélisation ont donc été construits sur la plateforme Telemac-Gaia et alimentés par les mesures de terrain des propriétés physiques des sédiments pour tester différentes hypothèses sur les processus dominants et leurs facteurs de contrôle.

Les mesures de terrain ont été réalisées au cours de 5 campagnes sur chaque site à l'aide de différents appareils, pour certains développés au cours de la thèse. Même si des mesures génériques comme les granulométries, densités apparentes sèches, teneurs en eau volumiques ont été réalisées sur la plupart des dépôts de fines caractérisés, l'effort de mesure s'est focalisé sur les propriétés d'érosion (i.e. contrainte critique et taux d'érosion). Ces mesures ont été réalisées à l'aide de différents appareils : mini-pénétromètre, scissomètre, érodimètre à jet (CSM, prêté par Environment Canada), érodimètre rotatif (EROMES, développé à l'IGE), canal portable d'érosion (déployé lors d'une campagne par l'Univ. de Caen).

Résultats:

- Les premiers résultats de modélisation numérique réalisés sur l'Isère en Combre de Savoie ([Haddad et al., 2020](#)) ont mis en évidence une forte sensibilité des masses érodées à la fois aux variables décrivant la sédimentation (i.e. vitesse de chute des particules) et l'érodibilité (contrainte critique et taux d'érosion). [Legout et al. \(2018\)](#) ayant montré que le Système de Caractérisation des Agrégats et des Flocs (SCAF ; [Wendling et al., 2015](#)) était adapté pour mesurer les propriétés de sédimentation des particules de fines présents dans les rivières à graviers, les efforts de mesure se sont focalisés sur les propriétés d'érosion dans la suite de la thèse.
- Les mesures réalisées par [Haddad et al. \(2022\)](#) ont montré une forte variabilité spatiale des contraintes critiques d'érosion et des taux d'érosion. Néanmoins, cette variabilité présente une organisation spatiale sous forme de transects perpendiculaires au lit mineur. L'humidité volumique des dépôts présente une corrélation significative avec leurs propriétés d'érosion qui reflète partiellement l'altitude des dépôts par rapport à la surface libre du lit mineur. Les sédiments moyennement humides, localisés dans les zones marginales du lit mineur, sont les plus résistants et présentent les taux d'érosion les plus faibles. Les sédiments saturés ou quasi saturés en eau situés dans ou proches du lit mineur ainsi que les sédiments secs localisés sur les bancs les plus hauts présentent des contraintes critiques faibles associées à de forts taux d'érosion.
- Une analyse de sensibilité numérique des masses érodées à la prise en compte de cette variabilité spatiale dans les modèles a donc été réalisée. Suivant le jeu de données à disposition, les conclusions de cette analyse diffèrent. Dans le cas où la caractérisation de la variabilité spatiale de l'érodibilité est exhaustive (i.e. assez de mesures ont été réalisées), la sensibilité des masses érodées à la variabilité spatiale est modérée. Dans ce cas, utiliser une valeur moyenne des propriétés d'érosion sur le domaine peut suffire pour modéliser les masses totales

érodées mais sans assurer que les contributions respectives de chaque zone de dépôt au flux de MES soit correcte. Si des enjeux existent quant à l'aptitude du modèle à simuler également correctement les masses érodées par zones, alors il est préférable de spatialiser les variables décrivant l'érosion par zones. Dans le cas d'une caractérisation incomplète de la variabilité de l'érodibilité (i.e. peu de mesures disponibles), la sensibilité des masses érodées modélisées à cette variabilité est alors très accentuée, et les incertitudes des résultats numériques deviennent très importantes. Les résultats numériques sont alors à considérer avec précaution.

- Les résultats des mesures réalisées lors des 10 campagnes de terrain sur l'Isère et le Galabre montrent par ailleurs que la variabilité temporelle est plus importante que la variabilité spatiale. Deux principaux facteurs explicatifs de la variabilité temporelle ont été identifiés, la nature variable des dépôts d'une campagne à l'autre en fonction des sources de MES sollicitées par les épisodes pluvieux (i.e. origine lithologique différentes) et de l'amplitude des crues (i.e. sélectivité granulométrique selon les capacités de transport) et la consolidation des dépôts avec le temps.
- Les recommandations proposées pour caractériser l'érodibilité des sédiments fins in situ pour la modélisation numérique concernent le choix de l'appareil de mesure de l'érodibilité, des positions, du nombre et des dates de mesures à réaliser sur le terrain. Les appareils tels que le CSM ou l'EROMES permettant de multiplier le nombre de mesures in situ sont à privilégier pour bien caractériser la variabilité spatiale de l'érodibilité. La mesure de l'humidité volumique des dépôts permet de définir les différentes zones de dépôts (saturée en eau, marginale et surfacique) où les mesures d'érodibilité doivent être effectuées. Au regard des analyses faites sur le site du Galabre, nous recommandons d'effectuer au moins 10 à 15 mesures dans la zone marginale et 15 à 20 dans la zone surfacique pour caractériser correctement la distribution statistique de la variabilité spatiale. En termes de fréquence de mesure, l'occurrence de crues érodant ou déposant de nouveaux sédiments et la consolidation des dépôts avec le temps semblent impacter fortement l'érodibilité. Il est donc nécessaire de mettre à jour les variables régulièrement si le modèle a pour vocation à être utilisé sur des vastes périodes temporelles.

2.2 MESURER LES FLUX DE MES

2.2.1 Calibration de la relation MES Turbidité

Objectifs : Les objectifs de travail collaboratif entre IGE, INRAE et EDF portent principalement sur le calage des turbidimètres afin de limiter les incertitudes, en particulier liées à la présence de sables et autres particules (débris végétaux, etc.).

Méthodes : La méthode a principalement consisté en des analyses des effets de certains paramètres influençant la turbidité comme la granulométrie (Thollet et al., 2012) ou la couleur des particules (Bakker et al., soumis) et des réflexions sur les possibles méthodes de calage des turbidimètres.

Résultats :

L'expérience acquise ces dernières années a pu montrer que la granulométrie était un facteur majeur de la sensibilité de la turbidité, avec une intensité du signal optique inversement proportionnelle au diamètre des particules (Foster et al. 1992, Pfannkuche et Schmidt 2003, Thollet et al. 2013). Cependant, d'autres études ont montré une sensibilité du signal à la couleur des particules (Sutherland et al., 2000), à leur forme (Gibbs, 1978), au taux de matière organique (Boss et al., 2004). Même si cela n'est généralement pas vraie sur toute la gamme de mesure des turbidimètres, il est généralement observé une relation linéaire entre le signal de turbidité et les concentrations.

La Figure 11 présente des résultats typiques de calage de turbidimètres (voir aussi le Tableau 1). Si une relation unique peut permettre une analyse cohérente des flux moyen annuel, il apparaît qu'un suivi à l'échelle de l'événement nécessite potentiellement des calages spécifiques par période homogène (fonte, saison, etc.), voire sur des événements hydrologiques (crue, chasse). En effet, ces événements peuvent induire certaines spécificités sur la qualité des matières en suspension comme la remise en

suspension d'éléments plus grossiers (sables) mais aussi de débris végétaux (automne ou chasse). Ainsi, lors des chasses de la Basse-Isère, le rapport concentration sur turbidité est souvent doublé, a priori du fait de reprise de sédiments sableux mais sans doute aussi de débris végétaux (Figure 11b).

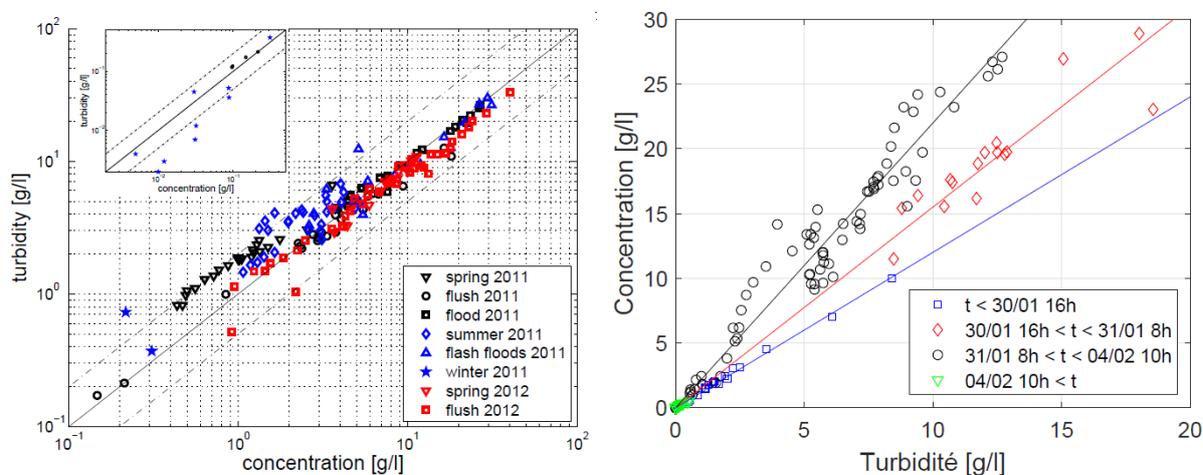


Figure 11: Relations entre turbidité et concentration en MES pour la station de Pontamafrey sur l'Arc (a) et pour la station de Beaumont-Monteux sur l'Isère lors de la chasse de la Basse-Isère en 2021 (b).

Deux améliorations de la calibration des turbidimètres peuvent être proposées pour une analyse systématique des flux de MES :

- Un calage de la relation concentration-turbidité par classe de débits permettant d'inclure le potentiel effet d'une resuspension des sables fonction des contraintes dans le lit, et donc du débit (Camenen et al., 2020) ;
- Un double calage de la relation concentration-turbidité en séparant les sables (tamisage à 63 μm). Un premier calage sur la concentration totale peut être réalisé comme fait habituellement ainsi qu'un second calage sur les concentrations des échantillons prélevés, sables exclus. Ce second calage permet d'évaluer les flux de MES, sables exclus avec une relation a priori plus stable ; la différence de flux selon les deux calages permet alors d'avoir une évaluation des flux de sables (Camenen et al., 2023). Bien qu'incertaine, cette évaluation peut s'avérer très intéressante.

Ces propositions ne sont valables que pour une hypothèse d'apports de qualité homogène (sources similaires) et d'un impact faible des débris végétaux sur la turbidité.

2.2.2 Un bilan des flux de MES sur l'Arc et l'Isère

Le site Arc-Isère de la ZABR existe aujourd'hui depuis près de 15 années avec la mise en place d'un réseau de stations hydro-sédimentaires par bassin emboîtés (Arvan, Arc, Isère). Ce réseau a déjà été mis en valeur par un datapaper (Thollet et al., 2021). Les données sont aujourd'hui référencées sur la base de données BDOH (<https://bdoh.irstea.fr/ARC-ISERE/>) avec la mise à disposition d'un doi pour citation (10.17180/OBS.ARC-ISERE). Un article de synthèse est aujourd'hui en préparation permettant d'aborder une compréhension de ce bassin versant sous l'aspect temporel mais aussi spatial. En effet, il a été possible de faire des bilans moyens annuels sur les cinq principales stations hydro-sédimentaires de l'Arc-Isère depuis 2006, indiquant une variabilité interannuelle assez importante et liée aux événements rares. Cette variabilité a été confirmée sur la station de Grenoble-campus en intégrant les mesures de Dumas (2007) depuis 1994 et quelques informations historiques ponctuelles (1913 = 20Mt, 1923 = 3 Mt). Il apparaît de plus qu'en moyenne, les deux tiers des flux observés à Grenoble proviennent de l'Arc. Enfin, une typologie des événements (crues de fusion nival, laves torrentielles, chasses de barrages et tempêtes) a pu être mise en place avec une caractérisation de ces événements et de leur évolution lors de leur propagation de l'Arvan à l'Isère en passant par l'Arc.

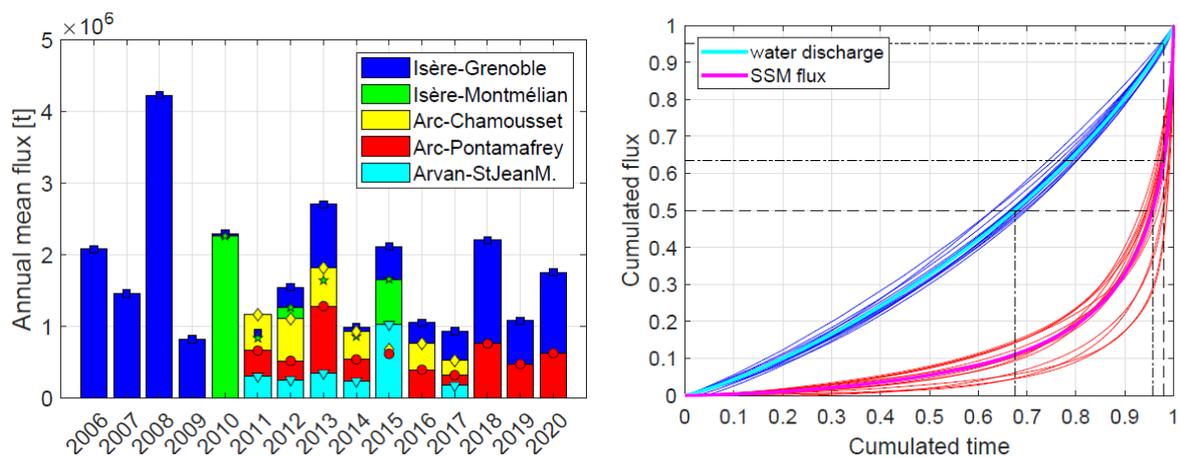


Figure 12: Flux moyens annuels de 2006 à 2020 pour les 5 principales stations hydro-sédimentaires du site Arc-Isère (a) et courbes flux-fréquence pour les débits et flux en MES sur la station Isère à Grenoble-campus (b).

2.2.3 Incertitude sur les flux de MES

2.2.3.1 Stage de Paul Jouzeau

Contexte : L'incertitude des mesures de flux de MES est importante à considérer pour toutes les utilisations qui en sont faites, notamment les calculs de bilans sédimentaires et les simulations numériques hydro-sédimentaires dont elles constituent des conditions à la limite et des données de vérification et de validation. Les concentrations de MES actuellement calculées sur les cours d'eau sont principalement issues de la conversion de données de turbidité à l'aide de relations de calibration établies à partir d'échantillons (le plus souvent pompés à l'aide de préleveurs automatiques).

Il n'existe pas encore de cadre classique voire normalisé pour l'analyse des incertitudes sur les flux de MES mesurés par turbidimétrie, mais on peut citer l'approche méthodologique proposée par [Navratil et al. \(2011\)](#), qui identifie les principales sources d'incertitude ainsi : performance du turbidimètre, fréquence de la série temporelle (hauteur d'eau, turbidité), intégration des fluctuations de turbidité, représentativité du point de mesure (homogénéité de la suspension dans la section de cours d'eau), données invalides, méthode d'échantillonnage, analyse des échantillons au laboratoire, étalonnage du turbidimètre en concentration de MES, calcul du débit (courbe de tarage).

Cette classification peut se comparer à celle proposée par [Launay \(2014\)](#) dans sa thèse sur les flux de contaminants particuliers (cf. Figure 13). Cette approche distingue les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires, ce qui est important pour des séries temporelles comme les chroniques de flux de MES. En effet, les erreurs systématiques (ou biais) ne se réduiront pas dans les moyennes ou bilans sédimentaires, et sont susceptibles de fausser les résultats des modèles ou leur paramétrage. Pour calculer l'incertitude d'un débit établi à partir d'une courbe de tarage hauteur-débit, plusieurs méthodes opérationnelles sont déjà disponibles, en particulier GesDyn ([Morlot et al., 2014](#)) et BaRatin ([Le Coz et al., 2014](#)). La quantification de certaines composantes d'incertitudes sur la concentration moyenne en MES est beaucoup plus problématique, en particulier en présence de particules plus grossières, comme les sables.

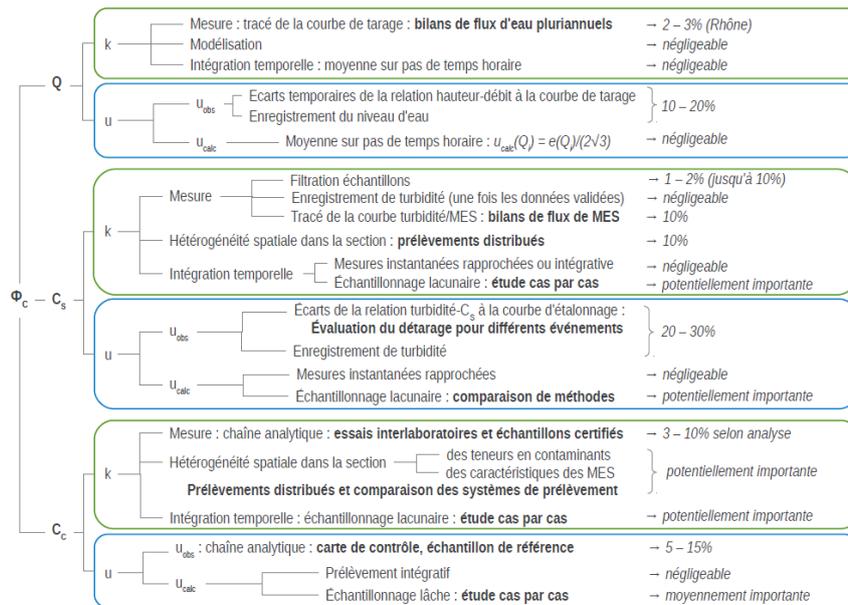


Figure 13 : Arbre des erreurs associées au calcul de flux de contaminants particuliers (tiré de Launay, 2014). Vert : effets systématiques (k). Bleu : effets aléatoires (u). En gras : méthode d'estimation employée dans la thèse. En italique : valeur typique issue de la littérature

Les relations turbidité-MES peuvent être stables (univoques) dans certains contextes mais elles peuvent souvent varier, en particulier quand la granulométrie des particules varie (Foster et al. 1992, Pfannkuche et Schmidt 2003, Thollet et al. 2013).

Objectif : Le stage de Paul Jouzeau (2020) a eu pour objectif d'étudier et évaluer l'incertitude associée au détarage des relations turbidité-MES, c'est-à-dire aux changements temporaires (hystérésis) ou permanents (épisodiques, saisonniers) de la réponse turbidimétrique pour une même concentration massique en MES.

Résultats : Le riche jeu de données de la station de l'Arc à Pontmafrey (échantillons, chroniques pluriannuelles) et les détarages fréquents ont amené à la choisir comme cas d'étude privilégié. Le principal enseignement de cette étude est que le coefficient MES/Turbidité varie surtout en fonction du type d'événement hydro-sédimentaire (pluie homogène, orages d'été, chasses d'hydrocurage) et de la saison (cf. Tableau 1). Il est probable que ces détarages s'expliquent par des différences de granulométrie dues à des sources sédimentaires différentes (érosion de sous-bassins versants différents, fusion nivale, reprise sédimentaire dans différents secteurs du réseau hydrographique). L'incertitude correspondante sur la concentration en MES varie typiquement de 20 à 60 % si l'on se contente d'appliquer un coefficient MES/turbidité constant sur toute la série de mesure. Il s'agit d'une erreur systématique à l'échelle d'un événement ou d'une saison (pour la même courbe d'étalonnage turbidité-MES), mais d'une erreur qui devient aléatoire sur le plus long-terme, quand plusieurs périodes sont incluses dans un bilan sédimentaire, par exemple, à condition de mettre à jour régulièrement la courbe d'étalonnage. Il est donc fortement recommandé de vérifier la relation turbidité-MES avec des prélèvements réalisés à chaque événement hydro-sédimentaire d'intérêt, idéalement avec un échantillonneur automatique asservi à la turbidité ou au niveau d'eau.

Période	Moyenne MES/turbidité	σ (Ecart type)	Borne minimale	Borne maximale	Coefficient de variation	2σ
Printemps	0.97	0.18	0.80	1.10	16 %	0.36
Chasse	1.32	0.29	1.03	1.61	22 %	0.58
Eté	1.00	0.20	0.80	1.20	20 %	0.40
Hiver	0.96	0.10	0.86	1.06	11 %	0.20

Tableau 1 : Coefficients MES/turbidité de la station de l'Arc à Pontmafrey et leurs principales statistiques (Jouzeau, 2020)

2.2.3.2 Thèse de [Jessica Laible \(2020-2023\)](#) et stage d'[Alexis Pavaux \(2022\)](#).

Contexte : Les méthodes de détermination des concentrations en MES dans les échantillons au laboratoire sont elles-mêmes incertaines, et elles ne font pas toutes la distinction entre les sables et les particules les plus fines. Cela pose des problèmes de représentativité des échantillons ([Dramais et al. 2018](#)) et entraîne des erreurs de concentration et donc de flux ([Glysson et al. 2002](#)). Pour établir des relations turbidité/MES à des fins de mesure de flux, il semble donc important de séparer les deux populations sédimentaires (sables et fines) par tamisage à 63 µm. Cette préconisation est confirmée par les derniers travaux sur la mesure de la distribution granulométrique des particules dans les échantillons présentant des distributions bimodales avec du sable ([Laible et al. 2022, soumis](#)). En effet, la mesure de la distribution granulométrique des échantillons par les granulomètres laser est aussi affectée par les mélanges et il est préconisé d'analyser séparément les deux phases (fines et sables).

Si la concentration en MES fine est considérée comme homogène dans la section, la caractérisation de la distribution sableuse présente plusieurs difficultés liées à son hétérogénéité spatiale et temporelle. Une autre difficulté est aussi le coût important et les moyens lourds nécessaires pour les campagnes de mesure de prélèvement et d'analyse. En effet de nombreuses techniques de prélèvement existent pour échantillonner les sédiments en suspension ([Dramais et al., 2022](#)) mais les préleveurs sont souvent lourds et nécessitent des infrastructures de levage (téléphériques, camion grue, treuils mobiles) pour être déployés afin d'explorer une section. Les incertitudes de mesure des flux de fines et de sables ont été évaluées dans plusieurs configurations de déploiement. On trouve dans la littérature des estimations des incertitudes sur les mesures de concentration (cf. Tableau 2).

Type de comparaison / Préleveur	Lieu	Granulométrie ou gamme de concentration	Incertitude type sur la mesure de concentration	Source / Affiliation
Préleveurs isocinétiques	Canal d'étalonnage et canal expérimental	0,45 et 0,06 mm	Composante sur l'erreur de remplissage -16 à 3%	Beverage et Futrell (1986) USGS
Bouteille horizontale	10 stations de mesure en Chine	Non spécifié	± 10%	Long (1989) WMO et Normes Chinoises
Préleveurs ponctuels conformes à la norme ISO 3716	Non spécifié	Non spécifié	13,3%	Annexe A ISO 4363 (2002)
Préleveurs isocinétiques	Workshop du FISP (consensus)	< 10 mg/l	± 10%	Kuhle et Wren (2003) USDA
		10 to < 100 mg/l	± 10%	
		100 to < 1000 mg/l	± 4%	
Bouteille horizontale / P-63 / Collapsible bag sampler	Amazonie	Non spécifié	± 4%	Filizola et Guyot (2004) HyBAm
Intégration sur la profondeur isocinétique	Canal expérimental	Non spécifié	Écart moyen des répétitions 25%	Kuhle et Wren (2005) USDA
Intégration temporelle isocinétique	Canal expérimental	Non spécifié	Écart moyen des répétitions 36%	
Préleveurs isocinétiques P-61, D-77 et D-96	Colorado et affluents	< 0,063 mm	± 10%	Topping et al. (2011) USGS
		> 0,063 mm	± 15% à ± 20%	
Répétitions d'intégrations temporelles isocinétiques avec LISS SL à différentes profondeurs	Fleuve Fraser	Mélange naturel avec sable	± 12% en moyenne	Gitto et al. (2017) S. Fraser Université

Tableau 2 : Synthèse bibliographique d'évaluations des incertitudes sur les concentrations issues de prélèvements dans la section (Tableau reproduit de [Dramais, 2020](#)).

Résultats : Plusieurs comparaisons de préleveurs ont également été effectuées lors d'évènements variés sur l'Isère dans le cadre de la thèse de [Jessica Laible \(2020-2023\)](#) et du stage d'[Alexis Pavaux \(2022\)](#). Les incertitudes déterminées dans le cadre de ces travaux sont de 30% pour un préleveur US-P6 à 35% pour le préleveur intégratif Nilsson pour la détermination de la concentration en sable dans la section. La méthode d'évaluation des incertitudes a été adaptée de la norme ISO 4363 (ISO, 2002)

et met en évidence la prédominance des fluctuations naturelles de la concentration en sable sur l'Isère durant les comparaisons qui ont été effectuées (cf. Figure 14). Les incertitudes déterminées d'après la norme sont assez défavorables du fait des conditions de mesure (instabilité de la concentration notamment). Ces travaux seront à étoffer dans des conditions de mesure mieux contrôlées.

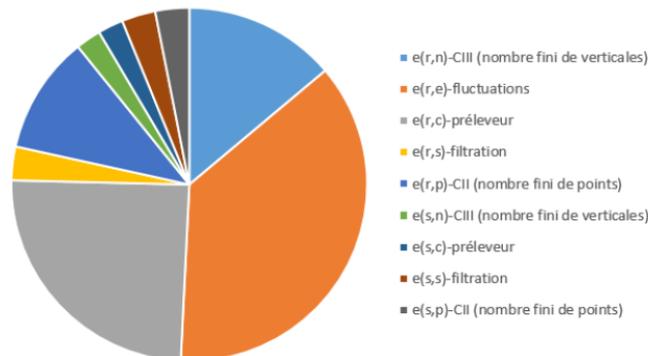


Figure 14 : Répartition des différentes sources d'erreur dans le cas d'une campagne d'essais sur l'Isère à Grenoble avec le préleveur US-P6 (Stage A. Pavaux, 2002)

2.2.4 Mesures de la charge sableuse en suspension

Objectifs : Dans le cadre du projet DEAR, nous nous sommes focalisés sur la possibilité de mesure de la suspension sableuse dans le cas d'une rivière alpine non navigable.

Contexte : Classiquement, le jaugeage solide est réalisé à l'aide de préleveurs isocinétiques permettant une mesure non biaisée de la concentration (ou du flux) car le remplissage de l'échantillon est réalisé avec une vitesse égale à celle de l'écoulement. Nous avons principalement utilisé la bouteille de Delft lors de ce projet ainsi que les préleveurs US-P61 et US-P6 plus récemment dans le cadre de la thèse de [Jessica Laible \(2020-2023\)](#). Comme la suspension de sable présente de forts gradients verticaux et horizontaux, un protocole de mesure est nécessaire pour explorer la section de mesure et exploiter les données ([Dramais et al., 2019](#)). Une telle expérimentation peut se faire depuis un pont ou une traille de mesure (comme à la station Grenoble-campus) mais reste difficile à mettre en œuvre et n'est pas sans danger (en période de crue). Aussi, il est nécessaire de réaliser plusieurs mesures sur une verticale pour évaluer le gradient de concentration et idéalement plusieurs verticales pour estimer un flux de sable ; au final, un jaugeage solide peut durer plusieurs heures, ce qui n'est pas nécessairement compatible avec la durée de l'événement.

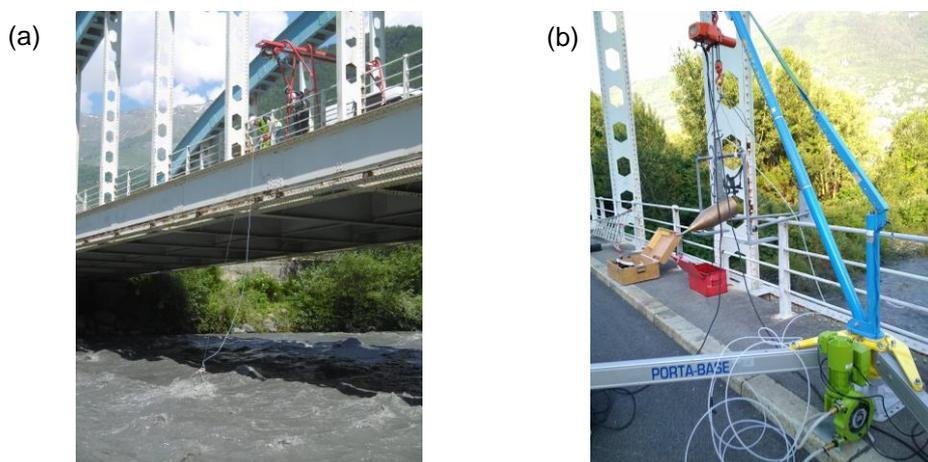


Figure 15: Photo du déploiement de la bouteille de Delft et pompe péristaltique au pont de St-Etienne-de-Cuines lors des chasses de barrages de l'Arc en juin 2019 (a) et juin 2020 (b) (photos Camenen)

Résultats :

Dans le cadre de la thèse de [Jessica Laible \(2020-2023\)](#), nous nous focalisons tout d'abord sur l'optimisation du jaugeage solide avec divers préleveurs iso-cinétique (US-P61, US-6, Bouteille de Delft) mais surtout sur la potentielle utilisation de la mesure acoustique (HADCP) afin d'établir une chronique continue des flux de sable en suspension et de leur granulométrie ([Laible et al., 2022](#)) sur la base d'une méthode proposée par [Topping & Wright \(2016\)](#) et validée sur le Colorado.

Un second défi est de pouvoir réaliser des prélèvements permettant de décrire la variabilité spatiale (sur une section de mesure) des concentrations en sable en un temps limité. C'est pourquoi, dans le cadre du projet ANR DEAR, nous avons cherché à développer une mesure par pompage permettant de multiplier les échantillons sans avoir la contrainte de manipulation du préleveur pour récupérer l'échantillon. Des premiers essais réalisés avec des préleveurs de type ISCO en 2017 sur un chenal secondaire ([Camenen et al., 2017 ; 2018b](#)), puis en 2018 depuis le pont de Grésy ([Camenen et al., 2018a](#)). Les limites liées à leur puissance de pompage (problématique en cas de hauteur de charge de plusieurs mètres) et surtout liées à l'impossibilité de maîtriser la vitesse de pompage nous ont poussé à tester une pompe péristaltique plus puissante et avec variateur. Nous avons choisi une pompe péristaltique Albin Pump ALP17 (Figure 15). Une étude plus poussée sur le terrain et en laboratoire a cependant montré que la pompe péristaltique restait limitée à des vitesses d'écoulement inférieures à 2 m/s (Figure 16), ce qui est souvent insuffisant sur l'Arc ou l'Isère ([De Angelis, 2019 ; Deville-Cavellin, 2020 ; Camenen et al., 2021, 2022](#)). Des pompes immergées ont été aussi testées (collaboration entre INRAE Grenoble et EDF-DTG) et semblent être plus adaptées si la pale n'est pas trop fragile ([Recking et al., 2020](#)). Il est à noter que ce dispositif nécessite une évaluation préalable de la vitesse de l'écoulement pour adapter le variateur de la pompe. Il est préférable de pomper avec une vitesse supérieure ou égale à celle de l'écoulement pour limiter les incertitudes ; en effet, les erreurs peuvent être très vite élevées en cas de prélèvement en sous-vitesse.

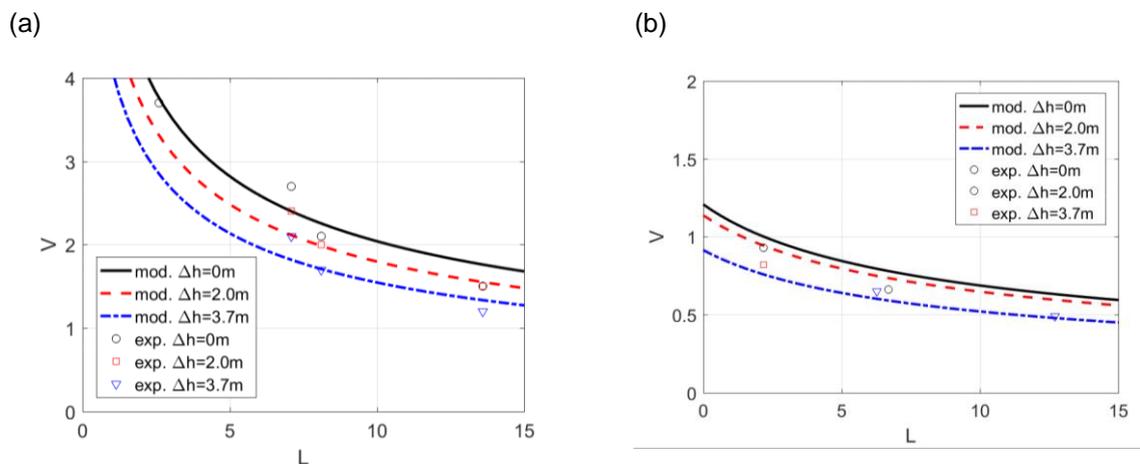


Figure 16 : Vitesse de pompage en fonction de la longueur de tuyau et de la hauteur de charge : (a) pompe péristaltique Albin Pump ALP17 ; (b) ISCO 3700.

Ces mesures appliquées sur quelques événements ont permis d'évaluer les flux de sable en comparaison avec les flux de MES (estimés par les stations hydro-sédimentaire, en excluant les sables), cf. [Camenen et al., 2018, 2019, et 2020](#) pour les détails. Le Tableau 3 synthétise ces résultats. Il apparaît que les flux de sables sont du même ordre de grandeur (bien qu'un peu plus faible) que les flux de MES (sables exclus) lors des événements de chasse. En dehors de ces événements, du fait que les vannes de barrages sont fermées, les flux deviennent résiduels mais peuvent rester importants car il existe un stock important dans le lit de la rivière.

Site	Evènement	Dates	Flux de sable en suspension (tonnes)	Flux MES (tonnes)
Isère à Pont-de-Grésy	Chasse d'Aigueblanche	06/05/2018-10/05/2018	9.4×10^4	1.6×10^4
Isère à Pont-de-Grésy	Printemps 2018	01/04/2018-15/06/2018	6.3×10^5	3.4×10^4
Chenal secondaire Fréterive	Chasse d'Aigueblanche	06/05/2018-10/05/2018	50	–
Chenal secondaire Fréterive	Printemps 2018	01/04/2018-15/06/2018	200	–
Chenal secondaire Fréterive	Printemps 2019	01/01/2019-30/06/2019	660	–
Arc à St-Etienne de Cuines	Chasse de l'Arc	18/06/2019	1.9×10^4	2.7×10^4
Chenal secondaire Fréterive	Printemps 2020	01/01/2020-30/06/2020	5300	–
Arc à St-Etienne de Cuines	Chasse de l'Arc	23/06/2020	5.6×10^3	1.6×10^4

Tableau 3 : Tableau de synthèse des mesures de flux de sable.

Des mesures ont aussi pu être réalisées sur le chenal secondaire du banc de Fréterive sur l'Isère en Combe de Savoie. Les mesures ont été obtenues à l'aide d'une structure développée dans le cadre du projet et permettant de réaliser des pompages à 3 hauteurs (10, 20 et 50 cm au-dessus du fond). En combinant les mesures à un modèle de transport solide, il a ainsi été estimé que plusieurs dizaines de tonnes de sable (diamètre d'environ 0.1 mm) ont pu transiter en suspension lors de la chasse d'Aigueblanche (6 au 10 mai 2018), soit plusieurs centaines de tonnes sur la période printanière ; une extrapolation au charriage donne des valeurs encore plus élevée (quelques centaines de tonnes pour la chasse) mais très incertaines car non calées par de la mesure. Ces résultats ont été confirmés sur la période printanière de 2019, voir bien plus élevés en 2020 (Tableau 3).

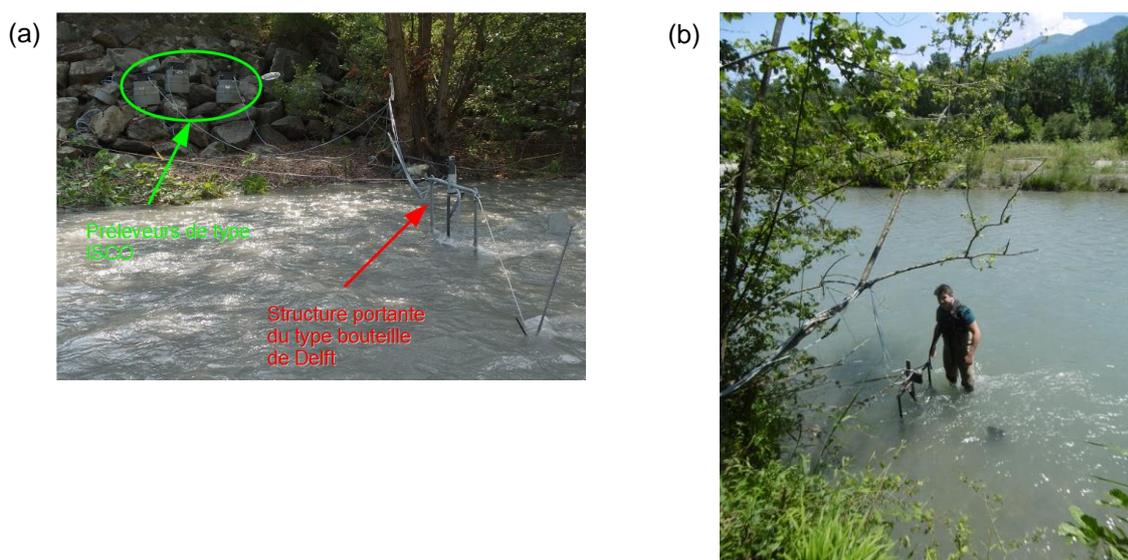


Figure 17: Photo du déploiement de la structure pour les prélèvements par pompage sur l'Arc (Ste-Marie-de-Cuines) en juin 2017 (a) et sur l'Isère (chenal secondaire du banc de Fréterive) en juin 2020 (b) (photos Camenen)

2.3 L'INTERACTION FINS-GRAVIERS SUR LES BANCS

2.3.1 Echanges avec la matrice graveleuse, dynamique des bancs de galets

Thèse [Shashank Gupta](#) en préparation

Objectifs : Nous avons mis au point un protocole permettant de générer, dans un canal de laboratoire, des bancs alternés avec un forçage amont en présence de sédiments grossiers seuls. Cette expérience menée pour plusieurs débits a d'abord mis en évidence l'influence du débit sur la formation des bancs avec une superposition de bancs forcés et de bancs libres à l'aval du canal.

Une fois ce protocole défini, l'objectif à proprement dit de la thèse était d'étudier l'effet des sédiments fins en suspension sur la formation des bancs et identifier notamment les zones de dépôt et d'érosion. Il s'agissait également de quantifier l'effet d'une crue sur les bancs avec et sans sédiments fins.

Résultats : Alors que la forme des bancs est très bien reproduite d'une expérience à l'autre en présence de graviers seuls, l'introduction de sédiments fins semble perturber la stabilité du système et les géométries de bancs obtenues lors des différentes expériences similaires diffèrent. Des bancs libres peuvent apparaître et l'obtention d'un état stable est plus longue ([Gupta et al., 2022](#)).

Une crue sans introduction de sédiments fins génère un aplatissement des bancs sous le pic de crue puis leur reformation lors de la décrue (mécanismes tels que décrit par [Bridge, 2000](#)). Nous avons ensuite étudié l'évolution du système de bancs alternés sous une crue avec et sans sédiments en suspension. Il semblerait que la présence de sédiments fins en suspension ait une influence bien moindre que la modification de l'alimentation en sédiments grossiers (3 cas étudiés : absence d'alimentation en sédiments grossiers, apport constant ou apport variable qui suit la capacité de transport sous l'hydrogramme). Par ailleurs, une modification, même relativement mineure, du forçage amont est bien plus impactante que le colmatage, même complet, du lit avant l'hydrogramme.

2.3.2 Transfert et dépôt des sédiments en suspension sur les plaines d'inondation

Stage de [Lorenzo Boisson](#) mars-août 2021

Les transferts et dépôts de sédiments en suspension sur les plaines d'inondation ont été explorés dans ce projet via des expérimentations en laboratoire, durant le stage de [Lorenzo Boisson](#) ([Boisson 2022](#)). Ces expériences se sont déroulées dans le canal large du HHLab. Le canal était réduit à une largeur de 1.8m avec l'installation d'une banquette de 1m en rive gauche pour simuler une plaine d'inondation (Figure 18). Alors que le fond du lit mineur était lisse (paroi de verre), la plaine d'inondation était recouverte d'une fausse prairie afin de simuler la rugosité plus importante des plaines inondables. Dans cette géométrie, nous avons introduit dans le lit mineur deux débits d'eau claire conduisant au débordement et étudié l'écoulement à l'aval dans le canal. Nous avons répété ces mêmes expériences avec des sédiments fins en suspension, observé les dépôts et caractérisé à nouveau l'écoulement. L'objectif était d'étudier la dynamique du transfert et des dépôts des sédiments du lit vers la plaine d'inondation ainsi que les effets rétroactifs sur l'écoulement.

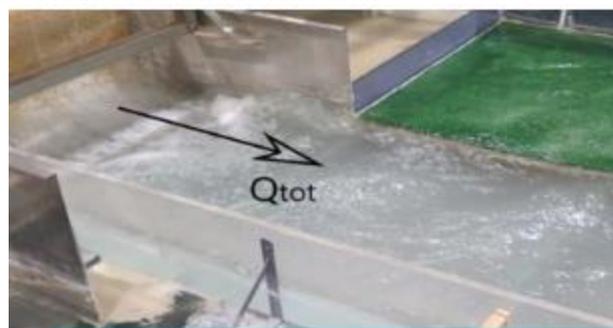


Figure 18 Injection de l'écoulement dans le lit mineur en amont du canal. Le lit mineur est au centre de l'image, la plaine d'inondation en vert sur le haut de l'image.

La géométrie choisie et le choix d'une injection en lit mineur seulement a imposé de forts courants latéraux, depuis le lit mineur vers la plaine d'inondation. L'intensité et la localisation de ces courants dépend du débit injecté et nous avons obtenu 2 typologies d'écoulement différentes pour chacun des deux débits. Les transferts latéraux et les niveaux de turbulence à l'interface entre lit mineur et lit majeur sont représentés Figure 19. Alors que les transferts par l'écoulement moyen se font essentiellement en amont pour le débit le plus faible (en violet), ils s'étalent tout au long du canal pour le débit le plus fort (bleu). Les niveaux de turbulence diffèrent également, la turbulence à l'interface étant plus faible lorsque la couche de mélange est poussée sur le lit majeur.

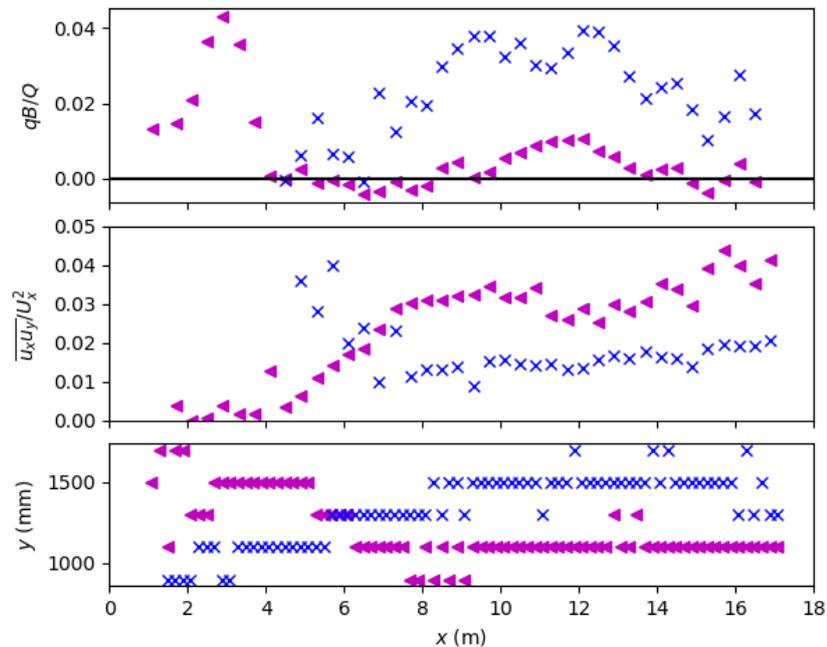


Figure 19 Typologie de deux écoulements débordants en eau claire à l'interface mineur/majeur (débit total en amont de 80 L/s en violet, 105 L/s en bleu) et dépôts associés. En haut, débit latéral à travers l'interface par unité de longueur du canal adimensionné par le débit injecté en amont par unité de largeur. Au centre, transferts turbulents adimensionnés par le carré de la composante longitudinale de la vitesse et en bas, position latérale du sommet des dépôts sur la plaine d'inondation ($y = 800\text{mm}$ étant la position de l'interface mineur majeur).

Ces expériences ont été ensuite reproduites en injectant à l'amont dans le lit mineur des sédiments fins en suspension. Des dépôts se sont formés sur le lit majeur. Les vitesses importantes dans le lit mineur ne permettaient pas le dépôt. Pour chacun des deux débits, après une durée d'expérience correspondant à l'introduction d'une certaine masse de sédiments fins identique pour chacune des deux expériences, nous avons relevé la position latérale du sommet des dépôts sur la plaine. Elle est présentée Figure 19. Celle-ci reflète la compétition entre deux processus qui gouvernent la forme des dépôts. L'advection (à l'amont pour le débit faible, sur la partie aval pour le débit plus fort) associée à des transferts latéraux importants, conduit à des dépôts pénétrant loin sur la plaine d'inondation. La diffusion liée au développement de la couche de mélange et des structures cohérentes associées (Tourbillons de Kelvin-Helmholtz notamment) induit des bourrelets plus proches de la berge (visibles en aval pour le débit faible). Les dépôts étaient plus importants pour le plus fort débit, indiquant que l'advection est vraisemblablement plus efficace que la diffusion pour le transfert de sédiments vers la plaine d'inondation.

Ces résultats sont en cohérence avec les travaux disponibles dans la bibliographie (voir la revue de Branß et al., 2022). Nous avons souhaité aller plus loin en quantifiant la rétroaction de ces dépôts sur l'écoulement. Les dépôts de sédiments induisent une diminution notable des niveaux de turbulence à

l'interface, ainsi que le confinement à l'amont des transferts du lit mineur vers le lit majeur. La prise en compte de ces interactions complexifie la modélisation des dépôts.

2.4 CARACTERISER ET SUIVRE L'EVOLUTION DES BANCs

2.4.1 Caractériser la morphodynamique à l'échelle du tronçon

Post-doc Marianne Laslier

Objectifs : Les objectifs du travail sont triples. D'une part, il s'agit d'extraire automatiquement à l'aide de données LiDAR (MNT principalement) et d'orthophotographies aériennes l'emprise émergée des bancs de galets présents sur les secteurs de l'Arc et de l'Isère, en 2010 et 2013. Un deuxième objectif cherche à extraire pour ces bancs des caractéristiques en trois dimensions (morphologie, taux de végétalisation). Le troisième objectif consiste à étudier dans le cadre d'une analyse diachronique l'évolution des bancs de galets sur ce secteur.

Méthodologie employée : Deux jeux de données ont été fournis pour réaliser ce travail. Ces jeux de données correspondent à des couples d'acquisition de données LiDAR (MNT à 25 cm de résolution) et de photographies aériennes à deux dates : septembre 2010 et novembre 2013. La méthodologie générale se décompose en trois étapes principales. Premièrement, les bancs sont extraits manuellement et automatiquement à partir des MNT et des orthophotos. L'extraction automatique se base sur l'estimation des volumes émergés au-dessus de la ligne d'eau, et donc sur la normalisation du Modèle Numérique de Terrain par rapport à la ligne d'eau. Cette méthode est décrite plus précisément en Annexe IX (fiche méthodo). L'extraction manuelle permet à la fois de valider les bancs extraits automatiquement et de réaliser les étapes suivantes. Une série de métriques décrivant la morphologie en trois dimensions et la couverture végétale peut être calculée à partir des bancs délimités, d'une carte d'occupation du sol et du MNT normalisé par rapport à la ligne d'eau (tableau 1). Ces métriques sont alors mises en relation via des analyses statistiques avec des paramètres environnementaux liés au cours d'eau, comme la position longitudinale et la pente par exemple. Enfin, une comparaison des résultats obtenus pour l'année 2010 et 2013 doit permettre par analyse diachronique d'estimer la dynamique temporelle des bancs.

Principaux résultats :

Extraction automatique

Les résultats de l'extraction automatique apparaissent peu performants. En effet, pour les deux dates, les forts rappels, autour de 0.8 indiquent une très bonne localisation des bancs avec peu de sous-segmentation, mais les faibles précisions (autour de 0.5) suggèrent une forte sur segmentation des bancs (Figure 20 et Tableau 4).

Année	2010	2013
Précision	0.58	0.46
Rappel	0.86	0.84
Fscore	0.79	0.6

Tableau 4 : Résultats des segmentations automatiques pour l'année 2010 et 2013.

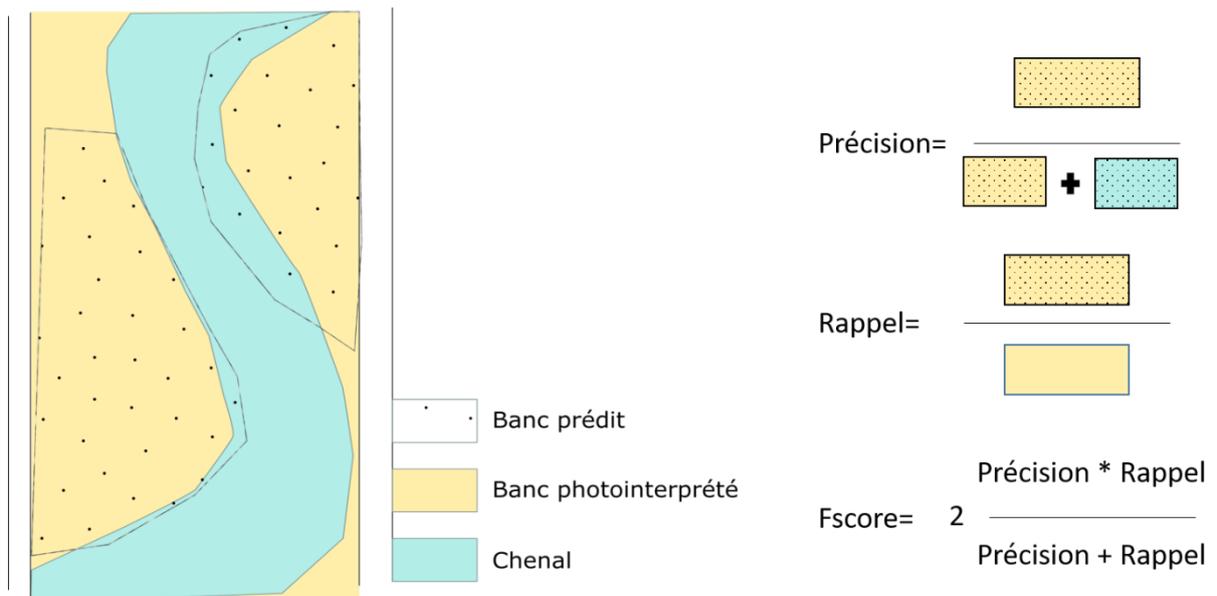


Figure 20: Définitions de la Précision, du rappel et du Fscore en contexte de segmentation automatique des bancs de galets

Caractérisation des bancs

Afin de définir une « typologie » des bancs, une Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) a été réalisée sous R, projetée sur les axes d'une Analyse en Composantes principales (ACP). Pour les deux dates, trois groupes ont été identifiés via la CAH. Les variables les plus discriminantes de ces classes sont assez proches pour les deux dates, ce qui renforce la robustesse de la méthode. Ainsi, on peut distinguer un premier groupe de bancs de petite taille, souvent assez bas et peu végétalisés ; à distinguer d'un groupe de bancs beaucoup plus hauts, grands et végétalisés. Ces catégories semblent assez cohérentes par rapport à la littérature connue sur le sujet. Ces résultats démontrent une typologie vraisemblablement robuste, démontrant un fort lien entre couverture végétale, hauteur et surface du banc. D'autre part, cette classification semble peu impactée par les variables environnementales caractéristiques du cours d'eau (Figure 21). Pour l'année 2013, seules la pente et la largeur maximale du cours d'eau sont significativement différentes selon les classes définies. Ainsi, les bancs de la classe 3, caractérisés par de grandes surfaces et une forte couverture végétale semblent être présents sur des largeurs de cours d'eau plus importantes et sur des pentes plus faibles. Pour l'année 2010, aucune différence significative n'a été observée pour aucune des variables environnementales.

Plus spécifiquement, une analyse de l'effet de la position longitudinale sur les caractéristiques des bancs a pu montrer une très forte augmentation de la couverture végétale en aval du cours d'eau, en réponse à une diminution de la pente (Figure 21). Ces résultats sont cohérents avec la proximité de l'Isère, pour laquelle la problématique de la colonisation végétale a déjà été largement identifiée et étudiée. Des résultats similaires sont obtenus pour l'année 2013.

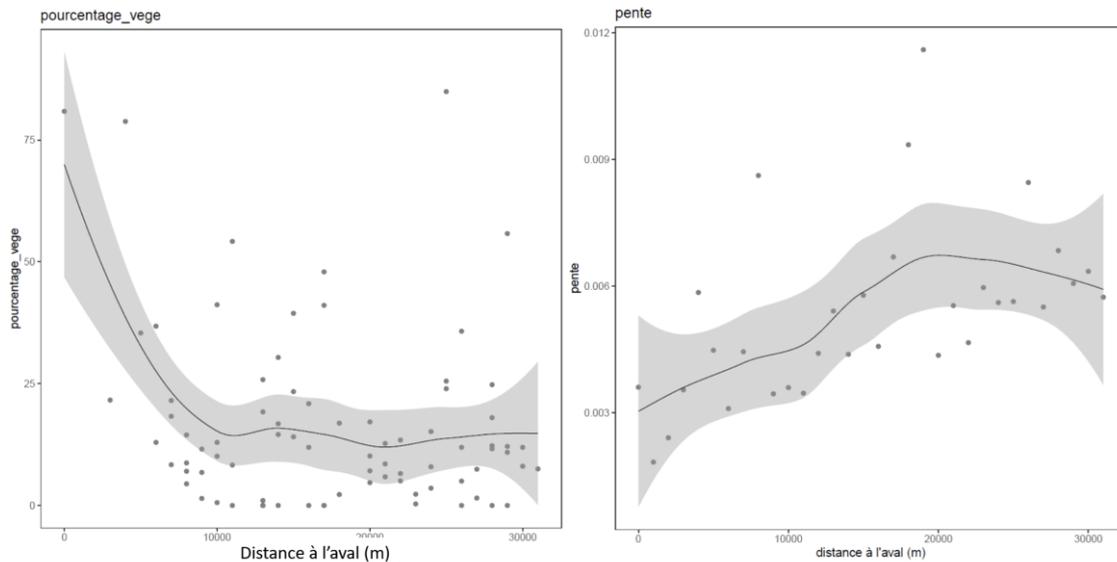


Figure 21 : Évolution de la couverture végétale des bancs (gauche) et de la pente (droite) en fonction de la position longitudinale par rapport à la confluence Arc Isère

Dans une approche diachronique, les variables de pente, sinuosité et les largeurs du cours d'eau semblent ne pas avoir évolué de manière significative (Figure 22). En revanche, on constate une variation de la largeur du chenal principal, avec un élargissement significatif de celui-ci entre 2010 et 2013 (Figure 22). En outre, ces modifications du chenal principal semblent avoir peu d'effets significatifs sur le système « banc », avec toutefois une diminution de la couverture végétale, conjointe à un léger allongement des bancs entre 2010 et 2013. (Figure 23). Cela laisse donc supposer peu d'évolutions du système de bancs à l'échelle du tronçon considéré.

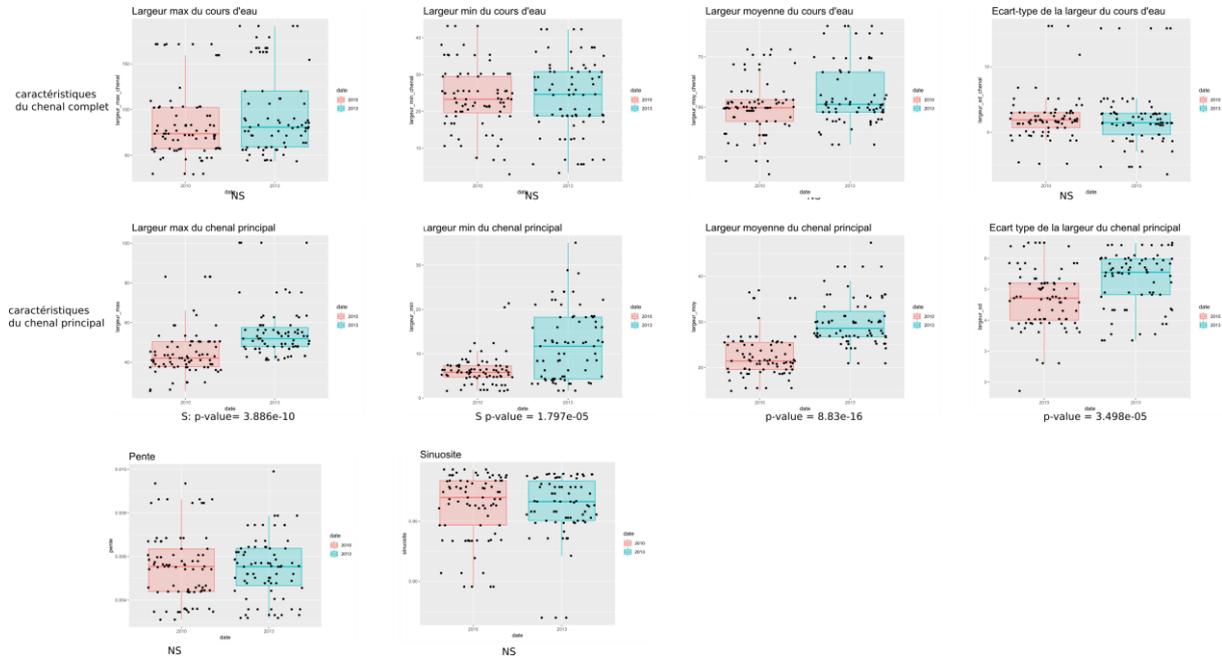


Figure 22 : comparaison des moyennes des paramètres environnementaux entre 2010 (rouge) et 2013 (bleu)

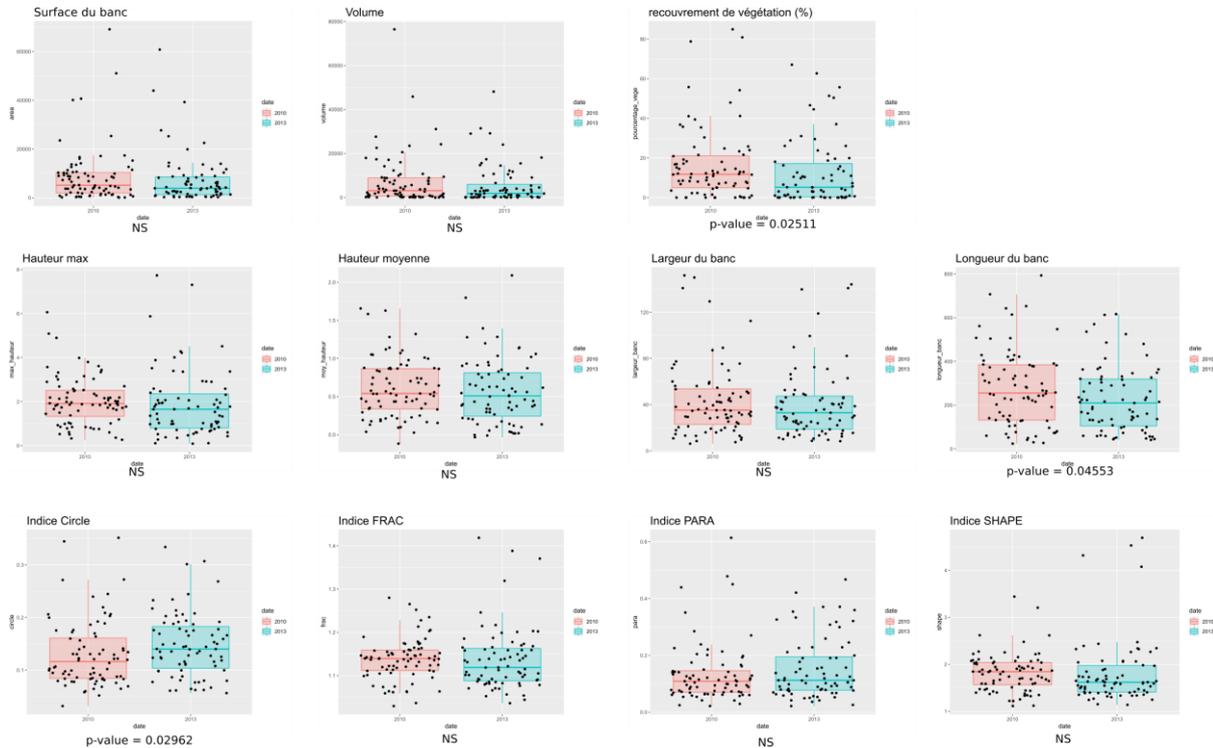


Figure 23 : comparaison de moyennes des paramètres des bancs entre 2010 (rouge) et 2013 (bleu)

Toutefois, localement l'analyse diachronique des Modèles Numériques de Terrain laisse entrevoir des secteurs particulièrement actifs, comme c'est le cas sur l'anse de Randens par exemple (Figure 24). Sur ces secteurs, ces très forts épisodes érosifs sont souvent localisés sur des secteurs relativement hauts et initialement fortement végétalisés (Figure 24).

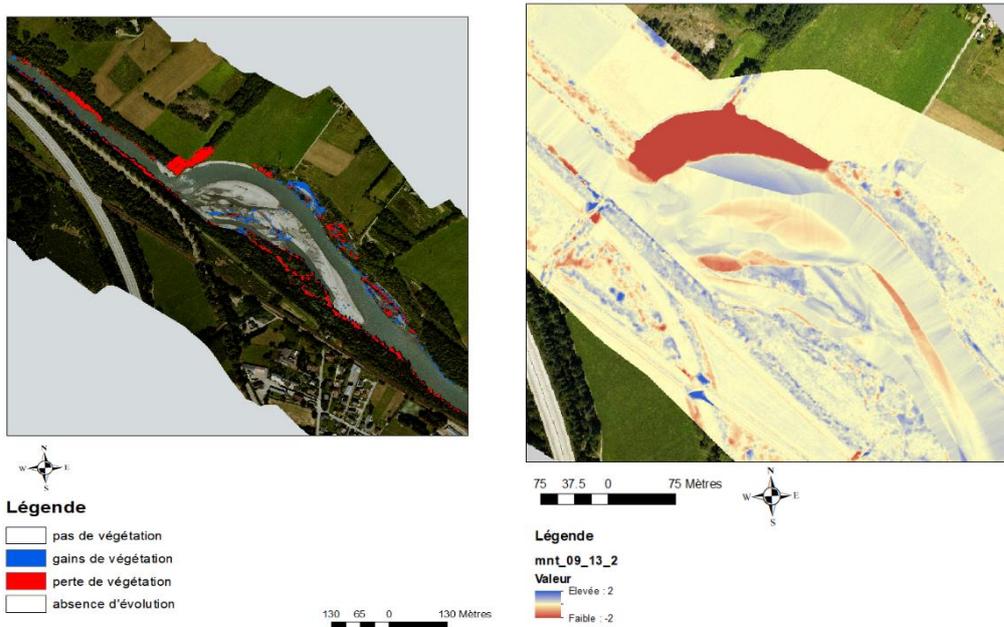


Figure 24 Localisation d'une forte zone d'érosion entre 2010 et 2013 (figure de gauche), sur le secteur de l'anse de Randens, conjointe à une forte perte de couverture végétale (figure de droite).

Conclusion et perspectives

Les résultats de cette étude sont doubles. D'un point de vue méthodologique, ils démontrent l'intérêt de l'utilisation de Modèles Numériques de Terrain issus de données LiDAR pour identifier et caractériser la morphologie des bancs. En revanche, des développements méthodologiques supplémentaires sont nécessaires pour automatiser de manière performante, et dans toutes circonstances, l'extraction des bancs. D'un point de vue thématique, ces résultats montrent un secteur relativement peu dynamique dans sa globalité, malgré quelques secteurs très actifs (ex l'anse de Randens), ainsi qu'un fort lien entre morphologie du banc et couverture végétale. Ils laissent suggérer qu'une gestion appropriée de la couverture végétale pourrait être un levier intéressant dans la gestion sédimentaire du secteur si on considère que la végétation réduit la mobilité du banc. Il faut cependant s'assurer que le système permet une certaine mobilité des bancs non-végétalisés sans reprise conséquente de la végétation pionnière.

2.4.2 Mesurer les surfaces de dépôt par analyse photo

Objectif :

Il s'agit ici d'évaluer la dynamique des dépôts de fines sur un banc de gravier de l'Arc en fonction des conditions hydro-météorologiques.

Méthode :

La méthode utilisée ici se base sur le logiciel DeFI (Dépôts de sédiments Fins par analyse d'Images) présenté en annexe Annexe VIII.

Principaux résultats :

La méthode DeFI a été appliquée sur un jeu de photographies prises à partir d'un appareil photo (piège photographique) positionné en berge (sur un arbre) et visant une portion d'un banc de galets (banc JD Figure 25). La période étudiée va de janvier 2018 à décembre 2019, soit sur deux années complètes et un jeu près de 1000 photos a été sélectionné pour leur homogénéité (prise dans après-midi). Les images orthorectifiées ont une définition de 5 cm par pixel. L'analyse a ensuite été réalisée en utilisant les données hydro-sédimentaires de la station de Pontamafrey (localisée 7 km en amont) et la station hydro-météo de Sainte-Marie-de-Cuines (localisée à 800m en aval du banc). Du fait d'une dynamique assez différente sur le haut de banc (en jaune Figure 25) et sur la zone marginale près des chenaux secondaires (en rouge Figure 25), ces deux zones ont été séparées pour la discussion.

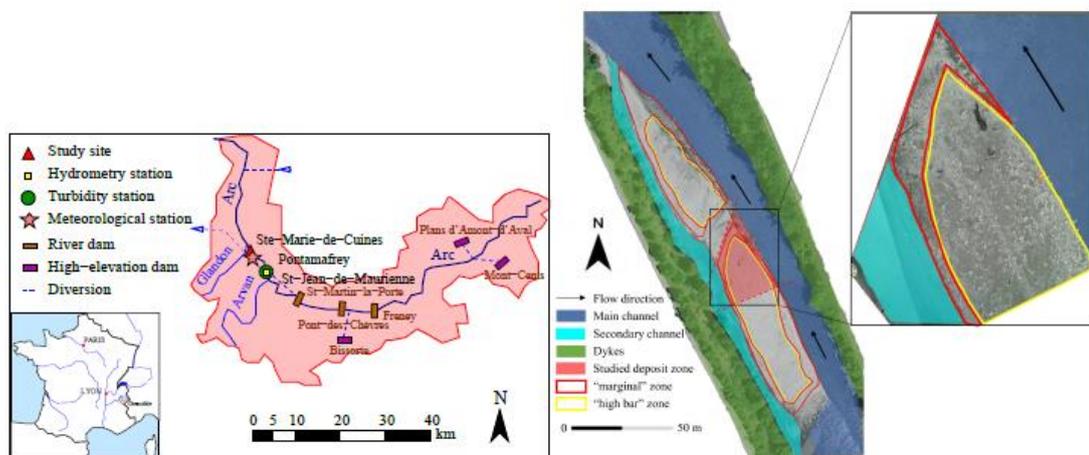


Figure 25 : Positionnement du piège photographique près de Sainte-Marie-de-Cuines et champs observé

La Figure 26 présente l'ensemble des résultats observés sur ces deux années d'étude mettant en valeur une certaine corrélation entre les évolutions des surfaces de dépôts avec la dynamique hydro-météo. Il

est à noter que la surface des dépôts marginaux ne peut être estimée lorsque que le niveau d'eau est trop élevé sur de longues périodes comme la fonte de printemps (et recouvre donc une partie de la surface étudiée).

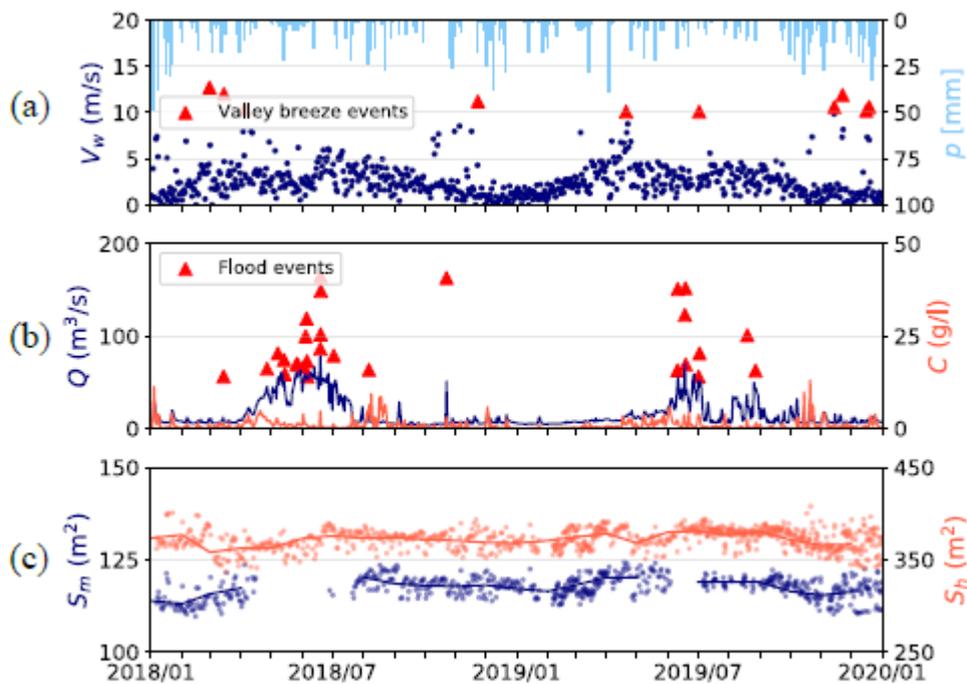


Figure 26 : Pluie journalière et vitesse du vent (a) Débit et concentration dans l'Arc (b) et estimation des surfaces de dépôt marginale et en haut de banc (c) sur la période 2018-2019.

Une analyse plus fine des évolutions des dépôts sur des événements ont permis de voir que les crues suffisamment fortes pour inonder le banc influaient de façon évidente les dépôts (cf. exemple Figure 27a) mais aussi les coups de vent (cf. exemple Figure 27b). L'impact de ces événements se font sur la surface totale des dépôts de fines sur les zones « marginale » et « haut de banc » mais aussi sur la distribution de ces dépôts à l'intérieur de chacune de ces zones. Par la suite, par simplification, nous nous concentrerons sur les surfaces totales uniquement.

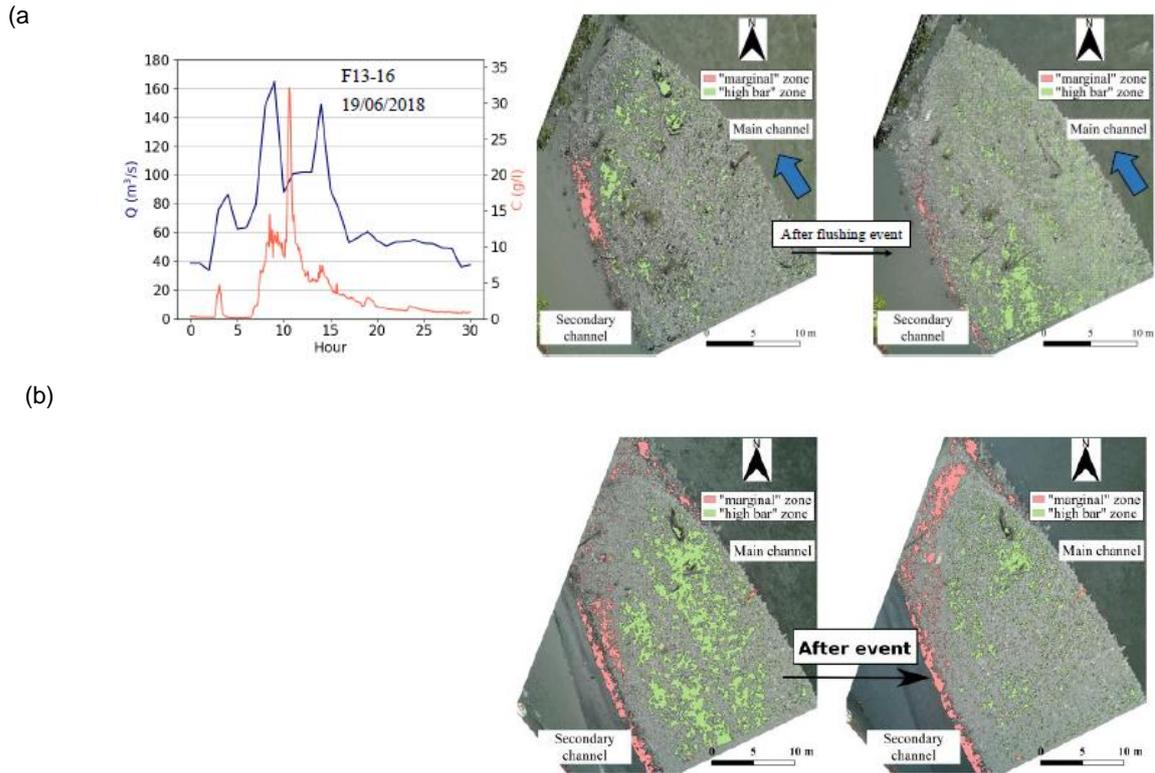


Figure 27 : Distribution des dépôts de sédiments fins extrait de la première classe de l'analyse DeFI (Deng et al., 2023a) suite à un événement de crue (a) et un événement éolien (b).

Une analyse plus fines de ces événements hydro-météorologiques a été proposée à partir de modèles simple (0D) d'érosion et dépôt liés aux écoulements (crue) ou au vent. Pour les écoulements, le modèle se base sur une combinaison des équations de Krone et Partheniades découlant à une simple différence entre la concentration moyenne et une concentration d'équilibre (Guertault et al., 2016) estimée à partir d'une hydrologie simplifiée sur le banc (Deng et al., 2023b). Un terme d'érosion latérale a été rajouté pour simuler l'érosion des dépôts souvent observée lors de la descente de crue. De la même manière, pour l'effet du vent, une formule de transport solide a été appliquée en prenant un soin particulier à l'estimation du seuil d'érosion des dépôts de fines en fonction de l'humidité.

Les résultats sont présentés Figure 28. Même si les résultats restent dispersés, on observe une bonne corrélation entre les observations et les modèles. Quand le banc est totalement submergé par la crue, la zone « haut de banc » présente des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement facilitant les dépôts. Ceci explique que les événements de crue où un fort débit de l'Arc est combiné à des concentrations élevées induisent en général un dépôt net sur le banc. Même si l'érosion latérale peut être importante, elle n'apparaît que si les dépôts sont épais au pic de crue.

A l'inverse, les événements de vent induisent une érosion des dépôts, le transport des fines par le vent tendant à disperser les sédiments jusqu'à la zone marginale voire jusqu'aux chenaux en eaux.

Une analyse sur le long-terme a montré que le cumul de petits événements pouvait aussi avoir un impact sur l'évolution des surfaces de dépôt. Les incertitudes liées à la méthodologie et surtout le potentiel biais liés aux variations saisonnières des ombrages par exemple n'a pas permis de confirmer ces résultats.

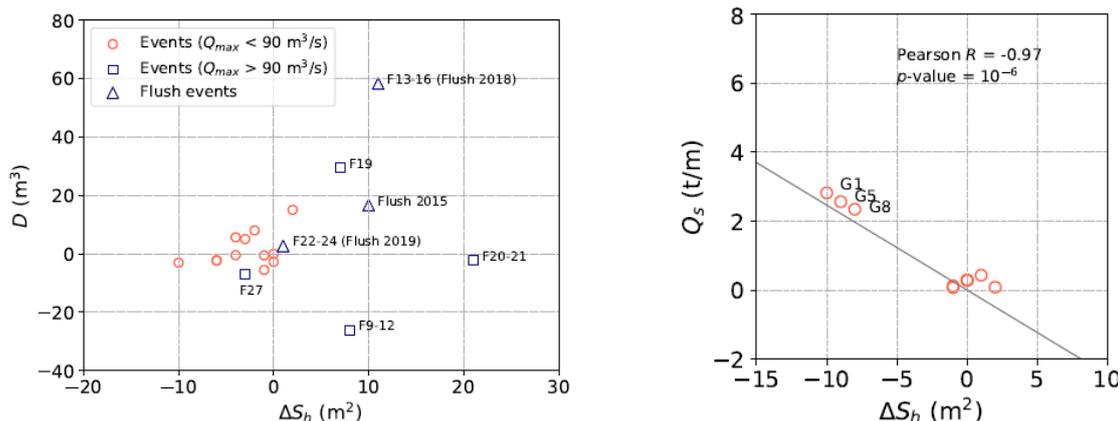


Figure 28 : Comparaison entre les évolutions des surfaces de dépôts observées à l'aide de DeFI avant et après événement avec le volume érodé/déposé issu du calcul simplifié pour une crue (a) ou due la capacité de transport éolien (b)

La méthodologie a aussi été appliquée sur les photos drone sur le tronçon de Sainte-Marie-de-Cuines et en Combe de Savoie. elle a permis de confirmer l'analyse réalisée sur le banc JD. Il a été ainsi évalué que la surface des dépôts de fines atteint 75% de la surface du banc avec des valeurs plus faibles en tête de banc et plus élevées en queue de banc. Ces valeurs a priori élevées peuvent être expliquées du fait que la méthode inclue tous les dépôts, y compris entre galets. Elle mériterait sans doute d'être validée sur d'autres sites afin de confirmer ces résultats. Aussi, une difficulté est apparue avec la présence de la végétation. Si la méthode peut être étendue à l'estimation de la surface couverte par la végétation, il reste difficile d'estimer la surface des dépôts masquée par la végétation.

2.4.3 Caractérisation de la mobilité des graviers sur le banc par placettes peintes et chaines d'érosion

Objectifs :

La question de la mobilité des bancs en Combe de Savoie est assez ancienne. Depuis 2014, EDF a cherché à connaître le débit de mise en mouvement des particules sur les bancs pour estimer à partir de quel débit ils seraient susceptibles d'être mobilisés. Des suivis par parcelles peintes et chaines d'érosion ont donc été mis en œuvre par BURGEAP puis Dynamique Hydro. En parallèle, des suivis ont également été réalisés par l'Université de Grenoble ([Jourdain, 2017](#)).

Ce travail est réalisé par EDF en collaboration étroite avec le bureau d'études Dynamique Hydro.

Méthode :

La méthode de réalisation et de suivi des placette peintes et décrite en détail en Annexe III.

La méthode de chaines d'érosion est décrite en détail en Annexe IV.

Principaux résultats :

Sur l'Isère en amont de l'Arc, l'évaluation du seuil de mobilité des particules est difficile en raison des différences inter-bancs et des travaux effectués sur Fréterive fin 2017. Les résultats montrent, qu'en dessous de $200 m^3/s$, la mobilité des particules sur les bancs est inexistante sur Albertville et faible à Fréterive. Aux alentours de $250 m^3/s$, la mobilité des particules est partielle à Albertville et plus généralisée à Fréterive. Par contre, dans les deux cas, la mobilité des particules concerne exclusivement la surface et les premiers centimètres de la sous-couche.

En aval de la confluence avec l'Arc (2 bancs : Saint-Laurent et Montmélian), les débits sont moins bien évalués depuis la mise hors service de la station de Montmélian. Les suivis montrent cependant que les débits de mise en mouvement et d'érosion de la sous-couche s'opèrent au-delà de 300 voire 400 m^3/s .

Ces éléments montrent qu'il est nécessaire d'avoir des débits très importants (et difficiles à générer) pour mobiliser les galets présents sur les bancs. Lorsque cette mobilisation a lieu pour la gamme de débits observés, elle se cantonne à la surface selon les observations des placettes peintes et chaines

d'érosion. Cependant, ces méthodes ne permettent de caractériser l'érosion de surface et pas le sapement de berge.

Dans le cas de la Combe de Savoie, la mobilité des bancs se fait plus facilement par un processus d'érosion latérale avec un sapement des berges amont des bancs et des dépôts sur la partie aval des bancs (Jourdain, 2017 ; Deng, 2022). C'est ce qui a été observé typiquement sur le banc de Fréterive (Camenen et al., 2019, 2020) avec une mobilité non-négligeable du banc vers l'aval malgré une hydrologie peu favorable (une crue >200 m³/s en 2019, quatre en 2020 dont deux >300 m³/s. Il est à noter cependant que le banc de Fréterive reste le plus dynamique sur le tronçon de la Combe-de-Savoie.

2.4.4 Caractérisation de l'évolution des bancs par analyse d'orthophotos

Objectifs :

L'évolution des bancs sur l'Isère est suivie de près depuis de nombreuses années. Il s'agit de préciser leur évolution dans le temps pour essayer d'optimiser les travaux qui sont réalisés sur le territoire et d'éviter un retour vers une morphologie constituée de bancs longs, hauts et très végétalisés. L'objectif du suivi est d'évaluer leur évolution dynamique entre deux orthophotographies prises à environ un an d'intervalle. Dans cet objectif, l'analyse s'occupe principalement à distinguer les surfaces communes, surfaces érodées et nouvelles zones d'extension (dépôts) de chacun des bancs entre deux clichés. Ce travail est réalisé par EDF en collaboration étroite avec le bureau d'études Dynamique Hydro et sur la base d'orthophotos réalisées par le SISARC.

Méthodes :

L'évaluation des évolutions des surfaces exondées entre 2 prises de vues est réalisée en deux temps :

- Dans un 1er temps, comparaison automatique (traitement SIG) des surfaces exondées sur la prise de vue initiale et la prise de vue finale de chaque période, qui aboutit à 3 types de surfaces exondées :
 - les surfaces communes, exondées sur les 2 prises de vues,
 - les surfaces disparues, exondées seulement sur la 1ère prise de vue (elles ont pu être érodées ou simplement noyées si le débit était plus élevé lors de la 2ème prise de vue),
 - les surfaces apparues, exondées seulement sur la 2ème prise de vue (il peut s'agir de dépôt récents ou de l'influence d'une ligne d'eau plus basse lors de la 2ème prise de vue).
- Dans un 2ème temps, correction experte de ce traitement automatique visant à minimiser les erreurs ou incertitudes. Il s'agit de préciser si les différences constatées entre les 2 dates relèvent bien d'une évolution morphologique (dépôt ou érosion de la surface exondée) ou si elles résultent de la différence de niveau d'eau, voire d'une imprécision mineure des tracés (ex. : décalage spatial des prises de vue). Cette seconde phase peut conduire à simplement corriger le type d'évolution constatée ou à redécouper les polygones issus du traitement automatique jusqu'en 3 parties. Par exemple, lorsque la 2ème prise de vue correspond à une ligne d'eau plus élevée que sur la 1ère, le doute porte essentiellement sur les surfaces exondées qui ont disparues. On cherche alors, dans la mesure du possible, à identifier pour chacun de ces polygones :
 - une partie qui n'a en fait pas évolué (notamment lorsque la végétation initiale est toujours en place) = « aucune évolution » ;
 - une partie qui a bien été érodée (notamment lorsqu'on constate un recul évident d'un talus) = « érosion avérée » ;
 - la partie restante qui reste incertaine = « érosion incertaine ».

Les résultats peuvent ensuite être quantifiés et cartographiés puis interprétés en fonction du débit et du volume observés dans la rivière.

Principaux résultats :

Sur la période 2020-2021, les résultats montrent que près de 90% des surfaces initiales n'ont pas évoluées. Le milieu semble donc être resté figé. Seules 10.2% (+/-0.3%) des surfaces ont été érodées ce qui est faible en termes d'évolution attendu des milieux.

	Répartition en pourcentage des surfaces initialement exondées
Aucune évolution	89,5%
Erosions avérées	9,8%
Erosions incertaines	0,7%
Erosion +/- incertitudes	10,2% (+/- 0,3%)
Surfaces initialement exondées (total)	100%
Dépôts avérés (rapport à surface exondée initiale)	+18%
Dépôts incertains (rapport à surface exondée initiale)	+16%
Dépôts +/- incertitudes	26% (+/- 8%)

Tableau 5 : Evolution des surfaces initialement exondées entre juin 2020 et juillet 2021. Les dépôts/érosions +/- incertitudes sont calculés en prenant en compte les variations minimales et maximales possibles des dépôts et érosions et de la variabilité autour de cet écart

Dans la pratique, il y a eu beaucoup d'évolutions en plan. Ces évolutions sont une nouvelle fois liées à des phénomènes de dépôts importants. Ils représentent à minima 18% de la surface initialement exondée et environ 26% (+/- 8%) si l'on prend en compte les surfaces incertaines.

Ces phénomènes de dépôts sont environ 2 à 3 fois plus importants que les érosions.

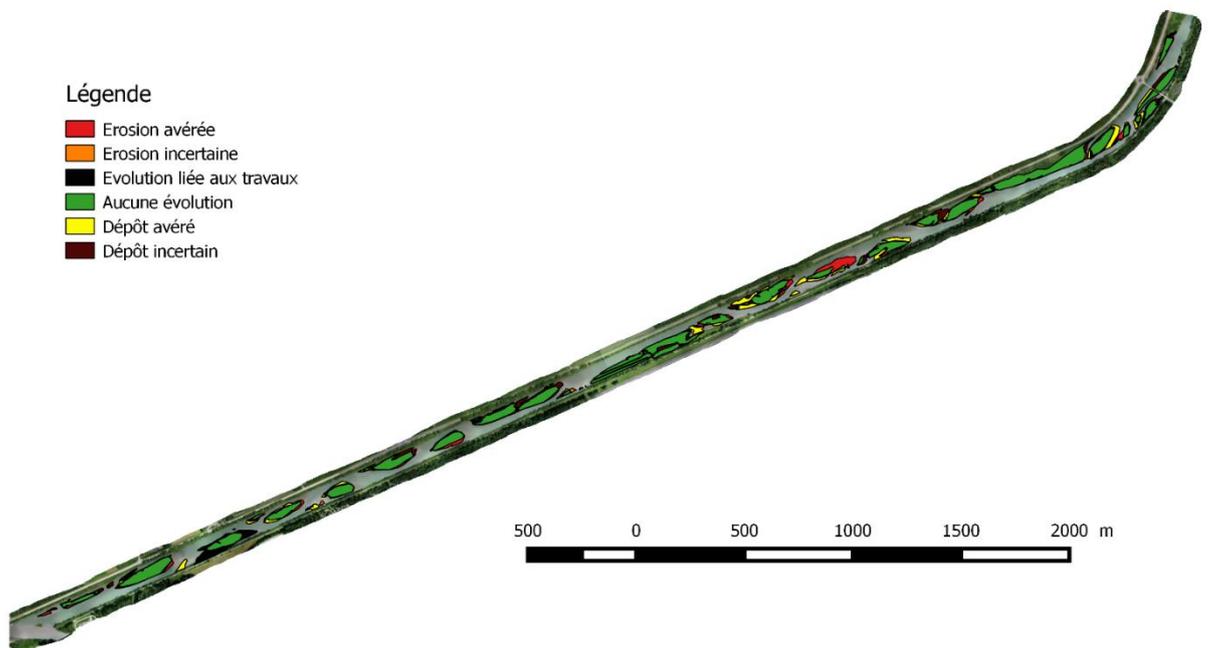


Figure 29 : Evolution des bancs sur le tronçon restauré (Pont de Grésy-sur-Isère à la confluence avec l'Arc) par le Sisarc entre le 16 juin 2020 et le 2 juillet 2021 (orthophoto SISARC 2021)

En valeur absolue (m²), il y a eu 2 fois plus d'érosion sur les 3 km amont que sur les 3 km aval et 2 à 4 fois plus de dépôts. En valeur relative (%), il y a eu un petit peu plus d'érosion en amont qu'en aval et 1.5 à 2 fois plus de dépôts.

Compte tenu de la série hydrologique au cours de l'année écoulée, il apparaît que les débits inférieurs à 250 m³/s pendant des durées de 4 à 6 jours :

- N'engendrent pas de phénomènes d'érosion significatifs à l'échelle du tronçon,
- Sont susceptibles, avec quelques pointes de débit, de créer des dépôts significatifs sur le tronçon.

Depuis le début des suivis, les ordres de grandeur de l'évolution des bancs correspondent à peu près à celles observées pendant la saison hydrologique présentée ici. Les taux de renouvellement des bancs sont donc assez faibles. L'hydrologie constatée ces dernières années est pourtant comparable à la capacité des lâchers morphogènes réalisables et programmés dans le cadre du plan de gestion. Les dépôts quant à eux représentent de nouvelles surfaces à gérer. Enfin, les érosions constatées se situent principalement en amont ou sur les parties latérales des bancs.

2.4.5 Caractériser la dynamique des bancs à l'aide de mesures par carroyage

Objectifs :

Dans le cadre des suivis effectués sur la Combe de Savoie, l'évolution temporelle de l'état des bancs doit être décrit finement afin de permettre de caractériser leur trajectoire (ex : végétalisation, déconnexion des flux par exhaussement, effet des chasses sur le dépôt de fines etc...). Dans ce contexte, plusieurs compartiments ont été suivis :

- Granulométrie,
- Etat sédimentaire : recouvrement et épaisseur de sédiments fins,
- Altimétrie,
- Végétation.

Ce travail est réalisé par EDF en collaboration étroite avec le bureau d'études Dynamique Hydro.

Méthode :

Le suivi des sédiments fins a été effectué à partir d'un protocole par points positionnés au GPS afin d'être parfaitement comparables entre chaque observation. Un carroyage a été établi sur la surface des bancs et les zones immergées adjacentes accessibles à pied.

Les carroyages ont été réalisés avec un espacement de 5X5 m entre chaque point. Au total, le nombre de points est de 428 sur Albertville, 615 sur Fréterive, 444 sur Montmélian et 534 sur Saint-Laurent. Sur chaque point ont été mesurés : l'épaisseur de fines à la pige avec une précision de quelques millimètres (dans ce document les « fines » concerneront les limons et les sables) et le taux de recouvrement par les fines en 6 classes (0-5%, 5-25%, 25-50%, 50-75%, 75-95% et 95-100%). En complément, une granulométrie EVHA a été effectuée. Les relevés ont été effectués à plusieurs périodes.

Le carroyage a été initialement défini sur les différents bancs exondés à la mise en œuvre du protocole mais également aux zones inondées mesurables à pied (environ 1m de hauteur d'eau et faibles vitesses des écoulements). Certains de ces points sont inondés 90 à 100% du temps. Nous considérerons toutefois cette entité comme étant « le banc » même si la surface est supérieure au « banc émergé » stricto-sensu. Ce dernier est en effet difficile à définir à cause des variations de niveau d'eau.

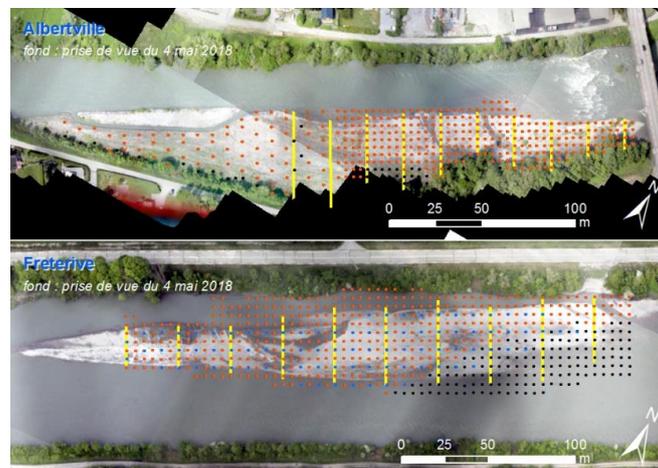


Figure 30 : Exemple de carroyage sur 2 bancs en amont de l'Arc. L'ensemble des données du protocole sont recueillies sur chaque point. Les transects en jaune permettent quant à eux de décrire la végétation (Dynamique Hydro, 2017)

Des relevés topographiques au DGPS ont également été effectués pendant toute la période. Ces mesures ont une précision altimétrique de 4-5 cm en moyenne. Les levés topographiques correspondent aux points de carroyages présentés précédemment.

Enfin, l'évolution de la végétation a été étudiée à partir de 10 transects par banc. Les transects sont répartis de l'amont à l'aval des bancs et sont positionnés au GPS. Sur chaque transect, un point de mesure est réalisé tous les 2 m. Sur chaque point, le taux de couverture végétale en surface (6 classes ; 0-5% 5-10% 10-25% 25-50% 50-75% 75-100%) et le type de végétation dominante (aucune, herbacées, arbrisseaux, arbustes, arbres) sont relevés.

Un exemple de rendu est donné en complément de la méthode dans l'Annexe V.

Il est à noter qu'un protocole simplifié a été proposé dans le cadre de la thèse de [Junjian Deng \(2022\)](#) sur la base d'une estimation de la granulométrie de surface et subsurface (avec un zonage en zone homogène) ainsi que des épaisseurs moyennes de sédiments fins (amont, centre, aval banc).

Principaux résultats :

Le protocole mis en œuvre apporte beaucoup de satisfactions par rapport à une méthode de transects « classique ». En effet, cette méthode, appliquée sur de grands milieux comme l'Isère en Combe de Savoie est beaucoup plus robuste qu'une méthode par transect qui ne décrit pas suffisamment de points pour permettre d'être représentatif. Le carroyage est certes chronophage car un très grand nombre de points nécessite d'être relevés mais il permet de voir, décrire et comprendre des évolutions locales ainsi que des processus. Par ailleurs, après une période de test du protocole, il est possible de réduire le nombre de points du carroyage en faisant des tests de sensibilité des résultats en enlevant, par exemple, un point sur quatre et en conservant le nombre de points permettant une bonne optimisation. Enfin, cette technique de terrain peut permettre de réduire significativement les erreurs liées à l'imprécision de certaines orthophotographies qui peinent à faire des distinctions précises entre les sédiments fins et les petits galets/graviers (résolution du pixel, variations de couleurs selon l'humidité...).

Les carroyages ont montré sur la période sur le tronçon restauré situé entre le pont de Grésy sur Isère et la confluence avec l'Arc :

- Un exhaussement quasi généralisé et régulier des bancs,
- Une variation de la couverture et de l'épaisseur de fines selon les périodes hydrologiques et les flux observés dans la rivière. Ces variations ne sont pas comparables avec les évolutions historiques (dépôts de plusieurs dizaines de centimètres) lorsque les bancs étaient perchés et recouverts par de la végétation,
- Un développement de la végétation, notamment sur les parties les plus hautes, qu'il convient d'étudier. Le suivi ne permet en effet pas de comprendre complètement le mécanisme de germination et de développement des graines.

2.4.6 Caractériser la submersion des bancs

Utilisation et intérêt des limnimètres

L'évolution de la ligne d'eau et donc de l'altimétrie des bancs par rapport à cette ligne d'eau permet de contextualiser les évolutions morphologiques ou les résultats fournis par d'autres protocoles de mesures.

Analyse de la submersion des bancs

Dans le cadre du suivi réalisé par EDF, des sondes de hauteur d'eau ont été mises en place en amont de la confluence avec l'Arc. Le suivi des lignes d'eau est réalisé immédiatement en amont de la confluence avec l'Arc à l'aide de sondes de pression avec un intervalle de mesure de 10 minutes. 4 sondes mesurent en continu les lignes d'eau dans la partie aval du tronçon suivi, sur 2,5 km.

Ce suivi avait plusieurs objectifs :

- Déterminer les variations des surfaces exondées en fonction du débit.

Le relevé des lignes d'eau permet de limiter les erreurs sur l'interprétation des photographies aériennes.

En effet, les suivis ont montré que :

- Une élévation de la ligne d'eau de 25 cm (minimum observé entre les prises de vue du 4 et du 16 mai) entraîne une diminution de la superficie totale des surfaces exondées de l'ordre de 30%,
- Une élévation de la ligne d'eau de 60 cm (maximum observé entre les prises de vue du 16 mai et du 12 juillet) entraîne une diminution de la superficie totale des surfaces exondées de 60%.

Freterive - 15/04/2018

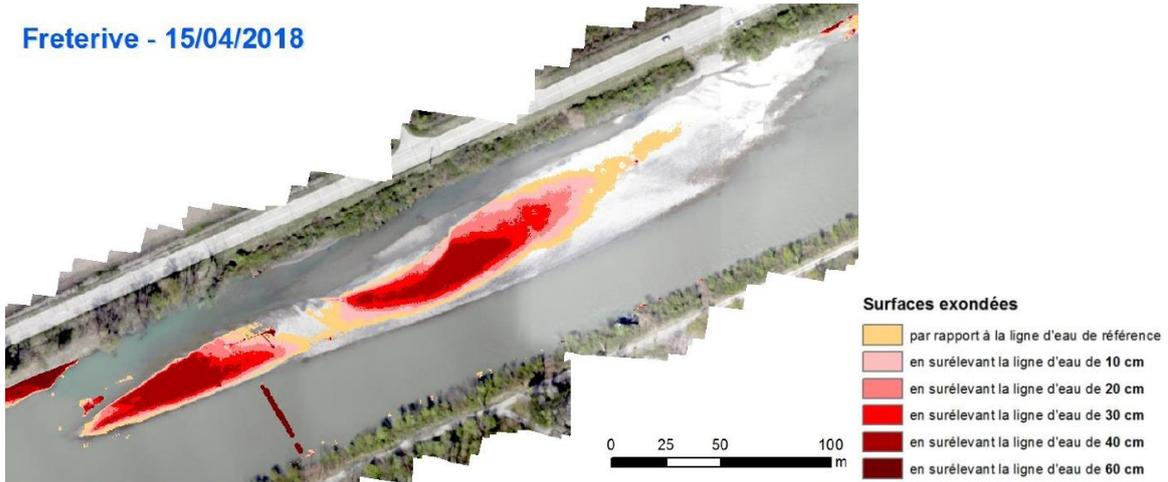


Figure 31 : Exemple d'évolution des surfaces exondées en Combe de Savoie (Dynamique Hydro)

Ces résultats montrent qu'une faible élévation de la ligne d'eau peut entraîner une diminution significative de l'emprise des surfaces exondées. De la même manière, on peut considérer qu'un faible abaissement de la ligne d'eau peut entraîner une augmentation significative de l'emprise des surfaces exondées. Cela provient principalement du fait que les têtes de bancs sont relativement planes et d'une altitude proche de la ligne d'eau d'étiage moyen.

Etant donné les différences de débit entre les prises de vue aériennes, la délimitation des surfaces exondées par photo-interprétation est donc sujette à une incertitude non négligeable.

- Connaître les hauteurs et les durées de submersion des bancs,

La submersion (hauteurs et durées) des bancs permet d'avoir une idée de l'intensité des processus qui ont été observés pendant une année hydrologique : par exemple une hauteur d'eau faible avec une eau chargée peut favoriser les dépôts de particules fines. A l'inverse, des hauteurs d'eau plus élevées (en règle générale avec des vitesses également plus élevées) peuvent favoriser des dépôts de sédiments. Il en va de même pour les sédiments plus grossiers, les processus érosifs seront plus importants lorsque la hauteur d'eau au droit du banc est forte.

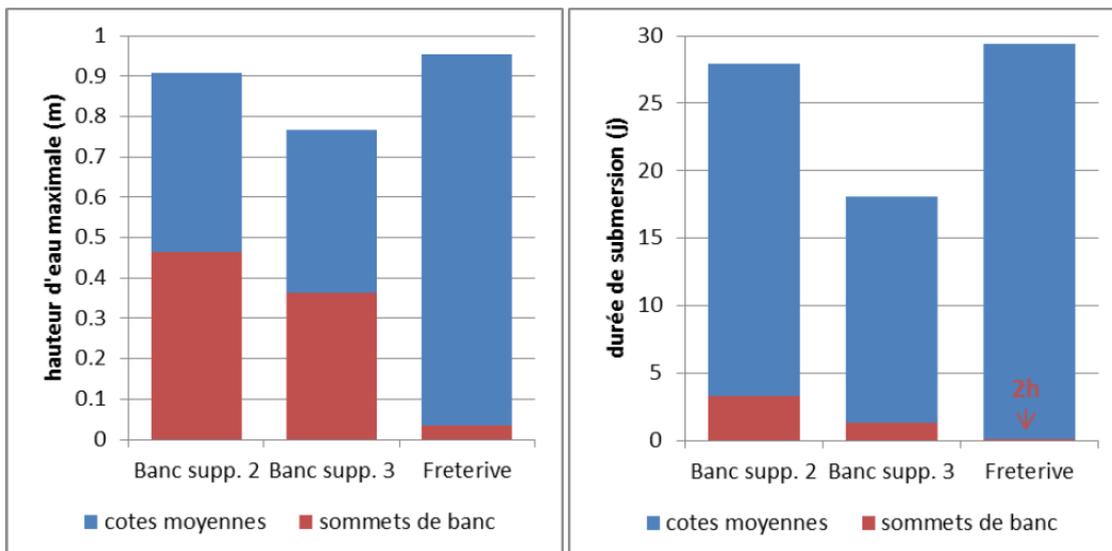


Figure 32 : Statistiques moyennes de submersion des bancs entre avril et juillet 2021 (Dynamique Hydro)

En règle générale, les hauteurs d'eau sur les bancs sont assez faibles tout comme les durées de submersion.

- Permettre une analyse croisée des différentes données du protocole mis en œuvre.

De ce fait, disposer des hauteurs d'eau sur un site permet d'expliquer certains phénomènes observés par les autres protocoles de mesure.

Hydrodynamique d'un bras secondaire

Dans le cadre d'un suivi de la dynamique sableuse sur la Combe-de-Savoie réalisé entre 2018 et 2020 (Camenen et al., 2018, 2019, 2020), un focus a été réalisé sur le chenal secondaire du banc de Fréterive. Afin de mieux relier les prélèvements de MES aux conditions hydro-dynamiques, une meilleure connaissance de l'hydraulique du chenal secondaire était nécessaire. Des capteurs de pression (Diver) ont donc été installés le long du chenal secondaire (cf. Figure 33). Associés à des mesures bathymétriques du chenal, ils ont permis d'estimer en continue les profondeurs d'eau ainsi que les pentes d'écoulement dans le chenal (amont et aval). Ces données ont ainsi permis d'évaluer le débit dans le chenal secondaire (application de la loi de Manning-Strickler) en comparaison avec le débit total de l'Isère (évalué au Pont-de-Grésy) ainsi que les contraintes moyennes sur la section d'étude.

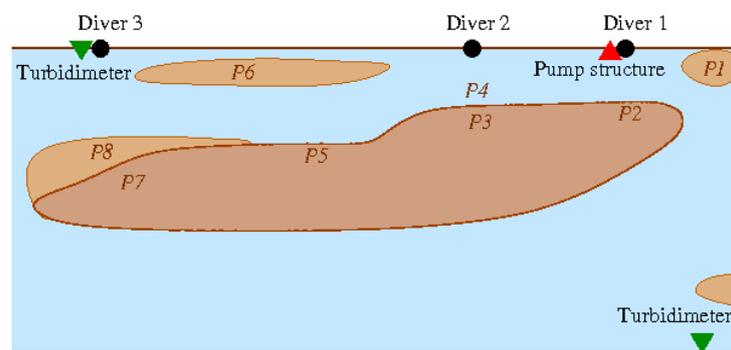


Figure 33: Schématisation des différents instruments installés sur le site de Fréterive ainsi que les prélèvements de dépôts de surface réalisés le 2 mai 2019 (Camenen et al., 2019)

Cette connaissance de l'hydraulique du chenal secondaire a ainsi pu être couplée aux mesures de concentration en sable afin de caler une courbe de tarage sédimentaire sur le chenal secondaire du banc de Fréterive (Figure 34). Mêmes si les résultats restaient très incertains, ils ont permis d'évaluer les flux de sables dans le chenal secondaire sur différentes périodes : 5000 tonnes (principalement par charriage) sur le premier semestre 2018 (incluant la chasse d'Aigueblanche), 2000 tonnes sur le premier semestre 2019, et 6500 tonnes (principalement en suspension) sur le premier semestre 2021. En 2021, nous avons en effet observé des contraintes a priori beaucoup élevées qu'en 2019 et 2020 du fait d'une pente d'écoulement plus forte.

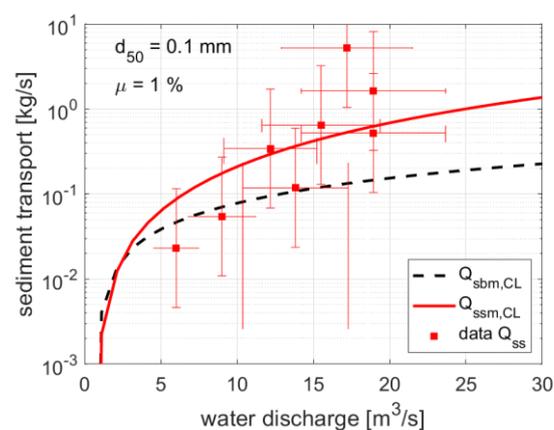


Figure 34: Courbe de tarage sédimentaire estimée dans le chenal secondaire du banc de Fréterive ($Q_{sbm,CL}$, $Q_{ssm,CL}$: débit solide par charriage et suspension évalué selon le modèle avec la formule de Camenen & Larson, 2005 et 2008, respectivement ; data Q_{ss} : débit solide par suspension estimé à partir des données expérimentales, Camenen et al., 2019).

2.5 MODELISER LES FLUX

2.5.1 Les données à acquérir

Que ce soit pour l'analyse ou la modélisation une série de données d'entrées et de calages seront à acquérir.

2.5.1.1 Topographie des bancs / bathymétrie

Une description des différentes mesures de topographie et bathymétrie est disponible dans le guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide co-écrit par l'OFB et l'INRAE (Camenen 2021). Toute modélisation numérique (1D, 2D) nécessite un jeu de données topo-bathy minimum : un jeu de section en travers suffisamment dense (tous les 100 à 200 m selon la largeur de la rivière) pour la modélisation 1D ; un jeu de point spatialisé permettant une description des principales formes sédimentaire (berges, bancs, etc.) pour la modélisation 2D. Une validation de simulation avec évolution des fonds nécessite d'ailleurs d'avoir plusieurs jeux de données afin de pouvoir comparer les résultats de simulations numériques à des mesures.

2.5.1.2 Chroniques de débits

Les débits sont disponibles soit via des stations de mesure pérennes soit via des mesures ponctuelles. Les données des stations pérennes sont disponibles sur le site <https://www.hydro.eaufrance.fr/login>.

La mesure ponctuelle du débit peut être réalisée via différentes méthodes qui ne sont pas traitées dans ce document. Il est possible de se référer à différents guides d'hydrométrie (Le Coz et al., 2011 par exemple)

2.5.1.3 Granulométrie des bancs (surface et sub-surface)

La détermination des caractéristiques des matériaux et les différentes techniques de mesures granulométriques sont décrites dans le Guide INRAE-OFB (Camenen & Melun, 2021). La mesure de la granulométrie et de la répartition des sédiments dans la matrice est également abordée dans le chapitre 2.1.3. Ces données sont fondamentales pour évaluer la rugosité de fond et nécessite d'ailleurs d'être complétées par un zonage des différents types de végétation. Elles sont aussi fondamentales pour toute modélisation du transport solide avec évolution des fonds.

2.5.1.4 Chroniques de flux de Matière En Suspension (MES)

Les techniques de mesure du flux en suspension graduées et en suspension de lessivage sont décrites dans le Guide INRAE-OFB (Camenen 2021). Pour la mesure du flux de Matière En Suspension de lessivage, il est également possible de se reporter au chapitre 2.2. Les chroniques de concentration et flux en MES sont disponibles sur certaines bases de données dont la base de données BDOH, qui inclut le réseau sur le site Arc-Isère (<https://bdoh.irstea.fr/ARC-ISERE/>).

Dans l'absolu, il serait aussi nécessaire d'avoir une idée des apports solides grossiers (graviers et sables) afin de pouvoir imposer des conditions solides en amont des modèles. Cependant, en absence de ces données, on applique souvent des formules de capacité de transport pour évaluer ces conditions solides amont.

2.5.1.5 Paramètres impactant le dépôt et l'érosion sédiments fins sur les bancs

Une analyse de ces paramètres est donnée dans le cadre du chapitre 2.1.4. L'imposition de ces paramètres peut au moins en première estimation être basée sur ces mesures.

2.5.2 La modélisation 2D à l'échelle d'un secteur de quelques kilomètres

Objectifs : Des modèles morphodynamiques bidimensionnels ont été construits et développés sur des tronçons de rivière kilométriques afin d'étudier l'effet des forçages environnementaux sur la dynamique

des bancs de graviers, le dépôt et l'érosion des sédiments fins sur ces macroformes ainsi que sur le développement de la végétation dans ces milieux. Ces différents travaux se sont appuyés sur :

- Le post-doc Coraline Bel (2019-2020) principalement basé sur l'étude de la dynamique des sédiments fins et la mobilité des bancs de l'Isère en Combe de Savoie ;
- Le stage de fin d'étude de Théo Barthout (2020) portant sur la modélisation de travaux d'opérations de restauration pour remobiliser des bancs hybrides avec une application centrée sur des expériences de laboratoire sur modèle physique à fond mobile ;
- La thèse de Jiaze Li (2019-2022) menée sur l'évolution bio-morphodynamique des rivières aménagées avec une application sur la reproduction d'essais sur modèles physiques bio-morphodynamiques et une application sur un tronçon de l'Isère en Combe de Savoie ;
- La thèse d'Hannah Haddad (2019-2022) portant sur la dynamique des sédiments fins dans les rivières de montagne et recherchant comment le suivi *in situ* des propriétés d'érosion/dépôt peut servir à optimiser le déploiement de modèles numériques sur des cas réels. Les sites suivis et modélisés dans le cadre de ce travail sont l'Isère en Combe de Savoie et le Galabre.

Ces différents travaux s'inscrivent dans une démarche générale visant à étudier, comprendre et modéliser les interactions et rétroactions complexes (Figure 35) entre :

- La dynamique des sédiments fins sur les bancs (travaux de C. Bel et H. Haddad) ;
- Les processus de charriage et de mobilité des bancs de graviers (travaux de C. Bel et T. Barthout) ;
- La dynamique spatio-temporelle de la végétation (recrutement, croissance, mortalité ... ; travaux de J. Li).

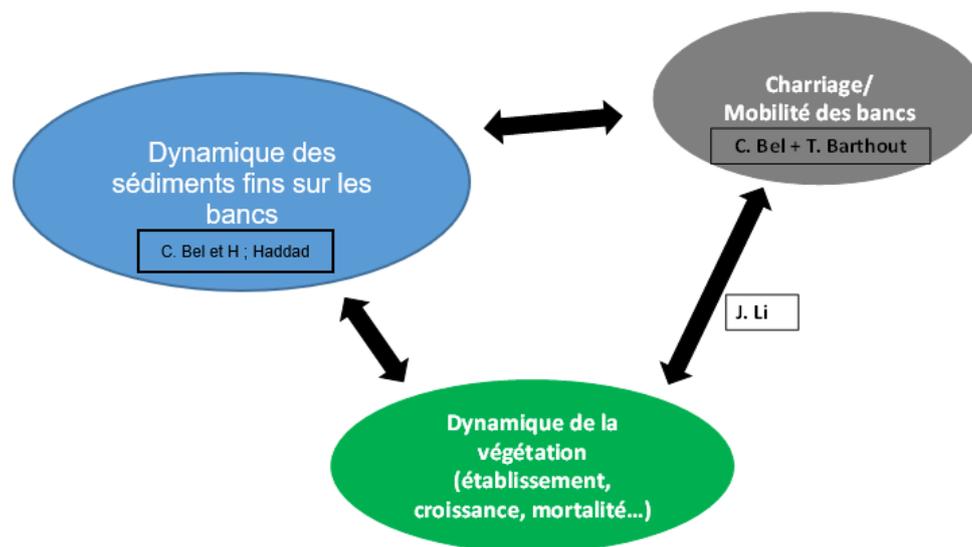


Figure 35 : Démarche générale dans laquelle s'inscrivent les travaux de modélisation numérique réalisés à EDF dans le cadre de l'ANR DEAR.

2.5.2.1 Dynamique des sédiments fins sur les bancs

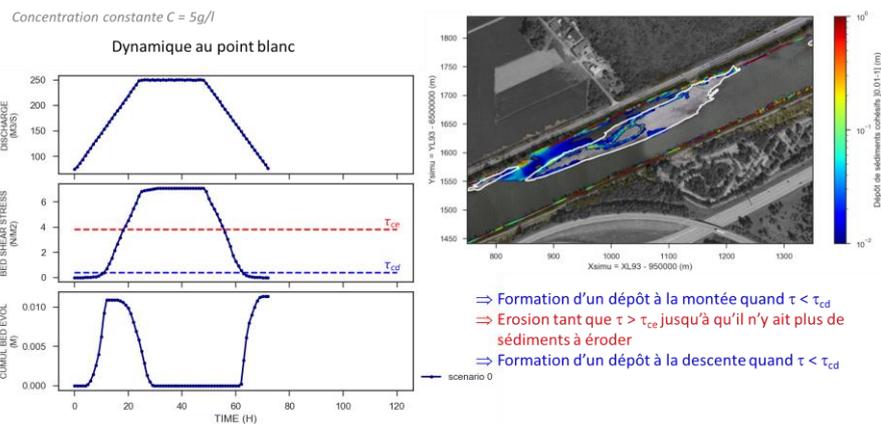
Des modélisations numériques hydro-sédimentaires 2D ont été réalisées à partir des codes TELEMAC-2D/GAIA pour étudier la dynamique des sédiments sur les bancs (Figure 36). Notons que les processus de charriage ne sont pas pris en compte dans ces simulations.

Ces travaux ont notamment permis de mieux discerner les conditions durant lesquelles le dépôt et l'érosion des sédiments fins peuvent être observés aux cours d'évènements hydrauliques chargés en MES (crues ou chasses de barrages en amont). Il a été mis en évidence que :

- Les zones préférentielles de dépôt et d'érosion dépendent à la fois du débit et de la bathymétrie :
- Les faibles reliefs diminuent le potentiel de dépôt aux hauts débits ;
- Les chenaux secondaires sont particulièrement sujets au dépôt à faible débit ;
- Les dépôts sont favorisés par les écoulements concentrés durant les phases de montées et de descentes des hydrogrammes (phases à bas débits) :
- La limitation des durées à faibles débits avec de fortes concentrations permet de limiter les dépôts de fins ;
- En début et fin d'hydrogramme, limiter les concentrations ou réduire les temps de montée et de descente permet de limiter les dépôts de fins ;
- L'ajout d'une phase de rinçage dans le modèle n'est peu voire pas efficace :
- Amorcer la décrue avec des concentrations faibles permet de limiter les dépôts ;
- Augmenter la durée ou le débit de rinçage n'a pas d'impact significatif sur les dépôts ;
- Les dépôts perchés formés aux hauts débits seront difficiles à éroder même avec des durées ou débits de rinçage importants.

En complément, les observations de forte variabilité spatiale de l'érodibilité des dépôts de sédiments fins ont montré que les dépôts à altitude moyenne (dépôts marginaux) sur un transect sont les plus résistants et que les dépôts très proches de l'écoulement (dépôts en eau) ou perchés sur les bancs (dépôts surfaciques) sont peu résistants. Cette variabilité spatiale de l'érodibilité des sédiments se traduit par une sensibilité importante dans les résultats des modèles numériques. Autrement dit, les résultats des simulations peuvent être très différents en fonction des valeurs entrées pour paramétrer les processus d'érosion. Toutefois, les différences ne sont pas très marquées entre les scénarii spatialisés et non-spatialisés des paramètres d'érosion pour l'estimation du flux total, à condition d'avoir des variables représentatives de la distribution.

Post-doc : C. Bel



Thèse : H. Haddad

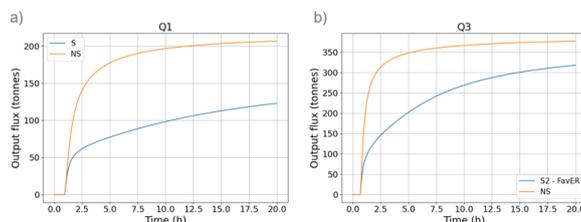


Figure 36 : Exemples de résultats des travaux de C. Bel et H. Haddad sur la modélisation de la dynamique des sédiments fins sur les bancs.

2.5.2.2 Charriage/mobilité des bancs

Des modélisations numériques morphodynamiques 2D ont été réalisées à partir des codes TELEMAC-2D/GAIA pour évaluer la capacité de ces outils de modélisation à reproduire la formation et la dynamique de bancs hybrides (Figure 37). Spécifions que seuls les processus associés au charriage sont considérés dans ces modèles. Les essais ont été menés sur deux cas et échelles spatiales différentes :

- Des expériences de laboratoire avec un modèle physique à fond mobile (charriage) utilisé pour étudier des solutions permettant de remobiliser des bancs hybrides à l'aide de déflecteurs ;
- Un tronçon de l'Isère en Combe de Savoie ayant fait l'objet de travaux de restauration (essartements, extraction des sédiments fins et remodelage de bancs).

Les deux études ont mis en évidence la capacité du système TELEMAC-MASCARET à reproduire la formation de bancs hybrides. Il semble envisageable à court terme de pouvoir utiliser ces modèles comme des outils pour étudier/optimiser des travaux de restauration de bancs ayant pour objectif d'accroître la mobilité de ces derniers. A moyen terme, il est également envisageable de pouvoir développer des modèles associant les processus de charriage et de suspension afin de pouvoir reproduire plus fidèlement la dynamique sédimentaire des cours d'eau.

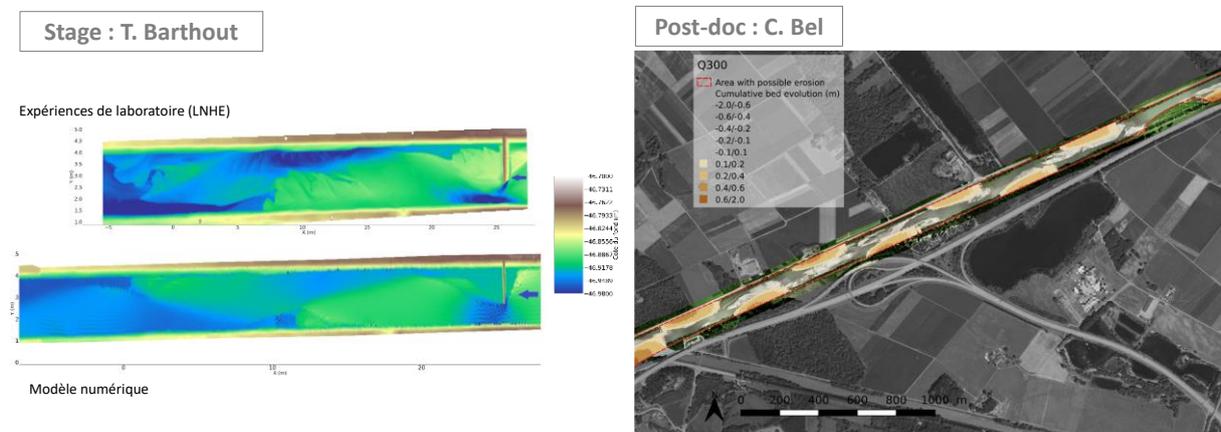


Figure 37 : Exemples de résultats des travaux de T. BARTHOUT et C. BEL sur la modélisation de la mobilité des bancs.

2.5.2.3 Dynamique de la végétation

Des modélisations numériques bio-morphodynamiques 2D ont été réalisées à partir des codes TELEMAC-2D/GAIA pour étudier les interactions entre la morphodynamique des bancs et la dynamique de la végétation rivulaire (Figure 38). Les mécanismes associés au transport de sédiments par suspension ne sont pas pris en compte dans ces modélisations.

Ces travaux ont visé dans un premier temps à reproduire des expériences menées en laboratoire avec un modèle physique à fond mobile (charriage) et des plantes. Les simulations numériques ont permis de mettre en évidence l'influence de l'organisation spatiale des patches de végétation (linéaires ou pleins) sur l'évolution des cours d'eau. Il est ainsi montré que la présence de patches favorise les processus d'érosion de berge et l'allongement des bancs. Les patches linéaires tendent à diriger les systèmes vers des chenaux plus larges et moins profonds tandis que les patches pleins conduisent à des rivières plus rectilignes, étroites et plus profondes. Ces travaux démontrent que la surface frontale qu'oppose les plantes à l'écoulement constitue une variable capable d'affecter significativement l'évolution morphologique des cours d'eau.

Dans un second temps, un modèle a été construit sur l'Isère en Combe de Savoie. La calibration du modèle à l'aide d'analyses de données a permis d'identifier les principaux processus contrôlant le recrutement et la mortalité des semis. Il est également montré que le modèle reproduit correctement

l'évolution morphologique du lit et de la végétation. Cet outil va prochainement être utilisé pour simuler différents scénarii visant à optimiser les opérations de restauration des bancs.

Thèse : J. Li

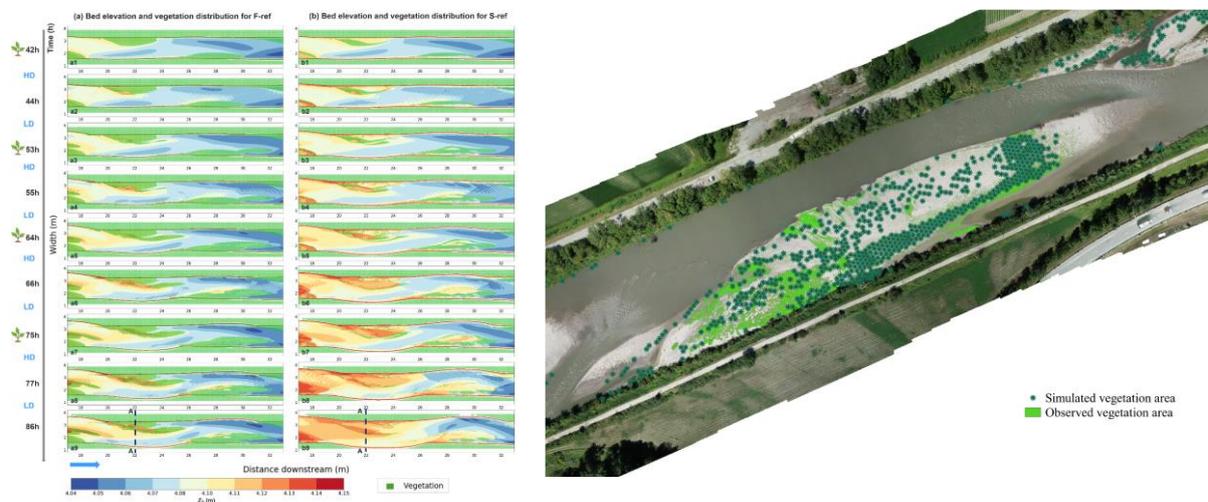


Figure 38 : Exemples de résultats des travaux de J. Li (2022) sur la modélisation de la dynamique de la végétation.

2.5.3 La modélisation large échelle

Objectifs : Une application de la modélisation 1D à la dynamique des fines a été réalisée dans le cadre de la thèse de Junjian Deng (2022). Dans la suite de la thèse de Germain Antoine (2013), l'idée était de discuter les possibilités de la modélisation unidimensionnelle à reproduire la dynamique des MES dans les rivières alpines, en particulier des érosions et dépôts sur les bancs de graviers selon les différents types d'événements.

Résultats : Un modèle de l'Arc-Isère complexe a été construit à partir de la géométrie réelle et testé sur les chasses de barrage qui sont des événements bien suivis et ont une dynamique importante pour les sédiments fins. Deux chasses de barrage sur l'Arc ayant des conditions hydrauliques et une dynamique de sédiments fins différenciée ont été retenues pour tester le modèle, i.e. avec des débits sur l'Isère relativement faibles en 2011 et forts en 2010. Les résultats du modèle pour la chasse de 2011 ont montré l'importance de la maîtrise de la distribution spatiale du stock initial et de la granulométrie de ce stock sur la dynamique de sédiments fins. Aussi, les dépôts sur les bancs, s'ils sont suffisamment épais peuvent impacter sur la rugosité de peau des bancs (plus lisse que la rugosité liée aux galets) et donc sur la dynamique des sédiments fins. En utilisant le même jeu de paramètres pour la chasse de 2010, les résultats ont montré une sensibilité importante du modèle au stock initial et aux contraintes sur les bancs pour l'estimation de la dynamique de sédiments fins. Ces résultats mettent donc en avant le rôle majeur des bancs (ou plus généralement le lit de la rivière) sur les processus d'érosion et de dépôt des sédiments fins à l'échelle événementielle. Aussi, les stocks initiaux pourraient être sensiblement différents d'une chasse à l'autre. Une bonne connaissance du stock initial et des contraintes sur les bancs apparaît donc essentielle pour la compréhension des processus d'érosion et de dépôt pour les sédiments fins pour un événement hydrologique. Les résultats du modèle pour les deux chasses ont montré que les sables ont été principalement repris des bancs de l'Arc et se sont déposés sur les bancs de l'Isère, notamment au niveau de Montmélian malgré l'incertitude sur les apports en sable en amont.

Le modèle de l'Arc-Isère a été lancé pour des simulations de dix ans afin de comprendre l'évolution globale du dépôt à long terme. Concernant les sédiments très fins (argiles et limons), les échanges de sédiments avec les bancs sont limités à l'échelle inter-annuelle (Figure 39a). Spécifiquement, le flux

provenant de la reprise de stock représente en moyenne seulement 0,2% du flux annuel sortant de l’Arc-Isère. Cela souligne donc l’importance des apports en amont et apports intermédiaires pour établir un bilan sédimentaire pour les sédiments très fins. En revanche, les résultats avec la classe de sable ont confirmé que le lit peut jouer un rôle très important. En particulier, les sables provenant de l’amont lors d’un évènement se déposent facilement dans les bancs ce qui induit à une accumulation importante du stock en sable dans les bancs. Ces dépôts représentent en moyenne 46% du flux de sable annuel sortant de l’Arc-Isère. Tout comme les très fins, nous pouvons observer Figure 39b l’importance des apports en sable que nous ne maîtrisons pas car non mesurés. En effet, selon le choix de la formule de capacité de transport (apports limités aux événements importants où les vannes de barrages sont a priori ouvertes), les résultats peuvent très largement varier.

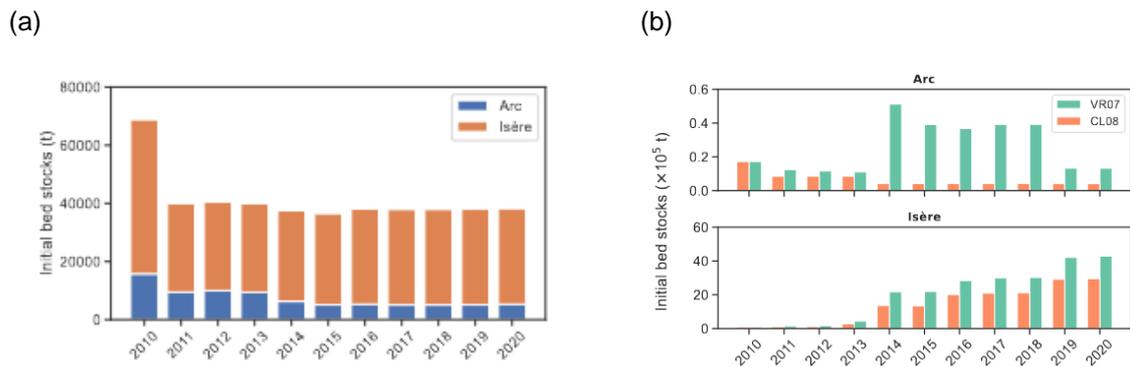


Figure 39 : Évolution annuelle du stock sur la période 2010-2020 dans le cas (a) des sédiments très fins, et (b) du sable pour des apports estimés selon les formules de Van Rijn (2007) ou Camenen & Larson (2008).

La végétation a un impact non négligeable sur la dynamique des sédiments fins. Comme discuté au paragraphe 2.5.2.3 avec la modélisation 2D, la végétation induit une perte de charge qui va accentuer le phénomène de déposition. Des simulations avec différents scénarios de végétation réalisés dans cette thèse ont été réalisées mais n’ont pas permis de bien reproduire cette accentuation des dépôts car le poids de la rugosité de peau impactait plus sur les résultats que la rugosité équivalente liée à la végétation. Une meilleure représentation de la végétation (perte de charge par un effet de trainée et non par un frottement à la paroi) serait nécessaire pour ces modélisations.

3 MESURES DE RESTAURATION SUR LES BANCS DE GRAVIERS DANS UNE RIVIERE ALPINE AMENAGEE

3.1 ELEMENTS DE GESTION

3.1.1 Evénements hydro-sédimentaires

3.1.1.1 Chasses hydrauliques des barrages

Une chasse hydraulique est une action d'exploitation sur un aménagement hydroélectrique conduisant à abaisser le plan d'eau en crue pour réaliser une purge partielle ou totale des sédiments accumulés dans la retenue depuis la dernière chasse.

Pour de nombreuses raisons, il est souhaitable que ces chasses soient réalisées aussi fréquemment que possible. Un débit de chasse calé sur une période de retour annuelle semble être un bon compromis car cela permet de disposer d'un débit support suffisant tout en limitant la quantité de sédiments à évacuer.

Ces chasses ne sont réalisées que sur des Barrage Mobile en Rivière (BMR) dont la capacité est faible par rapport au débit de la rivière (possibilité de vidanger et de remplir la retenue en quelques heures/jours) et possédant des organes de gestion de crue tels que des vannes, permettant une débitance importante lorsque le barrage est effacé.

Les chasses sont donc des événements généralement NON planifiés/planifiables car dépendant de l'hydrologie naturelle.

Il existe dans les faits plusieurs exceptions :

- Sur l'Arc l'ensemble du bassin versant est régulé par de grands aménagements capacitifs en tête de vallée. La chasse est donc planifiée et le débit de chasse régulé via les aménagements capacitifs amont (cette configuration reste très atypique).
- Certains aménagements de petites tailles nécessitent plusieurs chasses annuelles de par leur capacité limitée (c'était le cas des aménagements de la Romanche avant leur démantèlement et également le cas du nouveau barrage de Livet (toujours sur la Romanche) aujourd'hui).
- Certains aménagements de petite taille possèdent des ouvrages évacuateurs de crue de type seuil libre en crête de barrage rendant impossible l'abaissement du plan d'eau lors des crues. Pour ces aménagements des chasses peuvent être envisagées en utilisant la vanne de vidange et en analysant sa capacité de débitance maximale à surface libre. Dans ce cas il se peut que le débit de chasse soit inférieur à la crue annuelle.

Il est important enfin de noter deux cas de figure distincts :

- Les barrages usines pour lesquels l'usine est accolée au barrage et qui n'engendre pas de tronçon court-circuité,
- Les barrages dérivant l'eau vers une usine à l'aval créant ainsi un Tronçon Court-Circuité (TCC) entre le barrage et la restitution de l'usine en aval.

Si l'on se réfère aux préconisations issues du chapitre 2.5.2.1 :

- L'une des préconisations est de limiter les concentrations sur les phases de montée et de descente de débit. Cette préconisation est surtout applicable au barrage possédant un tronçon court-circuité. En général, la phase de basculement du débit de l'usine vers le TCC s'effectue avant l'abaissement de plan d'eau ce qui fait que la phase de montée de débit va s'effectuer avec une eau relativement peu chargée.
- Dans l'idéal, la phase de fermeture de l'aménagement devra s'effectuer une fois que la retenue sera nettoyée afin que les concentrations aval soient relativement faibles lorsque débutera la phase de fermeture de l'aménagement.

Dans le cas des chasses hydrauliques où le débit peut être maîtrisé, les travaux de [Camenen et al. \(2016\)](#) ont montré que pour éviter des dépôts importants sur les bancs, il était nécessaire d'éviter un débit constant relativement élevé (où certains bancs de galets peuvent être submergés mais avec des

vitesse sur les bancs faibles) sur une longue période. Ainsi, lors de la chasse de l'Arc de 2015, des problèmes techniques n'ont pas permis de relever le débit à environ 130 m³/s lors de la chasse comme cela est généralement fait. Le débit a ainsi été maintenu autour de 100 m³/s sur 7 heures avec des concentrations relativement élevées (au-delà de 10 g/l), ce qui a induit un très fort dépôt (Figure 40), estimé à près de 30 m³ sur cet unique banc. L'étude plus détaillée de la dynamique des fines sur ce même banc a en effet montré l'importance de l'équilibre entre les contraintes sur le banc et la concentration (cf. paragraphe 2.1.3.1 et [Deng et al., 2022c](#)).

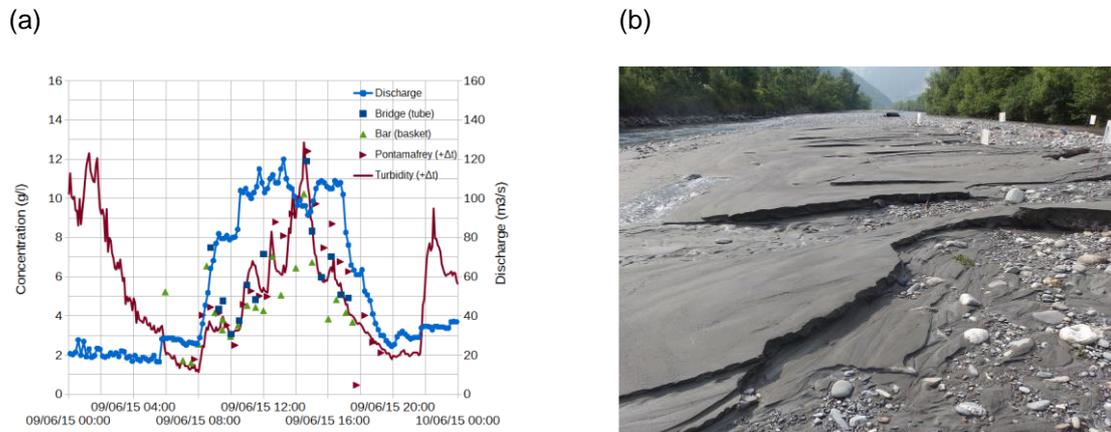


Figure 40 : Chronique de débit et concentration à Ste-Marie-de-Cuines lors de la chasse de barrages de l'Arc de juin 2015 (a) et photo d'un dépôt sur un banc de l'Arc à Ste-Marie-de-Cuines.

3.1.1.2 Lâchers morphogènes

Un guide de mise en œuvre de lâcher d'eau morphogène vient d'être publié par l'OFB ([Loire et al 2021](#)).

Ce guide propose une nouvelle approche méthodologique pour évaluer la pertinence et mise en œuvre des « lâchers morphogènes » en aval de barrages.

3.1.2 Gestion mécanique des bancs

3.1.2.1 Remodelage complet des bancs

Le remodelage mécanique des bancs peut intervenir :

- lors d'une la phase d'initialisation du banc,
- comme moyen d'entretien des bancs restaurés.

Ces remodelages peuvent être l'occasion de recréer des bras secondaires et des formes alluviales potentiellement intéressantes pour le milieu.

La question primordiale qu'il est nécessaire de se poser concerne la durabilité et le ratio coût/efficacité des travaux réalisés. Il est nécessaire pour cela de bien maîtriser la trajectoire morphologique de la rivière et une phase d'adaptation est à prévoir.

- Schématiquement la question qui se pose est :
- est-il plus bénéfique pour le milieu et plus avantageux de prévoir une action d'initialisation des bancs toutes les X années,
- ou doit on prévoir des actions plus fréquentes mais potentiellement plus limitées en termes de coût ?

En Combe de Savoie, les travaux initiaux ont consisté en un arasement complet des bancs jusqu'à la couche de graviers et à la réouverture de bras secondaires. L'analyse réalisée en amont de ces travaux

(morphologie des bancs, des chenaux, durée de submersion visée, ...) se base sur un REX des travaux de restaurations antérieurs déjà réalisés sur la Combe de Savoie (EGIS, 2016) ¹.

Il se trouve que les bancs ainsi formés étaient relativement hauts par rapport à la ligne d'eau initiale, ce qui a entraîné une végétalisation rapide des premiers bancs retravaillés. Or il est nécessaire pour limiter les coûts de travaux d'intervenir avant la phase d'emballement lié à une végétation dense impliquant des dépôts massifs de sédiments fins par effet peigne (REX des crues de 2008 et de 2010).

On constate donc que sur ce secteur l'altitude des bancs retravaillés est primordiale. Pour les travaux de pérennisation l'altitude des bancs est revue à la baisse, les graviers en surplus étant étalés dans le lit mineur.

Les rivières endiguées avec un apport solide important sont souvent caractérisées par la formation de systèmes de bancs alternés, généralement en équilibre dynamique et avec des caractéristiques (longueur d'onde) fonction de la largeur de la rivière (Ikeda, 1984). Ces bancs peuvent se former du fait de forçage (piles de pont, courbure de la rivière, éperon rocheux, etc.) ou simplement d'instabilité du transport solide (bancs « libres » souvent plus petits et dynamiques). L'Arc et l'Isère en sont deux exemples caractéristiques. Il est donc important de tenir compte de ces phénomènes et donc des différents potentiels forçages lors du remodelage des bancs.

Ainsi, l'idée de créer artificiellement des îlots centraux lors du remodelage des bancs de la Combe de Savoie était très intéressante. En effet, cet état typiquement en déséquilibre a induit une dynamique plus importante au moins sur les premières crues (premières années) avant d'atteindre l'état d'équilibre dynamique avec le retour à un système de bancs alternés.

A l'inverse, suite à la crue de l'Arc en 2013 où une érosion importante de la berge avait été observées sur le secteur de Ste-Marie-de-Cuines, d'important travaux de réfection de la digue ont eu lieu. Ces travaux ont induit un arasement total des bancs de galets sur le secteur jusqu'au banc MJ (localisé 500 m en amont du pont de la D927. Cependant, l'arasement de ce dernier banc n'a été que partiel avec la queue de banc de ce dernier laissée tel quel alors que le banc était perché et partiellement végétalisé (Jaballah et al, 2015). Même si ce banc était lui-même forcé du fait de la présence d'une pile de pont en aval (Jaballah et al, 2015), le fait de laisser le banc MJ tel quel sur sa partie aval a créé un forçage qui a bloqué le transport solide et a permis la reformation du banc très rapidement après les travaux avec une végétation complète de sa partie aval. Un arasement total du secteur aurait sans doute permis de relancer une dynamique des bancs dans le secteur au moins sur une certaine période.

3.1.3 Essartement

Les essartements sont réalisés dans la Combe de Savoie en lien avec les obligations d'EDF dans le cahier des charges d'exploitation de ses ouvrages. Initialement, l'objectif des essartements était de limiter le développement d'arbres pouvant créer des embâcles pouvant eux-mêmes générer des problématiques hydrauliques (déstabilisation de digues...). Depuis peu, et notamment dans le cadre du plan de gestion, l'objectif évolue pour limiter le développement de la végétation. Les essartements interviennent donc plutôt en complément des travaux de remodelage des bancs sur le tronçon Albertville – confluence avec l'Arc. Sur les autres tronçons de la Combe de Savoie, voire de la Tarantaise, les essartements historiques sont réalisés.

Historiquement, les essartements consistaient à couper et évacuer la végétation en place. Petit à petit, EDF a procédé à de la scarification voire du dessouchage en complément des essartements. Dernièrement, EDF a lancé avec l'INRAE, une étude sur la période 2018-2021 permettant de qualifier

¹ Des travaux similaires ont été menés sur l'Isère dans la vallée du Grésivaudan au cours du projet « Isère Amont » dans les années 2000 : Travaux d'aménagement hydraulique, environnemental et paysager de L'Isère à l'amont de Grenoble. Maîtrise d'œuvre tranche 1, 2 et 3 par EGIS, Artelia, Ingérop et Hydretudes pour le compte du SYMBHI.

les effets de chacune des techniques sur la reprise de la végétation. Les objectifs de l'étude étaient d'essayer de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les effets de la scarification du sol consécutif à un essartage en comparaison de l'essartage seul sur la dynamique de recolonisation de la végétation : couverture végétale, structure de la végétation et importance des plantes invasives sur une période de 3 ans.
- Quels sont les effets du dessouchage en comparaison d'un essartage simple sur la dynamique de recolonisation de la végétation : couverture végétale, structure de la végétation et importance des plantes invasives sur une période de 3 ans.
- Existe-t-il une interaction entre l'effet de ces pratiques de gestion des atterrissements et la distance au cours d'eau dans la dynamique de recolonisation des atterrissements ?

Les conclusions suivantes sont issues du rapport [INRAE \(2021\)](#).

L'analyse des effets de la scarification et du dessouchage sur la dynamique de recolonisation de la végétation sur les atterrissements du lit de l'Isère, qui s'appuie sur la réponse de la structure de la végétation, démontre un effet significatif de ces méthodes sur notamment la limitation de la recolonisation par les ligneux. Mais il est nécessaire de noter que cet effet, de façon générale, peut être transitoire c'est-à-dire qu'il finit par s'estomper rapidement dans le temps, dès trois saisons de végétation et son intensité est variable en fonction des zones étudiées le long du lit de l'Isère.

Des spécificités sont apparues en fonction de la méthode employée et la scarification semble plus efficace dans le contrôle des ligneux en général que le dessouchage, au moins sur la première phase de recolonisation (2 saisons de végétation). Le dessouchage, pour sa part, semble plus efficace pour le contrôle des espèces invasives, notamment du Robinier faux-acacia. Plusieurs indices de structure en lien avec les ligneux : recouvrement de la strate arbustive haute, recouvrement des arbustes en général, densité des fourrés d'arbustes et recouvrement du Robinier faux-acacia, sont tous réduits par le travail de scarification du sol. Ces réponses sont globalement similaires quelle que soit la distance au cours d'eau sur l'atterrissement et apparaissent donc généralisables sur l'ensemble des bancs étudiés. Ces résultats sont notamment confortés par les mesures obtenues sur les nouveaux sites suivis en aval d'Aigueblanche.

Cette réponse s'accompagne d'un effet positif de la scarification sur le recouvrement des herbacées, mais sans réduire le recouvrement global des plantes invasives ni particulièrement favoriser la diversité végétale (effets neutres dans les deux cas).

Les suivis réalisés sur une troisième saison de végétation nous permettent toutefois de noter que cet effet significatif sur la structure de la végétation ne peut être que transitoire : sur le site de la Combe de Savoie il n'est plus détectable dès la troisième saison de végétation post essartement. Cet effet est également dépendant de la position des bancs sur le lit de l'Isère. Les bancs étudiés en aval d'Aigueblanche voient les effets de la scarification maintenus (même si atténués) après trois saisons de végétation, mais dans un contexte où l'équilibre atteint par la dynamique de végétation correspond à un couvert moins dense qu'en Combe de Savoie.

Dans un objectif de réduire la fréquence et l'importance des opérations d'essartage sur ces bancs sédimentaires, de limiter les risques de formations d'embâcles, il est possible que la dynamique végétale, notamment de colonisation par les ligneux, observée sur les bancs scarifiés reste trop importante pour avoir un impact significatif sur la fréquence nécessaire de ces opérations de gestion.



Figure 41 : Photo de gauche : Recolonisation en août 2018 par la végétation d'un atterrissement 8 mois après la réalisation de bandes essartées ou essartées et scarifiées. Les différences sont difficilement notables. Photo de droite : différences visibles de recolonisation en zone de berge entre la zone scarifiée (à gauche sur la photo) et la zone seulement essartée (à droite sur la photo), INRAE (2021).

Les éléments positifs avérés sur l'effet du dessouchage et de la scarification, observés sur trois saisons de végétation sont donc à interpréter d'un point de vue opérationnel avec beaucoup de précautions pour plusieurs raisons :

- ✓ la disparition assez nette de ces effets positifs sur le site de la Combe de Savoie dès la troisième année de suivi et une atténuation sur le site en aval d'Aigueblanche,
- ✓ d'autre part, malgré les effets significatifs observés de la scarification et du dessouchage, dans tous les cas la dynamique observée a été très forte avec en moyenne autour de 30% (site en val d'Aigueblanche) et 40% à plus de 50% (site de la Combe de Savoie) de recouvrement des bancs par des ligneux et des densités d'arbustes souvent assez importantes que ce soit avec essartage seul, essartage et scarification ou dessouchage dès la deuxième année post essartement.

3.2 OBJECTIFS DE LA RESTAURATION, UNE DEMARCHE ITERATIVE : EXEMPLE DE LA COMBE DE SAVOIE

3.2.1 Introduction sur la restauration de bancs de graviers

L'évolution morphologique des bancs de graviers est contrôlée par des processus complexes faisant intervenir, entre-autres, les sédiments fins (sables, cohésifs) et la végétation en plus de la dynamique des graviers constituant une majeure partie du lit. Les observations réalisées sur l'Isère Combe de Savoie depuis les travaux de restauration de 2017 illustrent parfaitement cette complexité, et permettent de décrire à travers ce cas d'étude à quel point un projet de restauration (défini par des objectifs, des suivis, des analyses...) doit s'appuyer sur des étapes itératives.

Au début de chaque projet de restauration, il est nécessaire de bien clarifier les objectifs de gestion :

- Favoriser le renouvellement de la végétation et des habitats, ainsi que leur diversité,
- Limiter les exhaussements : pour des raisons environnementales, de sûreté,
- etc.

Une fois les objectifs décrits de manière quantitative et qualitative, il convient de mettre en œuvre les protocoles de mesure nécessaires pour suivre la pérennité/l'évolution de cette restauration, et au besoin adapter dans un second temps les modes de gestion.

Un exemple qui peut être donné pour illustrer cette démarche d'adaptativité, est le suivi et le contrôle du dépôt de sédiments fins sur les bancs de graviers de l'Isère en Combe de Savoie.

Les objectifs liés à la restauration de l'Isère en Combe de Savoie sont multiples :

- Regagner de la marge vis-à-vis du risque inondation,
- Limiter l'érosion des digues due à l'incision du lit et à la concentration de l'écoulement provoquée par les bancs végétalisés et fixés,

- Retrouver une morphologie bénéfique à l'installation d'espèces pionnières sur les bancs,
- Obtenir un gain pour la biodiversité.

Dans sa configuration non restaurée (bancs perchés et très végétalisés), la majorité des exhaussements s'effectuait durant de fortes crues via un dépôt massif de sédiments fins piégés dans la végétation par effet peigne (élévations pluri-décimétriques lors des crues de 2008 et 2010).

Suite aux restaurations (évacuation de la végétation et des sédiments fins, puis arasement et remodelage des bancs de graviers), les premiers suivis se sont focalisés sur la capacité des crues à remobiliser les bancs restaurés et sur la quantité de sédiments fins (surface et épaisseur) se déposant sur les bancs (SISARC 2017, SISARC 02-2018, SISARC 02-2018, EDF 2018).

Les méthodes de suivi mises en place ont été multiples :

- Placettes peintes, Chaines d'érosions (§2.4.3), pour avoir de premiers ordres de grandeurs sur les mécanismes de dépôts, d'érosion et les débits associés,
- Mesures de colmatage,
- Orthophotos par drones (§2.4.4) : pour suivre « en grands » l'évolution des bancs (parties émergées lors des prises de vue), la nature des dépôts de surface, la végétalisation des bancs,
- Mesures par carroyage (§2.4.5) : pour avoir une vision plus fine des évolutions morphologiques (en plan et sur l'axe verticale) sur quelques bancs et intégrer les épaisseurs de dépôts de fines.

Un travail de modélisation physique et numérique a également été mené en parallèle (§2.5.2.2).

3.2.2 Première analyse et évolution du suivi

Il ressort de l'analyse des données récoltées que, dans sa configuration restaurée (bancs relativement bas, peu végétalisés), la majorité des exhaussements sont dus à un engraissement des bancs par accumulation de nappes de graviers sur les parties sommitales et les marges des macroformes lors d'épisodes de forts débits. (EDF 2020, EDF 2021 et §2.4.4). L'élévation moyenne due aux dépôts de sédiments fins (quelques centimètres) reste inférieure à l'engraissement des bancs dû au charriage.

Cette analyse permet également de mettre en lumière la dualité des épisodes de forts débits et de caractériser la trajectoire du lit suites aux opérations de restauration :

- Les forts débits permettent, à la suite des travaux, de réagencer les bancs de graviers,
- mais ne permettent pas à eux seuls la pérennisation de la restauration sur le moyen terme : l'engraissement des bancs (et la chenalisation qui en découle) est prédominant par rapport à l'érosion latérale (l'érosion sommitale étant quant à elle quasi inexistante) (§2.4.3). Ces observations pourraient indiquer que le lit retourne vers sa morphologie d'avant travaux.

Face à la faible mobilité de la couche de surface, il a été décidé d'adapter le protocole de mesure en arrêtant les relevés par placettes peintes et les chaines d'érosion.

Les premiers suivis ont également montré, que l'impact des dépôts de fins sur le développement de la végétation (ligneuse ou aquatique) post-travaux n'est pas simple à caractériser et que des études sont encore à mener (Figure 42). Au-delà de la présence de dépôt de surface, il semble en effet nécessaire de considérer d'autres paramètres tel que la quantité de sables et de particules cohésives dans la matrice de sub-surface. En combe de Savoie, la matrice des bancs est composée d'une forte proportion de sables (cf. §2.1.3.2).

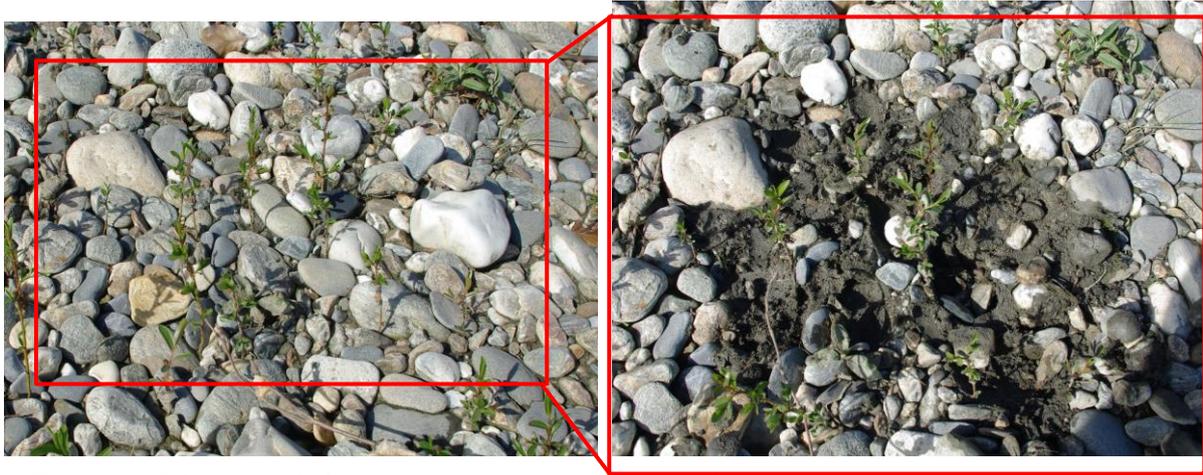


Figure 42 : Départ de végétation sur un banc de gravier en Combe de Savoie : (droite) état initial de la couche de surface ; (gauche) visualisation de la sous-couche après retrait des graviers de surface.

L'impact de la nature de la surface des bancs (fins ou graviers) sur le recrutement et le développement de la végétation (ligneuse) est donc potentiellement beaucoup plus faible que sur des rivières où la matrice des bancs de graviers est moins saturée de sables et de limons. Il est important également de nuancer l'analyse en fonction des espèces. Les saules en particulier sont capable de pousser même sur des bancs grossiers (mais ce n'est pas forcément le cas de toutes les espèces).

D'après ce constat, il apparaît donc important, en termes de suivi et d'analyse de différencier i) les dépôts massifs liés à la présence de végétation dense qui ont eu lieu notamment en 2008 et 2010 sur l'Isère **et qui sont à éviter**, ii) des dépôts, d'épaisseurs centimétriques en moyenne, sur les bancs restaurés **que l'on observe aujourd'hui sur la Combe de Savoie**. En effet, il semble que :

- On peut avoir ponctuellement des hauteurs de dépôt de fines relativement importantes (quelques décimètres sur les marges, zones à faible vitesse) mais qui n'ont pas forcément de tenue s'ils ne sont pas végétalisés (exemples de dépôts de 2017 sur des bancs post-travaux balayés par la crue de janvier 2018).
- C'est la végétation dense qu'il faut éviter si on veut limiter les dépôts massifs de fins, et un exhaussement incontrôlé des bancs.

Le travail pour comprendre les processus liés au recrutement et au développement de cette végétation est à instruire ; il n'a pas été instruit spécifiquement dans le cadre de ce projet. Le travail de modélisation numérique sur la dynamique de la végétation ouvre néanmoins des perspectives intéressantes (§2.5.2.3). Cette analyse permet de se questionner sur les méthodes de pérennisations les plus efficaces et de nouveaux suivis à mettre en place (application d'une démarche itérative d'adaptation de la démarche de restauration) ainsi que sur la pertinence de certaines analyses :

- Si l'on s'intéresse au recrutement et au développement des végétaux sur l'Isère, il faut également avoir une idée de la quantité de graines et de propagules qui se sont déposés en fonction des zones, de leurs natures (granulométrie), de la hauteur du banc par rapport à la nappe (maintien de l'humidité), de la vitesse de croissance des racines.... En effet, les humidités propices au développement végétal vont être dépendantes de l'altitude par rapport à la nappe, de la capacité des racines à suivre un abaissement de la nappe, **des capacités de rétention en eau des matériaux** (courbes $h(\theta)$ en physique du sol avec h la dépression de l'eau dans le milieu poreux et θ l'humidité), très en lien avec la proportion de fines et la structuration de la matrice. Un suivi de la ligne d'eau via des capteurs limnimétriques a donc été mis en place (2.4.6),
- La compréhension des phénomènes de recrutement et de développement de la végétation est à renforcer. Pour cela, on ne peut a priori pas se satisfaire d'une analyse aérienne pour tenter de corrélérer les zones de dépôt de sédiments fins et les zones de végétation dans le but d'établir un lien entre la composition de surface d'une zone et sa capacité à favoriser le développement

de la végétation. En effet, la surveillance aérienne renseigne sur le dépôt de surface mais ne permet pas de connaître l'épaisseur de fines déposée sur le substrat ; Par ailleurs, la surveillance aérienne ne permet pas non plus de détecter la présence de fines dans la matrice, qui dans certains cas semble être suffisante pour permettre l'installation de la végétation. Enfin, les corrélations observées entre la végétation et certains dépôts de surface peuvent être dues à d'autres facteurs non pris en compte via des prises de vue aériennes comme un dépôt privilégié de graines (et de sable) dû à une dépression dans la topographie ou une zone de recirculation par exemple. Ainsi, il peut être intéressant de confirmer dans le protocole de mesure actuelle l'intérêt du suivi des épaisseurs des patches de fines et d'éventuellement ajouter d'autres facteurs d'analyse (granulométrie de la couche de subsurface...),

- Il sera par ailleurs nécessaire de différencier les conditions de développement d'espèces pionnières protégées tels que la petite massette (*Typha minima* Hoppe) ([Popoff 2021](#)) et le développement d'autres espèces (saules, robinier, peupliers noirs...) non protégés et conduisant à une végétalisation de stade arbustive plus problématique pour l'évolution des bancs.

Par ailleurs, il faut noter que les objectifs peuvent entrer en conflit les uns avec les autres : le développement de la végétation est souhaité (objectif de favoriser la végétation pionnière) mais devra être contenu dans le temps (par des travaux, de l'érosion naturelle) pour ne pas entraîner d'effet peigne et de nouveaux dépôts massifs de sédiments fins lors des crues (objectifs de sûreté). D'où la nécessité d'un suivi conséquent, les premières années post restaurations pour bien comprendre les nouvelles dynamiques en jeu et adapter si besoin le suivi et la gestion aux nouvelles connaissances.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1 EN CE QUI CONCERNE LES SOURCES DE SEDIMENTS FINS

4.1.1 Au niveau des bassins versants

Un protocole de suivi de l'altération des marnes a été mis en place. Les suivis ont mis en évidence une grande variabilité temporelle, tant saisonnière qu'inter-annuelle, des exports sédimentaires. A l'échelle saisonnière, il existe un cycle d'hystérèse entre pluie et export sédimentaire qui suggère que les exports sont gouvernés par les intensités de pluie en début d'année, puis limités par la ressource en sédiments disponible en fin d'année. A l'échelle interannuelle, le travail a montré que les exports sédimentaires annuels sont en premier lieu gouvernés par l'intensité des précipitations. Le second facteur de contrôle qui a été mis en évidence est l'intensité de l'altération hivernale sous l'effet du processus de frost-cracking.

Les bilans sédimentaires réalisés entre les deux stations sur le site du Galabre montrent une saisonnalité marquée avec des périodes d'érosion et donc d'export en automne hiver pour des débits liquides élevés alors que du stockage semble avoir lieu en été lors d'évènements présentant des concentrations en MES très élevées. Cette tendance estivale au stockage de fines en été doit être confirmée pour un plus grand nombre d'évènements, ce nombre étant limité par la difficulté à mesurer correctement les gammes basses de débits liquides à la station aval. Il faudra aussi confirmer et éventuellement généraliser ce comportement sur d'autres bassins versants.

Il a également été mis en évidence que les mesures sismiques permettent une bonne estimation de l'énergie cinétique de la pluie, variable pertinente pour caractériser les processus d'érosion sur versant, en particulier le détachement de particules par la pluie.

4.1.2 Au niveau des bancs eux-mêmes

Une méthode d'échantillonnage des bancs intégrant une mesure complète de la granulométrie de l'échantillon et tout spécifiquement les sables a été développée. Elle a permis de mettre en évidence que les stocks sont largement dominés par les sables (10 à 20% en masse) alors que les limons et argiles restent minoritaires (1-3% en masse). Aussi, si une variabilité locale peut apparaître, à l'échelle des rivières étudiées, il n'existe pas (ou très peu) de variabilité longitudinale.

Les mesures réalisées sur les bancs ont montré une forte variabilité spatiale des contraintes critiques d'érosion et des taux d'érosion. Néanmoins, cette variabilité présente une organisation spatiale sous forme de transects perpendiculaires au lit mineur. L'humidité volumique des dépôts présente une corrélation significative avec leurs propriétés d'érosion qui reflète partiellement l'altitude des dépôts par rapport à la surface libre du lit mineur.

Les appareils tels que le CSM ou l'EROMES permettant de multiplier le nombre de mesures in situ sont à privilégier pour bien caractériser la variabilité spatiale de l'érodibilité pour les dépôts de fines. Il serait intéressant de développer un système permettant la mesure d'érosion des fines sur une surface présentant des graviers. La mesure de l'humidité volumique des dépôts permet de définir les différentes zones de dépôts (saturée en eau, marginale et surfacique) où les mesures d'érodibilité doivent être effectuées.

4.2 LA MESURE DES FLUX

Un travail important autour de la mesure des flux de MES et de sables a été réalisé dans le cadre de ce projet. Concernant les MES, un réseau de mesure existe maintenant depuis plus de 15 ans permettant de discuter le bilan à l'échelle du bassin versant avec un flux moyen annuel à Grenoble autour de 1.5 Mt, et de suivre la dynamique des crues d'amont à l'aval. Un travail sur les incertitudes de mesure a aussi montré que les incertitudes sur les concentrations étaient d'au moins 20% pour un calage unique de la turbidité. Il est par ailleurs fortement recommandé de vérifier cette relation turbidité-MES avec des prélèvements réalisés à chaque événement hydro-sédimentaire d'intérêt, idéalement avec un

échantillonneur automatique asservi à la turbidité ou au niveau d'eau, ceci pour permettre la création de calage par événement.

Deux améliorations de la calibration des turbidimètres peuvent être proposées pour une analyse systématique des flux de MES :

- Un calage de la relation concentration-turbidité par classe de débits permettant d'inclure le potentiel effet d'une resuspension des sables fonction des contraintes dans le lit, et donc du débit ;
- Un double calage de la relation concentration-turbidité en séparant les sables (tamisage à 63 µm). Un premier calage sur la concentration totale peut être réalisé comme fait habituellement ainsi qu'un second calage sur les concentrations des échantillons prélevés, sables exclus. Ce second calage permet d'évaluer les flux de MES, sables exclus avec une relation a priori plus stable ; la différence de flux selon les deux calages permet alors d'avoir une évaluation des flux de sables. Bien qu'incertaine, cette évaluation peut s'avérer très intéressante.

Ces propositions ne sont valables que pour une hypothèse d'apports de qualité homogène (sources similaires) et d'un impact faible des débris végétaux sur la turbidité.

Enfin, de nombreux travaux ont aussi été réalisés pour évaluer directement les flux de sable en suspension avec :

- Une proposition de méthodologie pour l'optimisation des jaugeage solide avec divers préleveurs iso-cinétique (US-P61, US-6, Bouteille de Delft)
- Des développements pour utilisation de la mesure acoustique (HADCP) afin d'établir une chronique continue des flux de sable en suspension et de leur granulométrie.

4.3 L'INTERACTIONS FINS GRAVIERS

L'évolution de bancs de graviers a été reproduite sur des modèles réduits physiques. Alors que la forme des bancs est très bien reproduite d'une expérience à l'autre en présence de graviers seuls, l'introduction de sédiments fins semble perturber la stabilité du système et les géométries de bancs obtenues lors des différentes expériences similaires diffèrent. Des bancs libres peuvent apparaître et l'obtention d'un état stable est plus longue.

Une crue sans introduction de sédiments fins génère un aplatissement des bancs sous le pic de crue puis leur reformation lors de la décrue. L'évolution du système de bancs alternés sous une crue avec et sans sédiments en suspension a ensuite été étudiée. Il semblerait que la présence de sédiments fins en suspension ait une influence bien moindre que la modification de l'alimentation en sédiments grossiers (3 cas étudiés : absence d'alimentation en sédiments grossiers, apport constant ou apport variable qui suit la capacité de transport sous l'hydrogramme). Par ailleurs, une modification, même relativement mineure, du forçage amont est bien plus impactante que le colmatage, même complet, du lit avant l'hydrogramme.

Les expériences de transport et de dépôt de sédiments fins sur un banc et/ou une plaine d'inondation ont mis en évidence deux mécanismes physiques principaux : (1) le transport diffusif dû aux structures turbulentes présentes à l'interface entre chenal principal et banc et/ou plaines d'inondations, qui est responsable de la formation de bourrelets proches de la berge du côté du banc ; (2) le transport advectif entre chenal principal et banc, qui est responsable de dépôts significatifs et étendus sur le banc. Le poids relatif de ces modes de transport varie le long du chenal, est fonction de l'importance de la crue (débit), et est évolutif au cours du temps. En effet, il y a une forte rétroaction des dépôts sur l'écoulement. Les dépôts de sédiments induisent notamment une variation des niveaux d'eau, une diminution des niveaux de turbulence entre chenal et banc, ainsi que la diminution des transferts advectifs entre chenal et banc. La prise en compte de cette dynamique spatio-temporelle et des phénomènes de rétroactions des dépôts sur l'écoulement complexifie la modélisation des dépôts.

4.4 METHODES POUR CARACTERISER ET SUIVRE L'EVOLUTION DES BANCs

Plusieurs méthodologies ont été mise en place dans le cadre du suivi des bancs de la Combe de Savoie :

- Orthophotos et Lidar,
- Placettes peintes
- Chaines d'érosion
- Carroyages

Ces méthodologies sont complémentaires en termes de résultats et peuvent servir d'exemple dans les choix des outils à mettre en place dans le cadre de suivis sur d'autres rivières en cours de restauration. Des développements méthodologiques supplémentaires sont nécessaires pour automatiser de manière performante, et dans toutes circonstances, l'extraction des bancs. Même dans le cas relativement simple de rivières endiguées (case de l'Arc et Isère), il existe encore de nombreuses difficultés pour délimiter automatiquement les bancs autour de confluence, d'annexes fluviales végétalisées ou tout simplement pour exclure des chenaux secondaires en eau au moment de la mesure. Une validation manuelle experte reste encore nécessaire.

4.5 LA MODELISATION DES FLUX

Un modèle unidimensionnel de l'Arc et de l'Isère a pu être développé lors de ce projet et a permis de caractériser la dynamique des sédiments très fins (argiles et limons) sur l'Arc et l'Isère. Ainsi, si les bancs de l'Isère sont mis en haut pour des occurrences plus faibles que pour l'Arc permettant ainsi une reprise des stocks de surface plus aisée, les contraintes y restent trop faibles, même pour des occurrences rares pour remettre en suspension les stocks de subsurface. Seul le sapement de berge (typiquement en amont des bancs) peut reprendre des stocks de subsurface (processus non pris en compte dans le modèle 1D). A l'inverse, sur l'Arc, des stocks de subsurface importants peuvent être remis en suspension lors de crues rares. Aussi, nous avons pu observer un équilibre rapide des stocks de très fins sur l'ensemble du système avec au final des échanges très faibles entre le lit et l'écoulement, négligeable par rapport au flux. Sur l'Isère, une tendance au dépôt apparaît en particulier pour les sables. Une difficulté pour la simulation des sables reste la méconnaissance des conditions aux limites amont, soit l'absence de mesure en continu.

Des modèles hydro-morphodynamiques bidimensionnels développés sur des tronçons de rivière kilométriques ont permis d'améliorer notre compréhension des interactions et rétroactions complexes entre la dynamique des sédiments fins sur les bancs, les processus de charriage et de mobilité des bancs de graviers et la dynamique spatio-temporelle de la végétation (recrutement, croissance, mortalité ...). Les résultats obtenus avec ces types de modèles démontrent ainsi leur capacité à être utilisés pour traiter des questions de recherches ou opérationnelles.

4.6 LES MESURES DE RESTAURATION

L'évolution morphologique des bancs de graviers est contrôlée par des processus complexes faisant intervenir, entre-autres, les sédiments fins (sables, cohésifs) et la végétation en plus de la dynamique des graviers constituant une majeure partie du lit. Les observations réalisées sur l'Isère en Combe de Savoie depuis les travaux de restauration de 2017 illustrent parfaitement cette complexité, et permettent de décrire à travers ce cas d'étude à quel point un projet de restauration (défini par des objectifs, des suivis, des analyses...) doit s'appuyer sur des étapes itératives.

Au début de chaque projet de restauration, il est nécessaire de bien clarifier les objectifs de gestion :

- Favoriser le renouvellement de la végétation et des habitats, ainsi que leur diversité,
- Limiter les exhaussements : pour des raisons environnementales, de sûreté,
- etc.

Une fois les objectifs décrits de manière quantitative et qualitative, il convient de mettre en œuvre les protocoles de mesure nécessaires pour suivre la pérennité/l'évolution de cette restauration, et au besoin adapter dans un second temps les modes de gestion.

Un exemple qui peut être donné pour illustrer cette démarche d'adaptabilité, est le suivi et le contrôle du dépôt de sédiments fins sur les bancs de graviers de l'Isère en Combe de Savoie.

Par ailleurs, il faut noter que les objectifs peuvent entrer en conflit les uns avec les autres : Sur la Combe de Savoie par exemple, le développement de la végétation est souhaité (objectif de favoriser la végétation pionnière) mais devra être contenu dans le temps (par l'érosion naturelle ou des travaux) pour ne pas entraîner d'effet peigne et de nouveau dépôts massifs de sédiments fins lors des crues (objectifs de sureté). D'où la nécessité d'un suivi conséquent, les premières années post restauration pour bien comprendre les nouvelles dynamiques en jeu et adapter si besoin le suivi et la gestion aux nouvelles connaissances.

4.7 EN CONCLUSION

Le projet DEAR avait pour but de mieux comprendre les interactions entre les sédiments fins et les bancs de graviers non végétalisés et végétalisés.

Les interactions entre dépôts de fines et croissance de la végétation restent encore méconnues et nécessite encore des recherches. En particulier, puisque la rétroaction se fait dans les deux sens (les dépôts peuvent influencer sur l'installation de la végétation et la végétation augmente le potentiel de dépôt) et que cette dynamique est aussi sensible au transport et dépôt des sédiments grossiers, il est difficile de dire si la stabilisation des bancs est d'abord due à un excès de dépôts de fines, à la croissance de la végétation pionnière, voire du fait d'une hydrologie trop faible pour maintenir un équilibre dynamique pour une configuration morphologique de rivière donnée (largeur, pente, contrainte latérale, apports solides, ...).

La construction de modèles numériques est envisageable mais il est nécessaire dans ce cas de disposer de données de calage nombreuses si l'on souhaite disposer des modèles numériques de qualité pour la compréhension des phénomènes voire pour la prédiction de scénarios hydrologique et scénarios de gestion.

Les phénomènes en jeu sont complexes, soumis à des variabilités spatiales et temporelles importantes. Il est donc nécessaire de réaliser un suivi spécifique à chaque site d'étude et cohérent avec les enjeux qui lui sont propres. Pour cela, les gestionnaires de rivières pourront s'inspirer des fiches de protocoles en annexes, des expérimentations décrites dans ce rapport et des suivis réalisés sur les sites du Galabre et de l'Arc et l'Isère.

5 REFERENCES

- Alber, A. & Piégay, H. (2011). *Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network scale: application to the Rhône basin (France)*. *Geomorphology*, 125: 343-360.
- Andersen, T. J. (2001). Seasonal Variation in Erodibility of Two Temperate, Microtidal Mudflats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(1), 1–12. doi: 10.1006/ecss.2001.0790
- Antoine, G. (2013). Dynamique des matériaux en suspension le long de rivières aménagées de montagne. Exemple de l'Arc en Maurienne et de l'Isère. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- Ariagno C. (2022). Suivi et modélisation de l'altération physique des marnes de Draix et de son impact sur l'érosion. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- Bakker, M., Legout, C., Biron, R., Nord, G., Le Bouteiller, C., Boithias, L., Cotel, S., Coulaud, C., Denis, H., Dramais, G., Droujko, J., Fovet, O., Freche, G., Grippa, M., Le Coz, J., Lucas, A., Martinez, J.-M., Meric, F., Mora, H., Németry, J., Payandi-Rolland, D., Pierrefeu, G., Probst, A., Probst, J.-L., Raclot, D., Ribolzi, O., Rousseau, C., Salvador-Blanes, S., Santini, W., Seve, F., Thollet, F., Vanhooydonck, P., Zanker, S. Intercomparison of optical scattering turbidity sensors for a wide range of suspended sediment sources and concentrations, (soumis à Catena, jan. 2023)
- Bel, C., Jodeau, M., Claude, N., & Tassi, P. (2020). Two-dimensional modelling of hydro-morphodynamic processes in a gravel-bed river: New insights from in situ measurement progress and interoperability applications. *Proc. River Flow 2020* (pp. 1377-1385). CRC Press.
- Beverage, J. P. et Futrell, J. C. (1986). Comparison of flume and towing methods for verifying the calibration of a suspended-sediment sampler. Numéro 86-4193. United State Geological Survey.
- Boisson, L., C. Berni, S. Proust and B. Camenen (2022). Experimental Study on Suspended Sediment Deposits over Floodplains. *Proceedings of the 39th IAHR World Congress, 19–24 June 2022, Granada, Spain*. DOI: 10.3850/IAHR-39WC252171192022703
- Boss, E., Pegau, W. S., Lee, M., Twardowski, M., Shybanov, E., Korotaev, G., & Baratange, F. (2004). Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C1).
- Branß T, Dittrich A, Núñez-González F (2016) Reproducing natural levee formation in an experimental flume. In: Constantinescu G, Garcia M, Hanes D (eds) *River flow 2016*. CRC Press, London, pp 1122–1128
- Camenen, B., Bonnefoy, A., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Sigaud, D., Deng, J. & Pénard, L. (2020a). Expérience de terrain lors de la chasse de la retenue d'Aigueblanche sur l'Isère (6 au 10 mai 2018) pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Rapport Irstea-EDF ; 75 p.
- Camenen, B., Buffet, A., Thollet, F., de Angelis, R., & Pénard, L. (2019). Expériences de terrain sur le site Arc-Isère pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Rapport Irstea-EDF ; 61 p.
- Camenen, B., Buffet, A., Dramais, G., Pénard, L., Thollet, F., Lagouy, M., Le Bescond, C, Lacroix, F. & Berni, C. (2017). Expérience de terrain lors de la chasse de l'Arc (1er juin 2017) pour l'estimation de la dynamique sédimentaire. Rapport Irstea-EDF ; 58 p.
- Camenen, B., Buffet, A., Thollet, F., Lacroix, F., Liger, L. & Pénard, L. (2018). Expérience de terrain lors de la chasse de la retenue d'Aigueblanche sur l'Isère (6 au 10 mai 2018) pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Rapport Irstea-EDF ; 53 p.

- Camenen, B., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Bonnefoy, A., Fretaud, T. & Pierrefeu, G. (2021). Evaluation d'une pompe péristaltique pour l'échantillonnage de suspension sableuse. *Hydrométrie 2021 : "De la mesure à la prise de décision"*, Société Hydrotechnique de France.
- Camenen, B., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Bonnefoy, A., Fretaud, T. & Pierrefeu, G. (2022). Evaluation of a peristaltic pump for sand suspension sampling. *Proc. 39Th IAHR Word Congress, Grenada, Spain, June 2022*. 9p.
- Camenen, B., Dramais, G., Bouche, M., Stepanian, J., Lauters, F., Reynaud, S., Menu, S., Pierrefeu, G., Le Coz, J., Laible, J., Thollet, F., Bonnefoy, A., Lagouy, M., Fretaud, T. & Nunes, P. (2022). Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021. Rapport CNR/EDF/Inrae, 91 p.
- Camenen, B., Herrero, A., Perret, E., Berni, C., Thollet, F., Buffet, A., Dramais, G., Le Bescond, C. & Lagouy, M. (2016). Estimation of the volume of a fine sediment deposit over a gravel bar during a flushing event. *River Flow, Proc. 8th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics : St Louis, Missouri, USA*. Constantinescu, G. / Garcia, M. / Hanes, D. (Eds.), 8p.
- Camenen, B., Jodeau, M., and Jaballah, M. (2013). Estimate of fine sediment deposit dynamics over a gravel bar using photography analysis. *International Journal on Sediment Research*, 28(2) :220-233
- Camenen B., & Melun G., 2021. Guide pour la mesure et la modelisation du transport solide. Office francais de la biodiversite. Collection *Guides et protocoles*. 160 pages.
- Camenen, B., Thollet, F., Buffet, A., Dramais, G., Le Bescond, C. & Lagouy, M. (2018b). Estimation of sand suspension in a secondary channel of an alpine river. *River Flow, Proc. 9th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Lyon, France, Sept. 2018*.
- Camenen, B., Thollet, F., de Angelis, R., Buffet, A., Dramais, G., Valette, E. & Zanker, S. (2020b). An estimation of the sand suspension in alpine rivers during a dam flushing event. *River Flow, Proc. 9th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics : Delft, The Netherlands*, p. 1-8
- Carbonneau, P. E., Bergeron, N. E., and Lane, S. N. (2005). Texture-based image segmentation applied to the quantification of superficial sand in salmonid river gravels. *Earth Surface Processes & Landforms*, 30 :121-127
- Church, M. A., McLean, D. G., and Wolcott, J. F. (1987). *Sediments transport in Gravel Bed Rivers*. John Wiley & Sons, USA. 123
- Deng, J. (2022). Dynamique des sédiments fins dans les systèmes de bancs de galets alternés d'une rivière alpine aménagée. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1.
- Deng, J., Piednoir, T., Pénard, L., & Camenen, B. (2022a). Estimation of fine sediment stocks in Alpine rivers. *Proc. 39th IAHR World Congress, Grenade, Espagne*.
- Deng, J., Drevet, T., Pénard, L., & Camenen, B. (2023a). Fine sediment dynamics over a gravel bar. Part 1: Validation of a image-base segmentation. *Catena*, 1-11. doi: 10.1016/j.catena.2023.106963
- Deng, J., Camenen, B. & Pénard, L. (2023b). Fine sediment dynamics over a gravel bar. Part 2: Impact of hydro-meteorological conditions. *Catena*, 1-14. doi: 10.1016/j.catena.2023.106978
- Deng, J., Camenen, B., Legout, C., & Nord, G. (2023c). Estimation of fine sediment stocks in alpine rivers including the sand fraction. *Sedimentology* (en révision).
- Dramais G., Camenen B. & Le Coz J. (2018). Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable. *La Houille Blanche*, 5-6, 96-105
- Dramais, G., Camenen, B., Le Coz, J., Topping, D. J., Peteuil, C. & Pierrefeu, G. (2019). A physically based method of combining ADCP velocity data with point samples to compute suspended-sand

discharge - Application to the Rhône River, France. Proc. SEDHYD 2019 Conf. on Sedimentation and Hydrologic Modeling, Reno Nevada, USA.

Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Pierrefeu, G. (2020) Sampling suspended sand in rivers using instantaneous horizontal bottle samplers: A comparison against other techniques. River Flow 2020 - Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics, 928–935

Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Fretaud, T., Pierrefeu, G. (2022). Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau ? LHB: Hydrosience Journal, 108(1), 2072783

Dynamique Hydro, 2017. Suivi morphologique des bancs alluviaux et annexes fluviales de l'Isère dans la Combe de Savoie et le Grésivaudan. Rapport annuel.

Dumas, D. (2008). The results of 10 years of daily observations of the flux of suspended matter in one of the main watercourses in the European Alps: The Isère at Grenoble (France) Comptes Rendus Geoscience , Vol. 339 p. 810-819

EDF (2018). Combe de Savoie - REX de l'expérimentation

EDF (2020). Plan de gestion expérimental du lit de l'Isère en Combe de Savoie : Bilan 2020 des suivis réalisés

EDF (2021). Plan de gestion expérimental du lit de l'Isère en Combe de Savoie : Bilan 2021 des suivis réalisés

EGIS (2016). Maîtrise d'oeuvre relative aux travaux de restauration du lit de l'Isère en Combe de Savoie (Rapport d'avant-projet V5) ; EGIS, CNR ingénierie, Ecosphère, pour le compte du SISARC

Filizola, N. et Guyot, J. L. (2009). Suspended sediment yields in the Amazon basin : an assessment using the Brazilian national data set. Hydrological Processes : An International Journal, 23(22):3207–3215.

Foster, I., Millington, R. et Grew, R. (1992). The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation. Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins, 210:51–62.

Gibbs, R. J. (1978). Light scattering from particles of different shapes. Journal of Geophysical Research: Oceans, 83(C1), 501-502

Gitto, A. B., Venditti, J. G., Kostaschuk, R. et Church, M. (2017). Representative point integrated suspended sediment sampling in rivers. Water Resources Research, 53(4):2956–2971.

Girel J. et al. (2003) Biodiversity and Land-Use History of the Alpine Riparian Landscapes (the example of the Isère River Valley, France). In: Mander & M. Antrop (eds) 2003, Multifunctional Landscapes, Volume 3: Continuity and Change, (167-200), WIT-Press, International series on Advances in Ecological Sciences, Southampton.

Glysson, G. et Gray, J. (2002). Total suspended solids data for use in sediment studies. In Proceedings of Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop.

Guertault, L., Camenen B., Peteuil, C., Paquier, A. & Faure, J.-B. (2016). One-dimensional modelling of suspended sediment dynamics in dam reservoirs. Journal of Hydraulic Engineering, 142(10.1061):1-9. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001157

Gupta, S., Berni, C. & Camenen, B. (2022). Dynamics of forced alternate gravel bars under unsteady flow: an experimental investigation. Proc. 39th IAHR World Congress, Grenada, Spain, June 2022. 8 p.

Gupta S., Laboratory experiments on fine sediment erosion and deposition in an alternated bar system and its impact on bar morphodynamics. Thèse en préparation, Université de Lyon 1.

- Haddad, H. (2022). Dynamique des dépôts de sédiments cohésifs dans les rivières à graviers : approche combinant suivi in situ et modélisation numérique. Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes.
- Haddad, H., Jodeau, M., Antoine, G., Claude, N. & Legout, C. (2020). Fine sediment deposits in gravel bed rivers: sensitivity analysis to particle properties using a 2D hydrodynamic and sediment model. *River Flow 2020*, doi: 10.1201/b22619-162
- Haddad, H., Jodeau, M., Legout, C., Antoine, G., & Droppo, I. G. (2022). Spatial variability of the erodibility of fine sediments deposited in two alpine gravel-bed rivers: The Isère and Galabre. *Catena*, 212(5, 106084) : 1-13. doi : 10.1016/j.catena.2022.106084
- INRAE, 2021, Impact de la scarification du sol et du desouchage en complément de l'essartage sur la dynamique de recolonisation de la végétation des bancs alluvionnaires de l'Isère - Rapport final 2021 – scarification en aval d'Aigueblanche
- Jaballah, M., Camenen, B., Pénard, L., & Paquier, A. (2015). Alternate bar development in an alpine river following engineering works. *Advance in Water Res.* 81:103-113.
- Jaffrin, M. Y. & Shapiro, A. H. (1971). Peristaltic pumping. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 3: 13-37.
- Jourdain, C., 2017. Action des crues sur la dynamique sédimentaire et végétale dans un lit de rivière à galets : L'Isère en Combe de Savoie. Thèse de Doctorat. Université de Grenoble.
- Jourdain, C., Belleudy, P., Tal, M., & Malavoi, J. R. (2017). The role of hydrology on vegetation removal in a heavily managed gravel bed river: the Isere, Combe de Savoie, France. *Geomorphologie-Relief Processus Environnement*, 23(3), 203–217.
- Jouzeau, P. (2020). Quantification des incertitudes sur les flux particuliers dues aux courbes de tarage turbidité - MES. Rapport de stage de Master 1, Polytech'Nice Sophia Antipolis25 p.
- Ikeda, S. (1984). Prediction of alternate bar wavelength and height. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110 (4), 371-386.
- Kuhnle, R. A. et Wren, D. G. (2003). Breakout session i, suspended sediment measurement: Data needs, uncertainty, and new technologies. In *Proceedings of the Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop*, pages 8–15.
- Laible, J. (2020-2023) Thèse en cours. Quantification de la dynamique sableuse dans la Basse-Isère jusqu'au Rhône. Université de Lyon.
- Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Pierrefeu, G., Mourier, B., Lauters, F., Dramais, G. (2023) Comparison of grain size distribution measurements of sand-fine sediment mixtures using laser diffraction systems. *Accepté dans Journal of Soils and Sediments*.
- Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Pierrefeu, G. & Lauters, F. (2022). Determination of flux and concentration of suspended sand time series using an acoustic method. *Proc. 39th IAHR Word Congress, Grenada, Spain, June 2022*. 8 p.
- Lanuru, M. (2004). The spatial and temporal patterns of erodibility of an intertidal flat in the East Frisian Wadden Sea, Germany. Phd thesis. GKSS.
- Laronne, J. B., Outhet, D. N., Carling, P. A., & McCabe, T. J., 1994. Scour chain employment in gravel bed rivers. *Catena*, 22(4), 299-306.
- Launay, M. (2014). Flux de matières en suspension, de mercure et de PCB particuliers dans le Rhône, du Léman à la Méditerranée. Thèse de l'Université de Lyon, 432 p.
- F. Lauters, E. Laperrousaz, B. Camenen, J. Le Coz, F. Thollet, et al.. Vers une gestion sédimentaire durable de l'aménagement hydro-électrique Arc-Isère. *Houille Blanche revue internationale de l'eau*, 2012, p. 19 - p. 25.

- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., & Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573–587.
- Le Coz J., Camenen B., Dramais G., Ribot-Bruno J., Ferry M. & Rosique. J.-L. (2011). Guide technique: Police de l'eau pour le contrôle des débits réglementaires. Editions Onema.
- Legoût C., Droppo I.G., Coutaz J., Bel C., Jodeau M. (2018). Assessment of erosion and settling properties of fine sediments stored in cobble bed rivers : the Arc and Isère alpine rivers before and after reservoir flushing. *Earth Surface Processes and Landforms* 43(6) 1295-1309.
- Legoût C., Freche G., Biron R., Esteves M., Navratil O., Nord G., Uber M., Grangeon T., Hachgenei N., Boudevillain B., Voiron C., Spadini L. (2021). A critical zone observatory dedicated to suspended sediment transport: the meso-scale Galabre catchment (southern French Alps). *Hydrological Processes* 35 (3). doi.org/10.1002/hyp.14084.
- Li, J., Claude, N., Tassi, P., Cordier, F., Crosato, A., & Rodrigues, S. (2020). Implementation of a novel approach accounting for the influence of vegetation on sediment transport in GAIA. In Online proceedings of the papers submitted to the 2020 TELEMAR-MASCARET User Conference October 2020 (pp. 2-8).
- Li, J., Claude, N., Tassi, P., Cordier, F., Vargas-Luna, A., Crosato, A., & Rodrigues, S. (2022). Effects of vegetation patch patterns on channel morphology: A numerical study. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127, e2021JF006529. doi: 10.1029/2021JF006529
- Liébault, F., & Laronne, J. B. (2008). Evaluation of bedload yield in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers: the case of the Esconavette Torrent (Southern French Prealps). *Geodinamica Acta*, 21(1-2), 23-34.
- Loire R., Kondolf G.M., Malavoi J.R., Melun G., & Piégay H., (2021). Lâchers d'eau morphogènes : guide de mise en oeuvre. Office français de la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 102 pages
- Long, Y. (1989). Manual on operational methods for the measurement of sediment transport. World Meteorological Organization Manual, (686).
- Masquelier, F. (2022). Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon. Rapport de stage M2, INRAE, Université de Reims-Champagne-Ardenne.
- McNeil, W. J., & Ahnell, W. H. (1964). Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. US Department of the Interior, Bureau of Commercial Fisheries. Special Scientific Report-Fisheries, 469, 17.
- Migniot C. (1968). Etude des propriétés de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. Communication présentée au CT de la SHF le 22 mars 1968
- Migniot C. (1989). Tassement et rhéologie des vases – première partie et seconde partie. *La Houille Blanche*, 75(1): 11-29 et 75(2) : 95-112, doi : 10.1051/lhb/1989001 / 10.1051/lhb/1989006
- Misset, C., Recking, A., Legout, C., Viana-Bandeira, B., and Poirel, A. (2021). Assessment of fine sediment river bed stocks in seven Alpine catchments. *Catena*, 196 :104916
- Morlot, T., Perret, C., Favre, A.-C., & Jalbert, J. (2014). Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties: Quality and station management indicators. *Journal of Hydrology*, 517, 173–186
- Navratil, O., Esteves, M., Legout, C., Gratiot, N., Némery, J., Willmore, S., & Grangeon, T. (2011). Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology*, 398(3-4), 246–259

- Pavaux, A. (2022). Comparaison de préleveurs et estimation des incertitudes de mesure. Rapport M1. Université de Lyon.
- Pfannkuche, J., & Schmidt, A. (2003). Determination of suspended particulate matter concentration from turbidity measurements: particle size effects and calibration procedures. *Hydrological Processes*, 17(10), 1951-1963.
- Piednoir, T. (2021). Evaluation du potentiel de reprise des stocks de sédiments fins dans une rivière alpine. Rapport de fin d'étude, Ecole d'ingénieur Polytech'Tours.
- Popoff, N. (2021) Ecologie et restauration de la Petite massette (*Typha minima* Hoppe). Biotechnologies. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2021. Français. NNT : 2021GRALS039. tel-03660094
- Recking, A., Regazzoni, M., Lauters, F., Zanker, S., Geay, T., Camenen, B., Brunet, L., & Fontaine, F. (2020). Measurement of sand transport with a submerged pump: presentation of the results of a test campaign carried out on the Isère River in July 2019. *Proc. River Flow conf.*, Delft, Pays-Bas.
- Sengupta, M. E., Andersen, T. J., Dalsgaard, A., Olsen, A., & Thamsborg, S. M. (2012). Resuspension and settling of helminth eggs in water: Interactions with cohesive sediments. *Water Research*, 46(12), 3903–3912. [Doi: 10.1016/j.watres.2012.04.033](https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.033)
- S.I.S.A.R.C (2017). Retour d'expérience : conséquences de la chasse du barrage d'Aigueblanche sur les bancs restaurés en Combe de Savoie.
- S.I.S.A.R.C (2018a). Retour d'expérience : conséquences des crues de janvier 2018 sur les bancs restaurés en dans le lit de l'Isère en amont de la confluence avec l'Arc.
- S.I.S.A.R.C (2018b). Retour d'expérience : conséquences de l'expérimentation de débits morphogènes sur le lit de l'Isère restauré en amont de la confluence avec l'Arc.
- Sutherland, T. F., Lane, P. M., Amos, C. L., & Downing, J. (2000). The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. *Marine Geology*, 162(2), 587-597.
- Thollet, F., Le Coz, J., Antoine, G., François, P., Saguintaah L., Launay, M., & Camenen, B. (2013). Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 4, 50-56.
- Thollet, F., Rousseau, C., Camenen, B., Boubkraoui, S., Branger, F., Lauters, F., & Némery, J. (2021). Long term high frequency sediment observatory in an alpine catchment: the Arc-Isère rivers, France. *Hydrological Processes*.
- Topping, D. J., Rubin, D. M., Wright, S. A. et Melis, T. S. (2011). Field evaluation of the error arising from inadequate time averaging in the standard use of depth-integrating suspended sediment samplers. US Geological Survey, (Professional Paper 1774).
- Topping, D.J. & Wright, S.A. (2016). Long-term continuous acoustical suspended-sediment measurements in rivers-Theory, application, bias, and error (No. 1823). US Geological Survey
- Wendling, V. (2015). Développement d'un système de caractérisation des agrégats et des floccs en suspension. Thèse de doctorat. Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes
- Wengrove, M. E., Foster, D. L., Kalnejais, L. H., Percuoco, V., & Lippmann, T. C. (2015). Field and laboratory observations of bed stress and associated nutrient release in a tidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 161, 11–24. [Doi: 10.1016/j.ecss.2015.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.04.005)

6 ANNEXES

Annexe I : Mesures de l'altération des marnes

Le travail de thèse de Coline Ariagno a permis de définir un protocole pour le suivi in-situ de l'état d'altération du régalithe de surface sur des badlands marneux (Ariagno et al, subm. to ESPL). Le protocole proposé consiste à mesurer régulièrement au cours de l'année plusieurs variables caractéristiques du régalithe de surface afin de quantifier son évolution saisonnière. Connaître l'évolution saisonnière de l'altération peut par la suite permettre d'appréhender son influence sur l'érosion au cours de l'année.

Les variables proposées pour le suivi sont les suivantes : résistance mécanique, diamètre médian des particules, teneur en eau et densité. La fréquence de mesure doit permettre de suivre l'évolution saisonnière liée à l'altération hivernale par gélifraction et à l'érosion de surface par les pluies et le ruissellement. On préconise donc une mesure en fin d'hiver puis tous les trois mois. Les mesures sont réalisées à chaque fois sur la même placette, d'environ un mètre carré. Il peut être utile de suivre plusieurs placettes sachant que l'exposition et l'orientation de la surface par rapport à la schistosité du substrat peuvent influencer l'efficacité de l'altération.

La résistance mécanique est mesurée à partir d'un mini-pénétrromètre portable de terrain. Vingt mesures sont réalisées en des points aléatoires de la parcelle de suivi pour caractériser la valeur moyenne et la variabilité spatiale à petite échelle de cette grandeur.

La granulométrie est mesurée en laboratoire. Un échantillon de régalithe est prélevé dans une zone non-perturbée à proximité de la parcelle suivie, dans les 2.5 premiers cm sous la surface. Au laboratoire, cet échantillon est préalablement séché à l'étuve à 70°C pendant 48h puis pesé. L'échantillon est ensuite tamisé dans des tamis de taille 8mm, 4, 2, 1, 0.4, 0.2 et 0.08 mm. Le tamisage se fait manuellement et sous un jet d'eau doux, pour séparer les agrégats liés par des particules fines sans briser les particules de marnes qui sont très fragiles. Les fractions séparées sont ensuite séchées de nouveau 48h à 70°C puis pesées. La fraction fine < 0.08mm est obtenue par soustraction entre le poids sec initial et la somme des poids secs des autres fractions. Le diamètre médian D50 est obtenu par une interpolation linéaire entre deux tailles de tamis dans la relation entre taille des tamis et masse cumulée.

La teneur en eau et la densité sont mesurées à partir d'échantillons prélevés dans des cylindres de 5 cm de diamètre et 2.5 cm de hauteur. Trois échantillons cylindriques sont prélevés sur la parcelle à chaque visite, pesés humides, séchés 3 à 6 jours à 70°C puis pesés secs. La teneur en eau est ensuite calculée par l'expression suivante :

$$\vartheta = \frac{\rho_s}{\rho_w} * \frac{m_h - m_s}{m_s}$$

Ou ρ_s et ρ_w sont les masses volumiques de la roche saine et de l'eau, et m_h et m_s sont les masses humides et sèches de l'échantillon. La densité de l'échantillon est obtenue en divisant la masse sèche par le volume du cylindre. Les valeurs de densité et de teneurs en eau obtenues sur les trois échantillons sont ensuite moyennées.

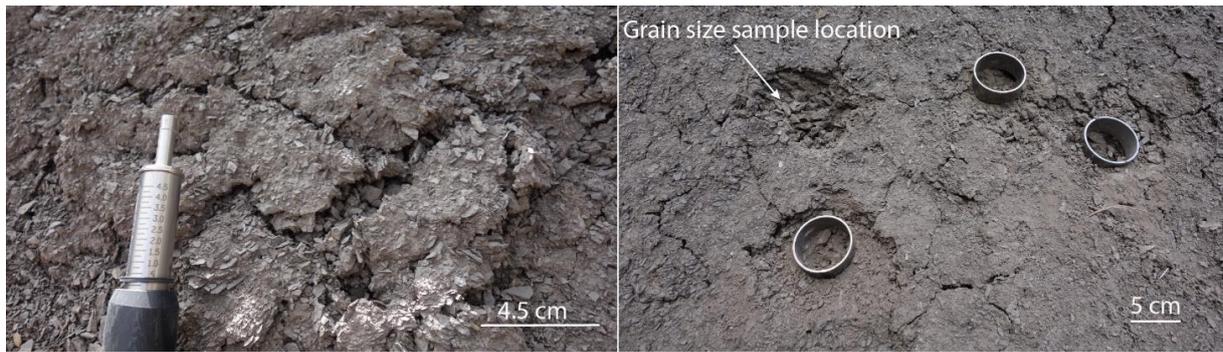


Figure 43: Mesure de l'état d'altération avec mini-pénétrömètre (C) et cylindres pour prélèvements (D)

Le protocole initialement testé se basait sur ces quatre variables pour décrire l'état d'altération du régolithe. Les résultats de 2.5 années de suivi sur des badlands marneux ont montré que la variabilité la plus importante était celle de la résistance mécanique de la surface, qui était fortement corrélée à celle du diamètre médian, marqueur de l'état d'altération, et faiblement reliée à la teneur en eau. Il a donc été proposé d'adopter le D50 comme mesure de l'état d'altération de la surface du régolithe. Un protocole simplifié pour suivre l'état de l'altération pourrait donc consister à suivre uniquement le D50 des particules de surface (i.e. dans les 2.5 premiers cm).

Annexe II : Mesures de la proportion de sédiments fins dans la matrice graveleuse

Le protocole de mesure de la fraction fine (argiles, limons, et sables) dans le lit hors eau de la rivière se base sur les travaux de Misset et al. (2021) et Deng et al. (2022a,d). La méthode consiste en un échantillonnage des sédiments fins sur une placette formée par un cadre de 30 cm de côté (soit de surface $A_s = 0.09 \text{ m}^2$). Deux échantillons peuvent être récupérée, en surface sur une épaisseur $\delta_s \approx d_{90}$, et en subsurface sur une épaisseur $\delta_{sb} \approx 2d_{90}$.

Concernant le protocole de Misset et al. (2021) concernant les très fins uniquement (argile et limons), l'ensemble de l'échantillon est mis dans un bac avec un volume d'eau connu V_c (20 L). Les plus gros cailloux sont lavés puis retiré. L'ensemble de l'échantillon est ensuite agité (mouvement en huit). Un échantillon d'eau est alors récupéré avec un flacon de 250 mL (F1) après avoir attendu 4 s afin que la fraction sableuse ait sédimenté. Le stock de sédiments très fins dans le lit s'exprime ainsi pour la surface :

$$S_{tf,s} = \frac{C_s V_c}{A_s \delta_s}$$

où C_s est la concentration de sédiments dans le flacon (mesurée en laboratoire). Afin de gagner du temps, l'échantillon de subsurface est nettoyé ensuite dans le même bac et en suivant la même méthode (échantillon récupéré dans le flacon F2). Le stock en subsurface, s'exprime tel que :

$$S_{tf, sb} = \frac{(C_{sb} - C_s) V_c}{A_s \delta_{sb}}$$

où C_{sb} est la concentration de sédiments dans le flacon F2 (mesurée en laboratoire). Ce protocole a été optimisé pour multiplier les échantillons. Il peut être réalisé en une dizaine de minutes à deux opérateurs.

(a)



(b)



Figure 44: Photographie présentant le protocole de mesure : (a) création d'une placette, (b) tamisage d'un échantillon au dessus d'un bac

Dans le protocole proposé par Deng et al. (2022d), un tamisage de l'échantillon est réalisé afin d'évaluer une granulométrie totale de l'échantillon, spécifiquement sur les sables. Des tamis de 100 μm , 500 μm , 2 mm, et 10 mm sont ainsi rajouté au-dessus du bac. Un volume V_c est utilisé pour le tamisage et le nettoyage des cailloux (des arrosoirs de 6 L sont utilisés). La masse des refus à 2 mm et 10 mm est mesurée sur le terrain ; la masse des refus à 100 μm et 500 μm est mesurée en laboratoire après séchage des échantillons. Une fois l'ensemble de l'échantillon tamisé, un échantillon d'eau est récupéré

avec un flacon de 250 ml après homogénéisation du mélange dans le bac (agitation en huit). Contrairement à la méthode de Misset et al. (2021), il a été considéré que l'estimation de l'épaisseur de la couche de surface n'avait que peu de sens car la surface est loin d'être plane, le stock de surface est donc exprimé en kg/m^2 et non kg/m^3 :

$$S_{tf,s} = \frac{M_{s,100} + M_{s,500} + C_s V_c}{A_s}$$

avec $M_{s,100}$ la masse du refus à 100 μm et $M_{s,500}$ la masse du refus à 500 μm pour l'échantillon en surface. Pour le stock de subsurface, l'expérimentation est reprise à zéro avec donc un nettoyage du bac au préalable, on obtient donc :

$$S_{tf,sb} = \frac{M_{sb,100} + M_{sb,500} + C_{sb} V_c}{A_s \delta_{sb}}$$

Il est à noter que la méthode proposée par Deng et al. (2022d) permet une analyse totale de la granulométrie de surface et subsurface bien qu'un possible biais puisse apparaître lié au volume de l'échantillon relativement faible (Church et al., 1987). Cette méthode est par contre plus lourde que celle proposée par Misset et al. (2021) et nécessite environ 45 min à 3 opérateurs.

Il est possible d'appliquer ces méthodes en eau en utilisant un cylindre de prélèvement, communément appelé McNeil (Mc Neil & Ahnell, 1964). Ce cylindre de diamètre connu (14.5 cm pour le cas présenté ci-dessous) est enfoncé sur une épaisseur de substrat de 15 cm ; il faut mesurer le niveau d'eau dans le tube permettant alors d'évaluer le volume d'eau V_c . L'échantillon est récupéré à la main et l'analyse peut se faire soit par la méthode de Misset et al. (2021) en récupérant un échantillon d'eau directement dans le tube avec un flacon de 250 mL, soit par la méthode de Deng et al. (2022d) en analysant la granulométrie de l'échantillon total récupéré (Masquelier, 2022). Par contre, cette méthode ne permet pas de distinguer surface et sursurface et une perte des éléments fins est possible dans le cas d'un enfoncement difficile du tube dans la matrice (Masquelier, 2022).



Figure 45: Utilisation en eau et présentation du cylindre de prélèvement (McNeil & Ahnell, 1964).

Annexe III : Placette Peinte

Le suivi de la mobilité et du transport sédimentaire par le biais d'un marquage colorimétrique est ancien et toujours fréquemment. Cette méthode est rapide à mettre en place, efficace, et économique. Les sédiments peints peuvent être utilisés à la fois comme traceurs, afin d'obtenir des informations sur les distances de transport ou les sources sédimentaires, et comme marqueurs du seuil de mise en mouvement des particules.

Les méthodes de mesure granulométriques par analyse photographiques sont très complémentaires de l'utilisation du traçage colorimétrique, en particulier dans le cas où l'on peint une surface sans remaniement des sédiments.

Qualification de la mobilité (Jourdain 2017)

A chaque date du suivi régulier, la mobilité observée sur les placettes peintes a fait l'objet d'une Caractérisation qualitative, utilisant des classes illustrées sur la Figure 46 :

- aucune mobilité ni dépôt,
- dépôt de sédiments fins,
- mobilité partielle,
- disparition de la placette peinte,

Les conditions de mobilité partielle peuvent être sous-catégorisées :

- mobilité partielle faible : seulement quelques particules ont bougé, couvrant moins de 10% de la surface de la placette
- mobilité partielle moyenne : de nombreuses particules ont bougé, mais les limites de la placette sont toujours clairement visibles, la placette n'est pas complètement déstructurée.
- mobilité partielle forte : seules quelques particules sont restées en place, couvrant moins de 10% de la surface de la placette. On ne distingue plus les contours originels de la placette.

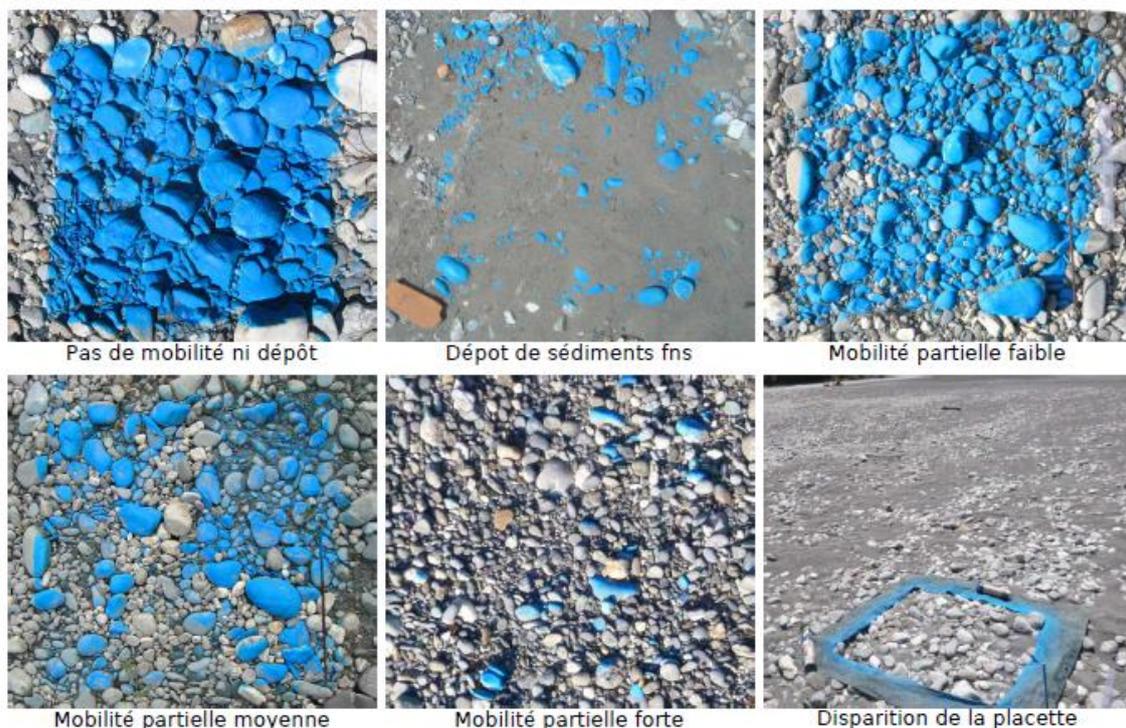


Figure 46 : Classification des impacts des crues sur les placettes peintes (Jourdain 2017)

Dans le cadre de ce projet, sur chaque banc étudié, 15 parcelles peintes de 75 cm de côté sont suivies pour évaluer l'intensité du transport solide, en particulier le charriage. Pour des raisons pratiques, les

parcelles ont des positions constantes si bien qu'elles peuvent être constituées d'une proportion variable d'alluvions grossières (graviers et galets) et fines (sables et limons) en fonction de l'évolution de la granulométrie de la surface des bancs.

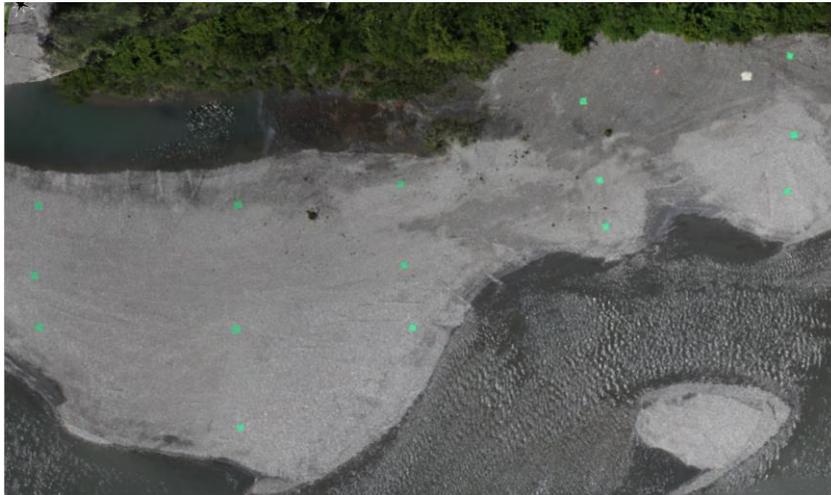


Figure 47 : exemple de mise en place de placette sur un banc de l'Isère

Lors d'une campagne N, le levé des parcelles et leur interprétation sont réalisés dans l'ordre chronologique suivant :

- Sur le terrain :
 - recherche et levé de la parcelle au GPS,
 - évaluation visuelle du taux de mise en mouvement des particules (pourcentage de la surface érodée),
 - 1ère prise de vue verticale de la parcelle érodée,
 - réinitialisation de la parcelle (remise en peinture),
 - 2ème prise de vue verticale de la parcelle peinte.
- Au bureau :
 - en cas de disparition complète de la parcelle, comparaison de l'altitude des levés GPS (campagnes N-1 et N) pour déterminer si cette disparition résulte d'une mise en mouvement intégrale des particules ou de son recouvrement (ex. : dépôts de fines sans mobilisation des particules grossières constituant la parcelle),
 - confirmation ou correction du taux de mise en mouvement en fonction de ce différentiel altimétrique et par comparaison des photographies (la 2^{ème} photographie après peinture de la campagne N-1 et la 1^{ère} photographie avant peinture de la campagne N),
 - évaluation de la taille de la plus grande particule mise en mouvement par comparaison de ces photographies.

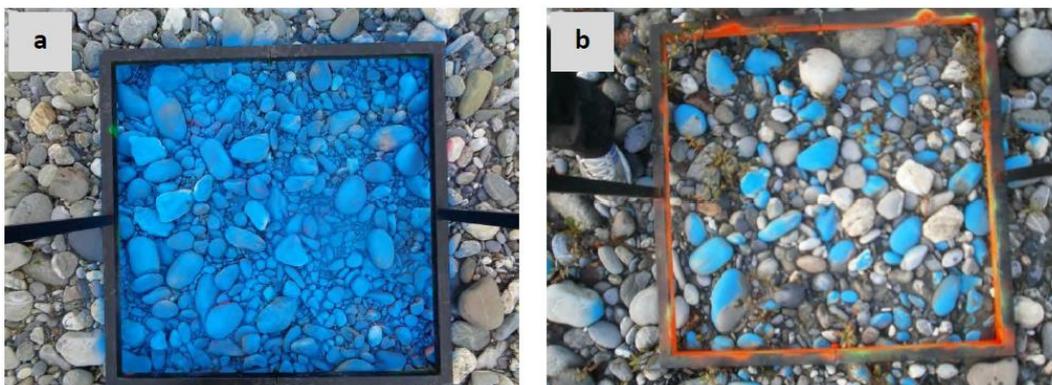


Figure 48 : Exemple de parcelle peinte en mars (a) et octobre 2016 (b) (Dynamique Hydro, 2017)

Annexe IV : Chaîne d'érosion

Les chaînes d'érosion permettent de mieux appréhender la cinétique d'érosion / dépôt sur un banc au cours d'une crue.

Pose de chaînes d'érosions – méthodologie générale

Le principe de la pose des chaînes repose sur les points suivants :

- Montage d'une chaîne en acier galvanisé de 1,5 m de longueur à un cône métallique (1). Ce cône métallique amovible est disposé au bout d'un tube de fonçage, lui-même métallique, qui va permettre d'enficher la chaîne à environ 0,80 m de profondeur dans le banc sédimentaire.
- Le tube est ensuite retiré ((2) et (3)) ;
- La chaîne est tendue dans le banc sédimentaire afin que le cône puisse jouer un rôle d'ancrage suffisant (4).

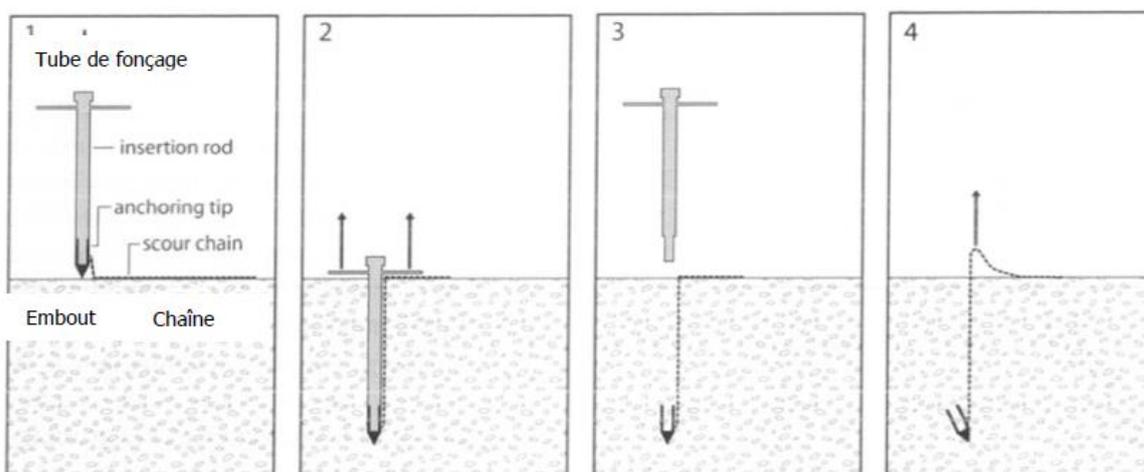


Figure 49 : Schéma de principe de la mise en place d'une chaîne d'érosion (d'après LIEBAULT F., LARONNE J.B., 2008)

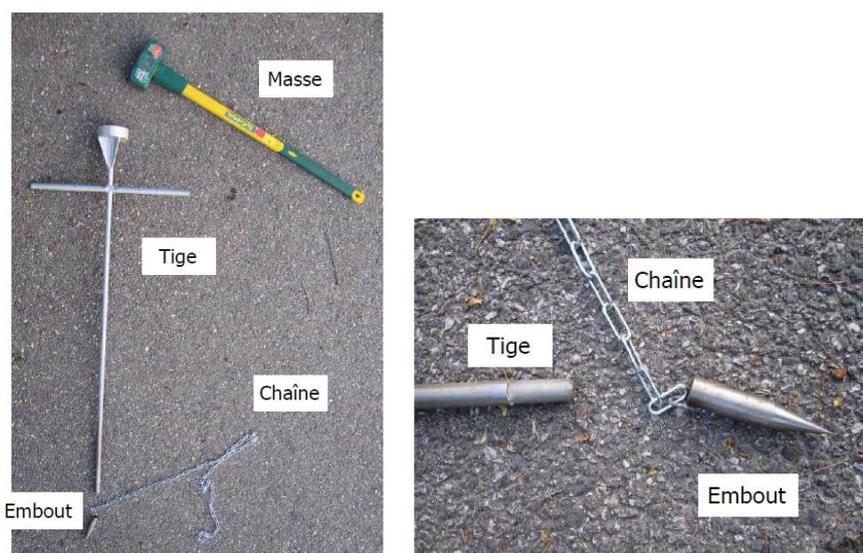


Figure 50 : Matériel utilisé pour l'installation d'une chaîne d'érosion (Photo BURGEAP)

Principe de fonctionnement

Au cours d'une crue, l'activité morphodynamique se décompose en deux phases :

1. Une phase érosive où la couche superficielle de sédiment est érodée. Dans ce cas de figure, la longueur de la chaîne L s'allonge d'autant que l'épaisseur d'érosion.

2. Une phase de dépôt en fin de crue durant laquelle les matériaux se déposent sur le fond du lit. La méthodologie est basée sur l'expérience de Laronne et al., 1994.

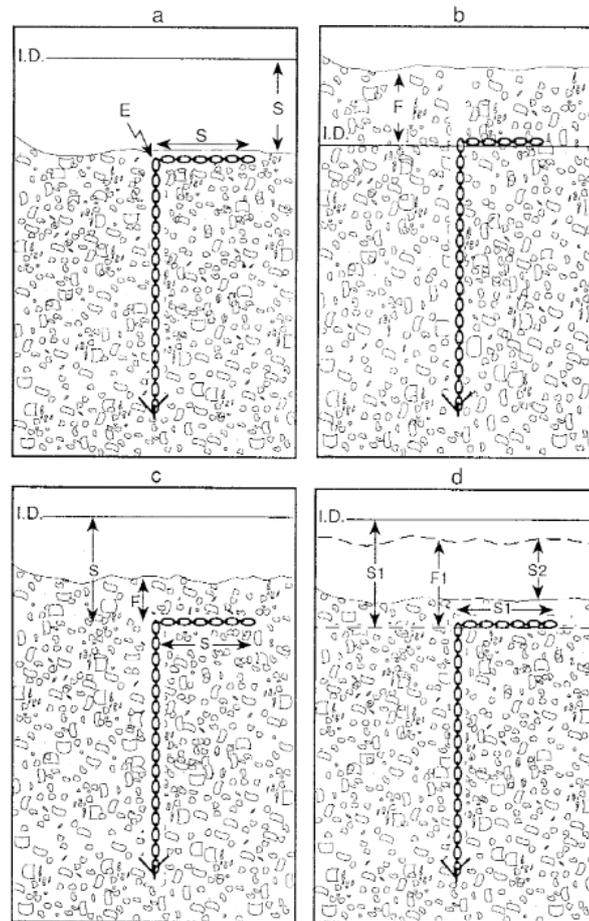


Fig. 1. (a) Bed scours to a depth S below the initial datum (I.D.). S is equal to the length of the horizontal chain from the elbow (E) to its extremity. (b) Bed fills to a depth F above the initial datum (I.D.). (c) Bed scours to a depth S and thereafter the bed fills F . The net change in elevation as measured by conventional resurveying is equal to $S - F$. (d) Initially scour to a depth $S1$, thereafter fill to $F1$, and ultimately scour $S2$.

Figure 51 : Principe de mise en œuvre des chaînes d'érosion (Laronne et al., 1994)

Les chaînes peuvent être pré-géolocalisées. Elles sont recherchées localement avec un détecteur de métaux.

Dans le cadre du projet, sur chaque banc suivi, un minimum de 2 chaînes d'érosion ont été régulièrement suivies pour évaluer l'intensité du transport solide dans la dimension verticale. Après une crue, la recherche du point d'inflexion des chaînes permet de repérer la profondeur maximale d'érosion. Couplée au suivi topographique du lit au droit de la chaîne, cela permet d'évaluer l'épaisseur moyenne de la couche active de la crue (moyenne entre l'épaisseur maximale érodée et l'épaisseur des dépôts).

Annexe V : Protocole de mesure de l'épaisseur de fine, de l'évolution altimétrique et de la couverture végétale des bancs par carroyage

Le suivi des sédiments fins a été effectué à partir d'un protocole par points positionnés au GPS afin d'être parfaitement comparables entre chaque observation. Un carroyage a été établi sur la surface des bancs et les zones immergées adjacentes accessibles à pied.

Les carroyages ont été réalisés avec un espacement de 5X5 m entre chaque point. Au total, le nombre de points est de 428 sur le banc d'Albertville, 615 sur le banc de Fréterive, 444 sur le banc de Montmélian et 534 sur le banc de Saint-Laurent. Sur chaque point ont été mesurés : l'épaisseur de fines à la pige avec une précision de quelques millimètres (dans ce document les « fines » concerneront les limons et les sables) et le taux de recouvrement par les fines en 6 classes (0-5%, 5-25%, 25-50%, 50-75%, 75-95% et 95-100%). En complément, une granulométrie EVHA a été effectuée. Les relevés ont été effectués à plusieurs périodes.

Le carroyage a été initialement défini sur les différents bancs exondés à la mise en œuvre du protocole mais également aux zones inondées mesurables à pied (environ 1m de hauteur d'eau et faibles vitesses des écoulements). Certains de ces points sont inondés 90 à 100% du temps. Nous considérerons toutefois cette entité comme étant « le banc » même si la surface est supérieure au « banc émergé » stricto-sensu. Ce dernier est en effet difficile à définir à cause des variations de niveau d'eau.

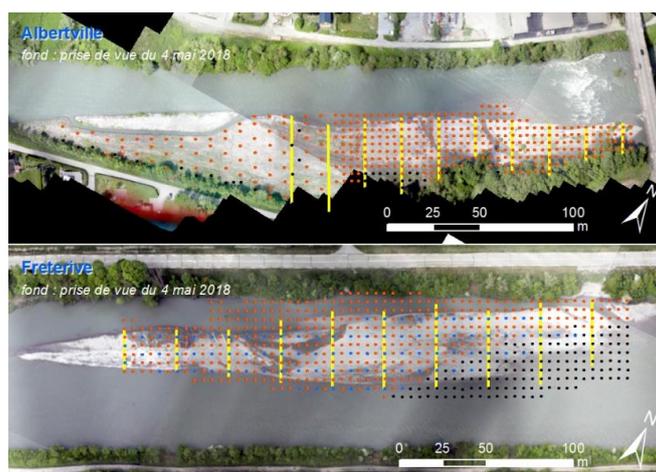


Figure 52 : Exemple de carroyage sur 2 bancs en amont de l'Arc. L'ensemble des données du protocole sont recueillies sur chaque point. Les transects en jaune permettent quant à eux de décrire la végétation (Dynamique Hydro, 2017)

Des relevés topographiques au DGPS ont également été effectués pendant toute la période. Ces mesures ont une précision altimétrique de 4-5 cm en moyenne. Les levés topographiques correspondent aux points de carroyages présentés précédemment.

Enfin, l'évolution de la végétation a été étudiée à partir de 10 transects par banc. Les transects sont répartis de l'amont à l'aval des bancs et sont positionnés au GPS. Sur chaque transect, un point de mesure est réalisé tous les 2 m. Sur chaque point, le taux de couverture végétale en surface (6 classes ; 0-5% 5-10% 10-25% 25-50% 50-75% 75-100%) et le type de végétation dominante (aucune, herbacées, arbrisseaux, arbustes, arbres) sont relevés.

Nous donnons ici à titre illustratif les résultats de mesures sur un banc permettant de voir la complémentarité des mesures réalisées entre l'évolution de la topographie et l'évolution de l'épaisseur et du pourcentage de fines :

Evolution altimétrique globale

L'évolution topographique moyenne sur la période de basses eaux (Juillet 2020 à Mars 2021) sur le banc est nulle : 2 cm en moyenne et dans la gamme d'imprécision des mesures (Figure 53 a). Pendant la période des hautes eaux (mars à juillet 2021), le banc s'est exhaussé de 14 cm en moyenne (Figure 53 b). Les évolutions sont plus prononcées en aval du pont (+24 cm) qu'en amont (+8 cm). C'est sur les 2 rangées de points en aval et rive droite (côté chenal principal) que l'exhaussement est maximal (+33 cm).

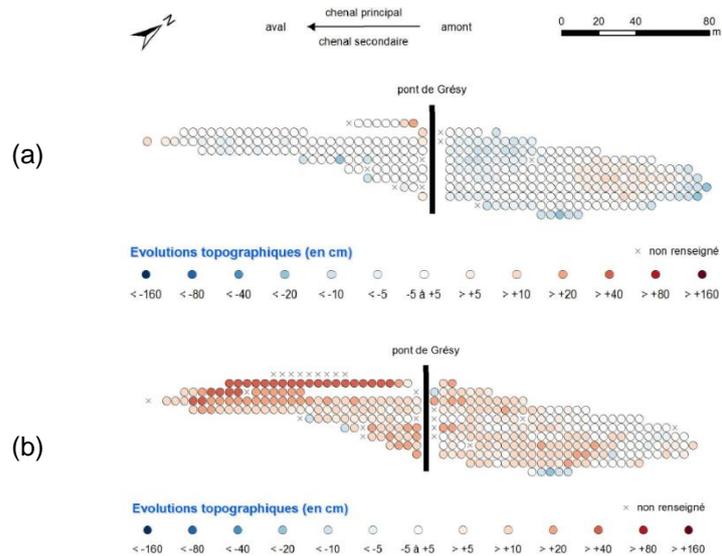


Figure 53 : Evolutions topographiques du banc n°1 entre juillet 2020 et mars 2021 (a) puis entre mars et juillet 2021 (b).

Evolution des dépôts de fins

Sur le banc n°1, pendant la période des basses eaux, le pourcentage moyen de fines a **diminué de 8%** (Figure 54 a). Cette diminution est plus franche en amont du pont (-15%) alors que la partie aval évolue globalement peu et positivement (+3%). Cette très légère augmentation provient de dépôts fins derrière une pile du pont (1^{ère} rangée en rive droite aval du pont).

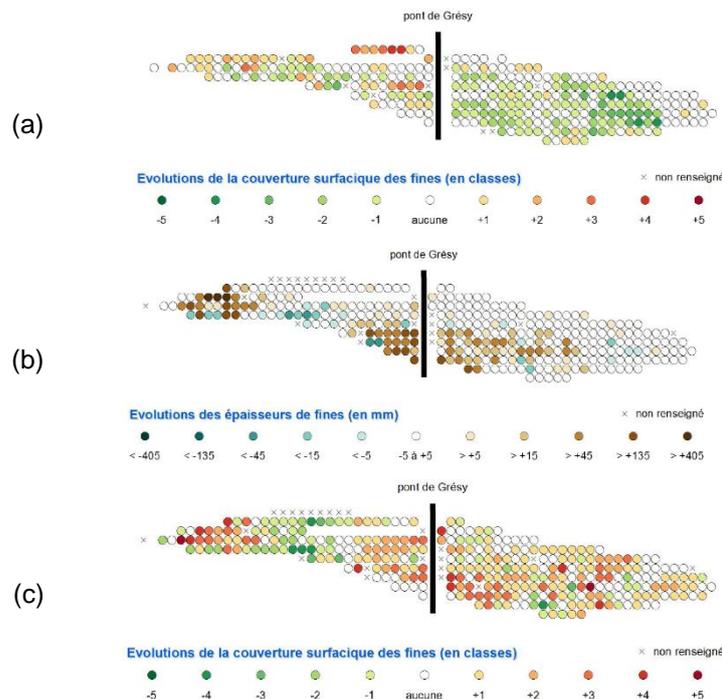


Figure 54 : Evolutions de la couverture surfacique de fines du banc n°1 entre juillet 2020 et mars 2021 (basse eau) (a), évolutions de l'épaisseur de fines (b) et de la couverture surfacique de fines (c) du banc n°1 entre mars et juillet 2021 (hautes eaux).

En période de hautes eaux, on observe une **augmentation de +12% et +0,22 cm** (Figure 54 b et c). La couverture surfacique augmente davantage en amont du pont (+15%) qu'en aval (+7%). Les épaisseurs augmentent surtout en queue de banc (+10,7 cm) et sur la bordure rive gauche proche du pont (+0,54 cm). Ces dépôts de fins (+0.22 cm en moyenne) sont à comparer à l'exhaussement moyen du banc de 14 cm qui est donc principalement dû au charriage de matériaux plus grossiers.

Annexe VI : Mesures in situ du taux d'érosion

Deux appareils, l'EROMES et le CSM, ont été utilisés pour mesurer l'érodibilité des sédiments in situ. Les paragraphes suivants décrivent ces appareils (extrait de la thèse [Haddad \(2022\)](#)).

EROSion MEasurement System (EROMES)

Description de l'appareil

Le prototype de l'EROMES (Figure 55) réalisé à l'IGE est basé sur la description de la littérature ([Andersen, 2001](#); [Lanuru, 2004](#); [Sengupta et al., 2012](#); [Wengrove et al., 2015](#)). La chambre d'érosion est un cylindre de 10 cm de diamètre et de 25 cm de hauteur. Une hélice s'insère par le haut du dispositif et l'utilisateur peut ajuster la hauteur de l'hélice par rapport à la surface du sédiment. L'hélice est mise en rotation par un moteur. Le nombre de tours par minute varie suivant le réglage de la tension d'alimentation par l'opérateur durant l'essai. Un turbidimètre s'insère également par le haut du dispositif et s'ajuste pour mesurer la turbidité en continu à une distance fixe de la surface du sédiment. Des déflecteurs situés à la périphérie du cylindre permettent de limiter la création d'un vortex dans la chambre d'érosion (Figure 56). Une mesure EROMES dure entre 10 et 20 min selon l'état de consolidation du sédiment. En ajoutant les phases d'installation de l'appareil et de remplissage d'eau, il faut prévoir 30 min pour une mesure.

Protocole de mesure

La réalisation d'une mesure avec l'EROMES suit les étapes suivantes :

1. La chambre de l'EROMES est insérée délicatement de quelques centimètres dans le sédiment.
2. L'hélice est installée et la distance hélice/sédiment est ajustée à environ 4 cm : cette distance est celle pour laquelle la calibration a été réalisée (voir section II.2.3.2 [Haddad 2022](#)).
3. La chambre est remplie d'eau claire (eau du réseau) délicatement pour ne pas éroder le sédiment dès le remplissage. Un volume d'environ 1 L est ainsi apporté dans la chambre, jusqu'au niveau du haut du déflecteur.
4. Le turbidimètre est inséré à environ 3 cm de l'hélice (7 cm du sédiment) et l'enregistrement est lancé avec une acquisition toutes les 5 s.
5. L'essai d'érosion peut alors commencer, le moteur est mis en route au premier palier et la tension d'alimentation est augmentée chaque minute de 0.5 V. L'opérateur note toutes les minutes la valeur de la tension d'alimentation et la turbidité ainsi que d'éventuels commentaires sur l'érosion.
6. L'essai se poursuit jusqu'à avoir une érosion significative dans la chambre de l'EROMES ou lorsque la tension maximale d'alimentation (dernier palier à 11.5 V) est atteinte.
7. Un prélèvement de 30 mL est systématiquement réalisé en fin d'essai pour pouvoir vérifier la calibration de la relation MES-turbidité établie préalablement en laboratoire avec des sédiments du site d'étude (voir section II.2.3.1 [Haddad 2022](#)).

Pour les sédiments sableux et/ou très secs déposés dans les parties sommitales des bancs, la mesure avec l'EROMES atteint ses limites. Effectivement, pour ces zones, dès le remplissage en eau de la chambre de l'EROMES, l'eau s'infiltrerait rapidement dans le sédiment et rend difficile la réalisation de l'essai.

Données brutes disponibles en fin de mesure

En début d'essai, la chambre de mesure de l'EROMES contient de l'eau claire (Figure 57 a). Lorsque l'érosion commence, l'eau devient alors trouble et l'hélice à peine visible (Figure 57 b). La turbidité augmente dans le dispositif de manière continue jusqu'à obtenir un état final pour lequel on ne voit plus rien à l'intérieur de la chambre (Figure 57 c). Le signal « brut » temporel de l'essai correspond donc à

une augmentation de la turbidité avec le temps et les paliers de tension d'alimentation du moteur (Figure 57 d). La turbidité moyenne de chaque palier peut être représentée en fonction de la tension (Figure 57 e).

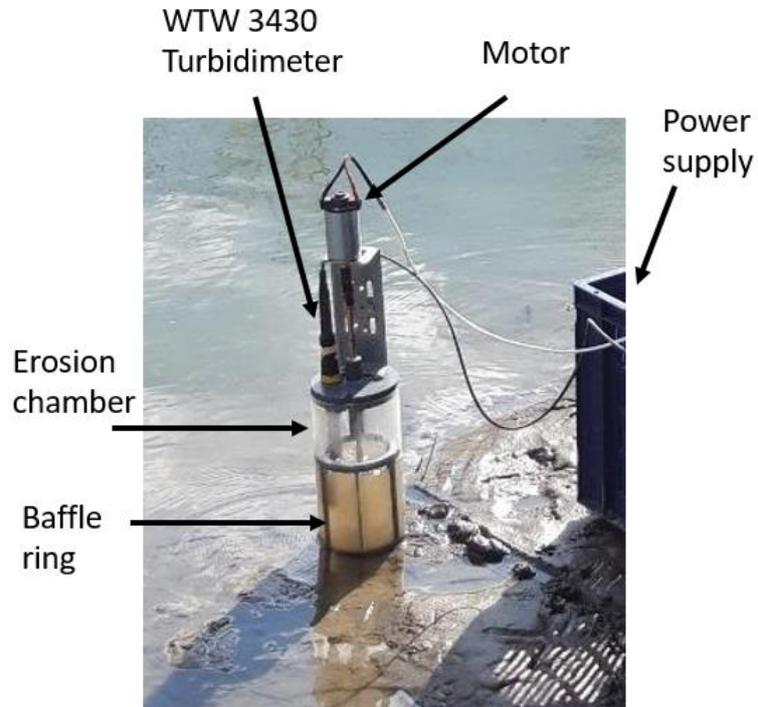


Figure 55 : Photographie de l'EROMES durant un essai d'érosion et principaux composants du dispositif.

a)



b)



Figure 56 : Effet du déflecteur : (a) Vortex créé par la rotation de l'hélice sans le déflecteur et (b) écoulement dans la chambre de l'EROMES avec le déflecteur pour une tension d'alimentation de 10 V.

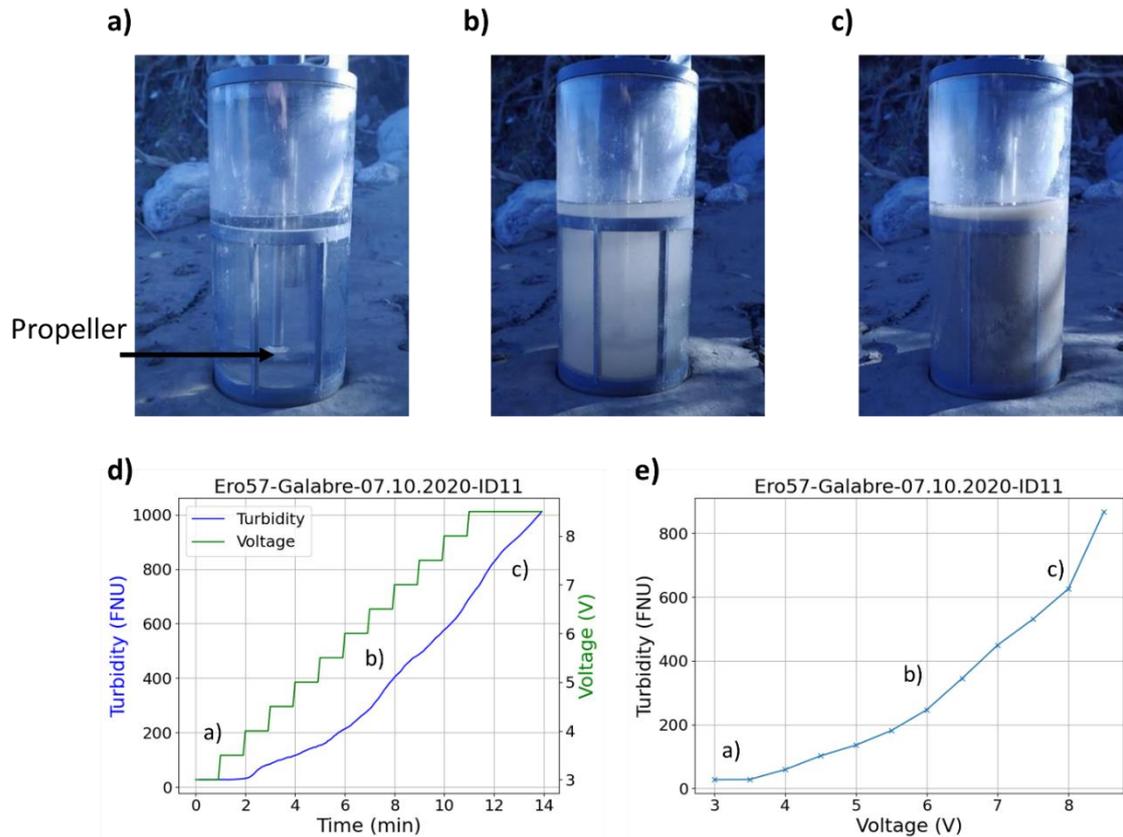


Figure 57 : Illustration de la turbidité dans la chambre de l'EROMES durant un essai d'érosion réalisé sur le Galabre en octobre 2020. Les 3 périodes correspondant aux trois photos (a), (b) et (c) sont placées sur les signaux bruts (d) d'évolution de la turbidité (courbe bleue) et de la tension d'alimentation (courbe verte) en fonction du temps et (e) d'évolution de la turbidité moyenne par palier de tension d'alimentation en fonction de la tension.

Cohesive Strength-Meter (CSM)

Description de l'appareil

La modèle du CSM utilisé (Figure 58) tout au long de ce travail est le MK4 60 PSI de Partrak (<https://partrac-csm.com/>). Contrairement à l'EROMES pour lequel l'érosion est générée par la rotation de l'hélice, le CSM crée des jets d'eau perpendiculaires à la surface du sédiment. Une bouteille d'air comprimé permet de mettre sous pression l'eau du réservoir de l'appareil et des jets d'eau de plus en plus puissants sont réalisés. La transmission optique dans la chambre du CSM est mesurée tout au long de l'essai via un émetteur et un récepteur infrarouge et permet d'identifier le moment où de l'érosion significative a lieu ainsi que l'évolution de l'érosion avec le temps. L'ensemble est automatisé et commandé via l'ordinateur inclus dans le dispositif. Les données sont également stockées directement dans l'appareil et sont récupérables par clé USB. Une mesure CSM dure environ 10 min avec les phases d'installation et de nettoyage.

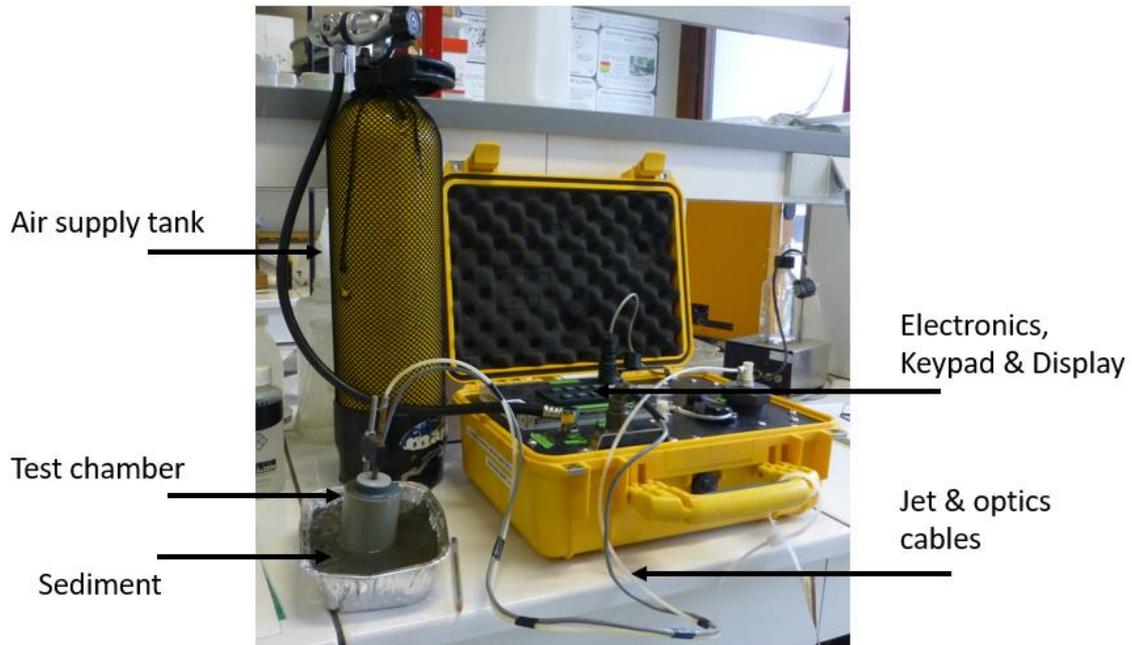


Figure 58 : Photographie du CSM et principaux composants de l'appareil.

Protocole de mesure

La réalisation d'une mesure avec le CSM suit les étapes suivantes :

1. La chambre du CSM ainsi que le jet sont préalablement nettoyés à l'aide d'une pissette.
2. La chambre du CSM est insérée délicatement d'un centimètre dans le sédiment.
3. La chambre est remplie d'eau via l'orifice conçu pour cela. Le remplissage se fait très lentement pour éviter de créer une première érosion lorsque les sédiments sont fragiles.
4. L'opérateur lance ensuite la séquence de mesure automatisée choisie (détaillée ci-dessous).
5. Même si les enregistrements des données sont complètement automatisés, la transmission peut être suivie en temps réel sur l'écran du CSM, permettant à l'opérateur d'arrêter l'essai lorsque la transmission atteint 0 %.

39 « programmes » sont pré-enregistrés dans le CSM. Ils correspondent à différents modes dans lesquels les temps des paliers, le temps de chaque jet et les pressions du jet diffèrent. Ils sont organisés en 3 catégories « Sand », « Fine » et « Mud ». Après quelques essais préliminaires en laboratoire, le mode d'érosion 'Sand 12' a été retenu pour l'ensemble des campagnes de mesures. Ce mode a été choisi car il permet de faire les mesures rapidement et il permet de monter aux pressions du jet maximales (413 *kPa*). Chaque jet dure 0.3 s et est espacé de 6 s du précédent. Les incréments de pression entre jets sont de 3.45 *kPa* jusqu'à 34.45 *kPa* puis de 6.89 *kPa* jusqu'à 413 *kPa*.

Comme pour l'EROMES, une des limites de la mesure avec le CSM est l'infiltration de l'eau lorsque les sédiments sont sableux ou secs. De plus, la chambre du CSM n'est pas transparente, il est donc impossible de visualiser le niveau de l'eau lors de l'essai et donc s'il y a eu de l'infiltration lors de l'essai.

Données brutes disponibles en fin de mesure

Les données brutes obtenues par le CSM sont la transmission optique (%) dans la chambre ainsi que les pressions du jet (*kPa*). Comme pour l'EROMES, deux graphiques peuvent être tracés : l'évolution temporelle de la transmission et des pressions du jet (Figure 59 a) ainsi que l'évolution de la transmission optique (%) moyenne de chaque palier de pression en fonction de la pression du jet (Figure 59 b). C'est ce deuxième signal qui est généralement utilisé dans la littérature. Il est constitué de trois phases : (1) une phase initiale où la transmission est proche de 100 % (eau claire), (2) une phase de décroissance de la transmission avec l'augmentation de la pression du jet (phase d'érosion –

augmentation de la concentration en MES dans la chambre) et (3) une phase où la transmission atteint un palier proche de 0 %, correspondant à la saturation des capteurs optiques et la fin de l'essai d'érosion. Dans certains cas, la phase (1) est très brève ou n'existe pas.

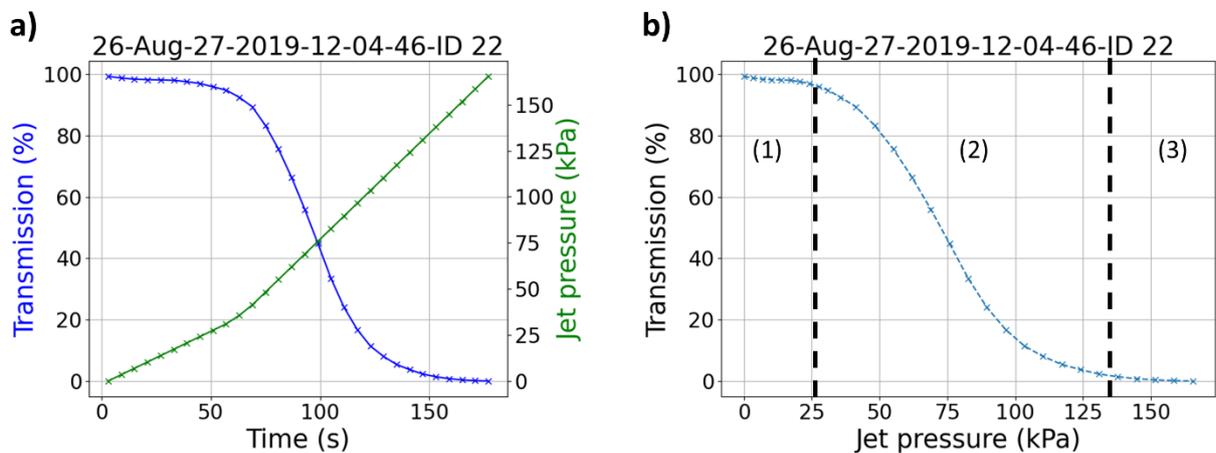


Figure 59 : Exemple de signaux bruts obtenus avec le CSM : (a) évolutions temporelles de la transmission optique et des pressions du jet et (b) évolution de la transmission optique moyenne de chaque palier en fonction de la pression du jet. Les 3 phases du signal CSM sont représentées par (1), (2) et (3) en (b).

Des calibrations effectuées en laboratoire sont nécessaires pour transformer les données brutes extraites de l'EROMES et du CSM en variables d'intérêt :

- La concentration en MES dans la chambre est obtenue à partir de la turbidité pour l'EROMES et la transmission pour le CSM.
- La contrainte au fond est obtenue à partir de la tension d'alimentation du moteur pour l'EROMES et la pression du jet pour le CSM.

Plus d'informations sont disponible dans le manuscrit de thèse de Hanna Haddad.

Quant à la répartition spatiale des mesures in situ, Les appareils tels que le CSM ou l'EROMES permettant de multiplier le nombre de mesures in situ sont à privilégier pour bien caractériser la variabilité spatiale de l'érodibilité. La mesure de l'humidité volumique des dépôts permet de définir les différentes zones de dépôts (saturée en eau, marginale et surfacique) où les mesures d'érodibilité doivent être effectuées. Au regard des analyses faites sur le site du Galabre, nous recommandons d'effectuer au moins 10 à 15 mesures dans la zone marginale et 15 à 20 dans la zone surfacique pour caractériser correctement la distribution statistique de la variabilité spatiale. En termes de fréquence de mesure, l'occurrence de crues érodant ou déposant de nouveaux sédiments et la consolidation des dépôts avec le temps semblent impacter fortement l'érodibilité. Il est donc nécessaire de mettre à jour les variables régulièrement si le modèle a pour vocation à être utilisé sur des vastes périodes temporelles.

Annexe VII : Mesure de la charge sableuse

La mesure de la charge sableuse reste particulièrement complexe du fait de la forte variabilité spatiale et temporelle de la concentration en sable sur une section de rivière. Contrairement aux argiles et limons (souvent assimilé abusivement aux MES), il n'est pas possible de réaliser simplement une unique mesure en berge qu'on assimile ensuite comme représentative de la section. Il est nécessaire d'explorer l'ensemble de la section de mesure pour réaliser un jaugeage solide (Camenen & Melun, 2021). Le protocole peut suivre l'exemple suivant mais doit être adapté (nombre et position des verticales et nombre de points) selon les sites (géométrie de la section, variabilité de l'écoulement, etc.) et les distributions spatiales des vitesses et concentrations, voire de la granulométrie de la suspension :

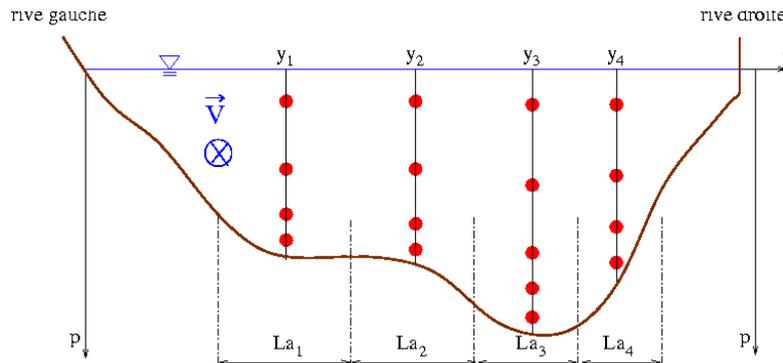


Figure 60 : Exemple de positionnements des prélèvements de suspension pour le jaugeage solide sur une section de mesure

L'estimation du flux solide en suspension peut alors s'écrire de manière simplifiée, soit en supposant que les mesures ponctuelles permettent une description correcte de la variabilité spatiale :

$$Q_{ss,exp} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} u_{ij} \Delta z_{ij} L_{ai}$$

avec n et m le nombre de verticales et le nombre de points sur chacune des verticales i , C_{ij} , u_{ij} , Δz_{ij} les concentration (en kg/m^3), vitesse (en m/s) et hauteur associée (en m , intégration sur la verticale) à chaque point i,j , et L_{ai} la largeur active considérée pour chacune des verticales. A noter ici que la vitesse peut être mesurée à partir d'un courantomètre positionné sur les mêmes points de mesure ou à l'aide d'un ADCP positionné en fixe sur chacune des verticales. [Dramais et al. \(2019\)](#) ont proposé une méthodologie permettant de dépouiller ces jaugeages solides de manière plus physique sur les interpolation et extrapolation en utilisant les résultats de jaugeages liquides ADCP associés aux prélèvements.

Différents instruments de mesure permettent de réaliser un prélèvement ponctuel d'un échantillon total (US-P6) ou une estimation directe du flux de sable (bouteille de Delft). Ces appareils ont été conçu afin de faire des prélèvements iso-cinétiques limitant les risques de biais liés à l'intrusion du préleveur. En effet, ces préleveurs sont conçus pour que la vitesse d'entrée dans le préleveur soit la même que celle de l'écoulement qui l'entoure ([Camenen et al., 2020](#)).



Figure 61 : Préleveurs iso-cinétiques : (a) US-P6 (photo FISP) , (b) bouteille de Delft (photo Royal-Eijkelpamp).

Un défi est de pouvoir réaliser des prélèvements permettant de décrire la variabilité spatiale (sur une section de mesure) des concentrations en sable en un temps limité. Les systèmes existants (bouteille de Delft, préleveurs de l'USGS, etc.) restent des références en terme de qualité de mesure mais sont difficiles à mettre en œuvre et surtout coûteux en temps. C'est pourquoi, dans le cadre du projet ANR DEAR, nous avons testé une mesure par pompage permettant de multiplier les échantillons sans avoir la contrainte de manipulation du préleveur pour récupérer l'échantillon. Les capacités d'une pompe péristaltique (pompe Albin ALP17) à réaliser un prélèvement non-biaisé d'une suspension, soit selon le critère isocinétique, ont été évaluées en laboratoire et sur le terrain (Camenen et al., 2020, 2021). L'intérêt d'une pompe péristaltique est son étanchéité, sa robustesse et l'assurance d'un échantillon sans perte de sable (turbine, filtre) d'autres types de pompes (Camenen et al., 2020; Recking et al., 2020). Par contre, leur puissance de pompage est beaucoup plus faible qu'une pompe immergée limitant ainsi la hauteur d'aspiration (et donc la possibilité de réaliser un prélèvement iso-cinétique) et la vitesse de pompage peut être saccadée (Jaffrin & Shapirao, 1971).



Figure 62 : Photos de la pompe péristaltique lors de la manip sur l'Arc pendant la chasse du 18 juin 2019 (a) et du système de pompe de forage (adapté sur la bouteille de Delft) lors de la manipe sur l'Isère à Grenoble le 4 juillet 2019 (b) (photos Thollet et Camenen).

Annexe VIII : Analyse des dépôts de surface par photos

Une proposition d'analyse des dépôts de fines à partir de photographies prise depuis la berge ou un drone a été proposée dans le cadre d'un projet financé par l'agence de Eau Rhône-Méditerranée-Corse puis dans le cadre de la thèse de Junjian Deng (2022). Ce travail a fait l'objet de deux publications sur la méthodologie (Deng et al., 2023a) et son application sur un banc de gale de l'Arc à Sainte-Marie-de-Cuines (Deng et al., 2023b).

Cette nouvelle méthode d'analyse d'image, DéFI pour **D**épôts de sédiments **F**ins par analyse d'**I**mages, permet de détecter des zones de dépôt de sédiments fins (argiles, limons et sables), présentes sur les bancs de galets situés dans des rivières de montagne. Elle a été développée pour traiter des images issues de caméras time-lapse placées en haut de berge, pour surveiller l'évolution temporelle de ces bancs mais a aussi été appliquée avec succès sur des images issues de drone. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes d'analyse d'image pour exploiter des informations de la granulométrie de la surface du lit de la rivière, elles utilisent en général des photographies à haute résolution issues de drone et se focalisent plus particulièrement sur l'estimation de la granulométrie globale, plus particulièrement des grossiers. Cette méthode a été donc conçue pour pouvoir traiter des images avec une plus basse résolution mais obtenues aisément à l'aide d'un système d'acquisition autonome et économique et en se focalisant sur les dépôts de fines. Des images peuvent être acquises par ce système avec une haute fréquence (infra-journalière) permettant l'obtention d'une base de données de surface de dépôts de bonne qualité sur la zone étudiée.

Après une première étape de pré-processing pour l'orthorectification des images (besoin de points références visible sur l'image, Figure 63), l'image est convertie en niveau de gris et transformée dans le domaine fréquentiel par l'utilisation d'une transformation de Fourier rapide (FFT). Un filtre passe-haut dans ce domaine permet de corriger les nuances de couleur liées au taux d'humidité (Figure 63, step 1). Ensuite, un algorithme classique de segmentation est appliqué : K-mean clustering d'humidité (Figure 63, step 2). Les faibles valeurs correspondent aux dépôts de fines sont relativement faibles du fait de l'absence de texture ; à l'inverse, les fortes valeurs correspondent aux graviers qui présentent une texture beaucoup plus grande.

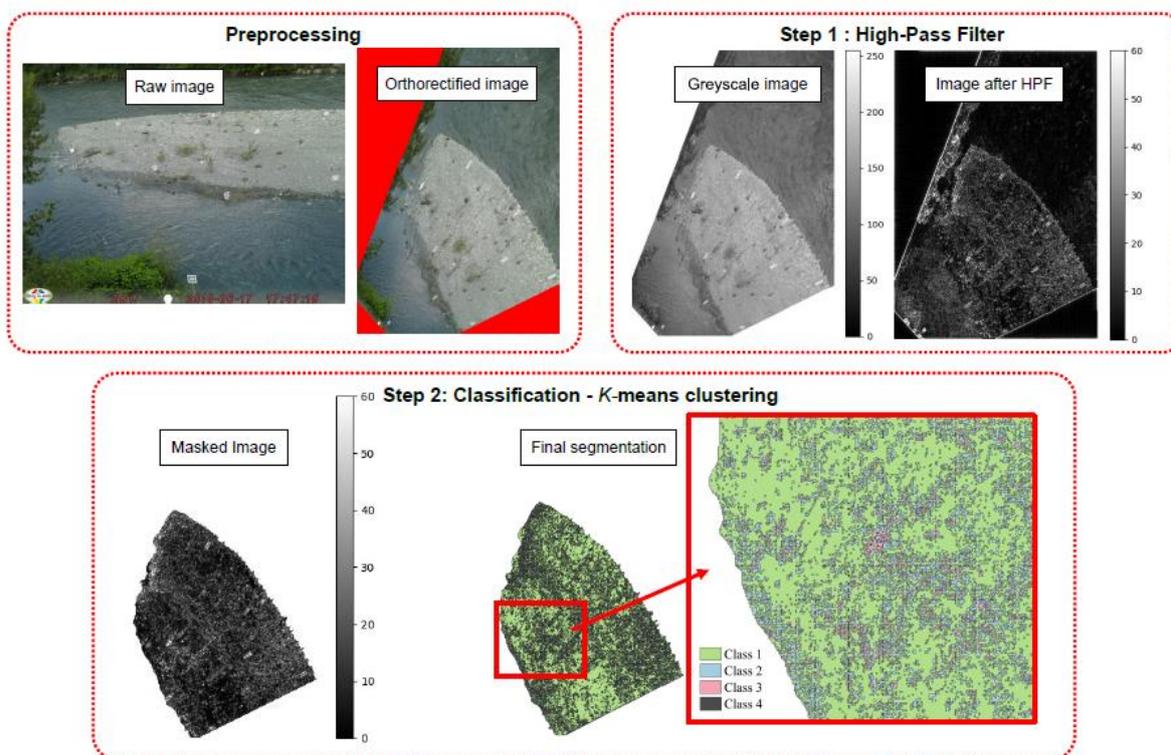


Figure 63 : Vue schématique du protocole d'analyse d'image : Pré-processing avec l'orthorectification de la l'image ; Etape 1 avec l'application d'un filtre passe-haut : Etape 2 avec la classification selon la méthode de K-means clustering

La calibration de la segmentation a été réalisée à partir d'images locales haute-définition (résolution de 0.5 mm par pixel) prise à hauteur d'homme et traitées à l'aide du logiciel Basegrain afin d'estimer la surface occupée par les sédiments fins en excluant toute particules retrouvées par le logiciel (Figure 64a). Une validation de la méthode a ensuite été obtenue à partir d'analyse de la granulométrie de surface via la méthode de Wolman. La classe fine ($d < 4$ mm) a été réanalysée afin de passer d'une granulométrie volumique à une granulométrie surfacique.

Au final, une calibration a été proposée une segmentation avec $K = 4$ afin de pouvoir affecter un poids α_k^i à chacune des quatre surfaces S_k^i segmentée d'une image de surface S_j :

$$\Phi_j = \frac{1}{S_j} [1.0 \times S_{K=4}^1 + 0.5 \times S_{K=4}^2 + 0.1 \times S_{K=4}^3]$$

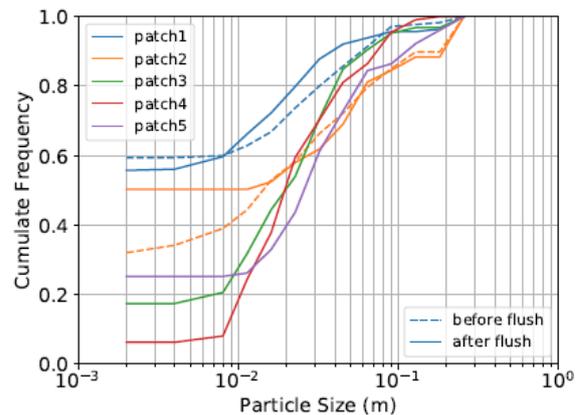


Figure 64 : Exemple d'analyse d'image locale avec le logiciel Basegrain (a) et courbe granulométrique issues de la méthode Wolman (b)

Les résultats obtenus montrent que la méthode est très robuste par rapport aux méthodes existantes (Camenen et al., 2013 ; Carbonneau et al, 2005). Elle induit une dispersion plus faible sur des jeux de photo divers (brouillard, ensoleillé le matin, ensoleillé l'après-midi, nuageux). Elle tend toutefois à donner des valeurs de taux de fines plus élevées que les méthodes précédentes mais seule cette méthode a été validée sur un jeu de données indépendant. En adoptant un filtre éliminant les pixels isolés, les résultats sont alors assez similaires indiquant que la méthode proposée donne une indication de l'ensemble des dépôts même très petits. Il serait cependant utile de tester la méthode sur d'autres sites contrastés. Si la méthode est applicable avec des images de définition variant entre 1 et 15 cm, du fait de l'essence de la méthode de segmentation par K-means clustering, elle ne peut retrouver une zone avec 0% ou 100% de dépôt.

Annexe IX : Suivi automatisé de la caractérisation des bancs à partir de levés Lidar et photos aériennes

La méthodologie pour extraire la géométrie des bancs de galets est principalement une adaptation des travaux d'Alber & Piégay (2011) avec l'utilisation de l'outil « Fluvial Corridor ». Elle se base sur 4 étapes sur la base d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) issu de la mesure Lidar, rastérisé sous forme de grille afin d'être exploitable dans tous les environnements de travail (notamment ArcGIS). Tous les géotraitements sont réalisables via les logiciels ArcGIS et R (codes python et R fournis) :

Etape 1 : Identification du chenal principal

La première étape consiste à identifier les surfaces en eau et spécifiquement le chenal principal. Elle se base tout d'abord sur l'extraction automatique des surfaces en eau, soit directement dans le nuage de points à partir des données d'intensité, soit à partir d'une classification automatique des orthophotos.

Cependant, la classification des surfaces en eau ne permet pas de distinguer le chenal principal des chenaux secondaires. Les outils de la toolbox « hydrologie » de ArcGis permettent de localiser les zones d'accumulation de flux via un calcul des pentes, et par conséquent de décrire des réseaux hydrographiques. En seuillant le raster d'accumulation des flux, il est ainsi possible d'identifier le chenal principal supposé accumuler les flux d'eau les plus élevés.

Etape 2 : Création d'un MNT normalisé

Cette étape permet de supprimer la pente globale du cours d'eau. Elle est par ailleurs primordiale pour estimer proprement les caractéristiques des bancs alternés (volume, hauteur, etc.).

Cette étape consiste à extraire les valeurs de hauteurs d'eau le long du chenal principal, dans des tronçons tous les 25m. Cette valeur a été choisie afin de maximiser la précision de mesure et le temps de calcul mais peut être modifiée. Ces valeurs seront ensuite interpolées sous ArcGIS afin d'obtenir un raster d'élévation du cours d'eau continu sur tout le tronçon. Enfin, ce raster d'élévation du cours d'eau est soustrait au MNT afin d'obtenir, pour chaque pixel de MNT, la valeur relative d'élévation du pixel par rapport à la ligne d'eau. Ces étapes sont décrites dans la figure 68.

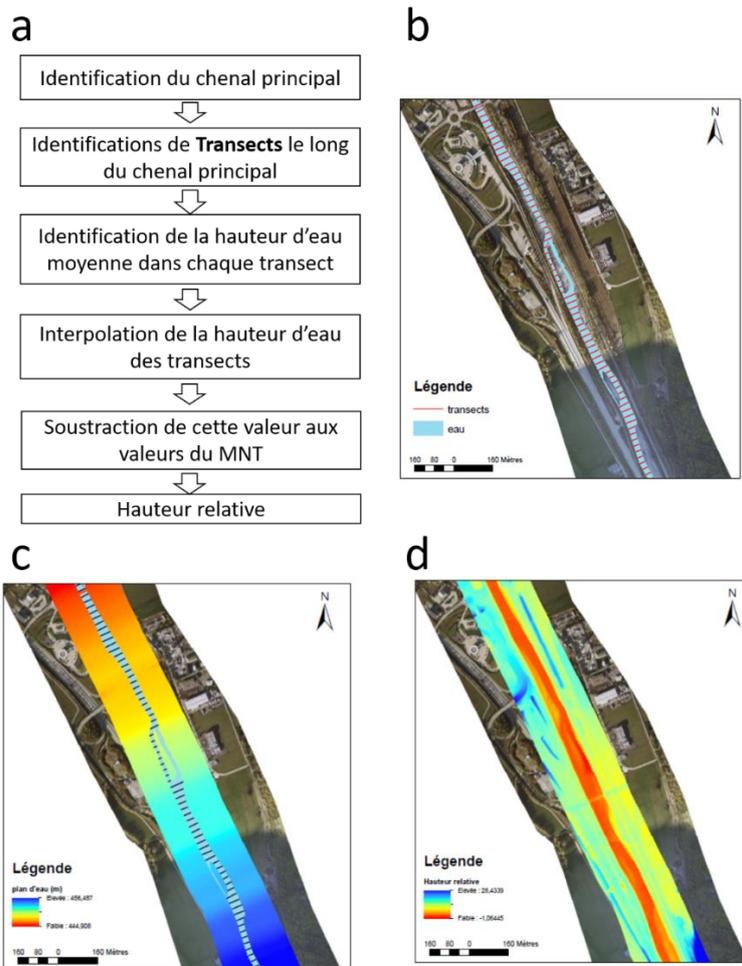


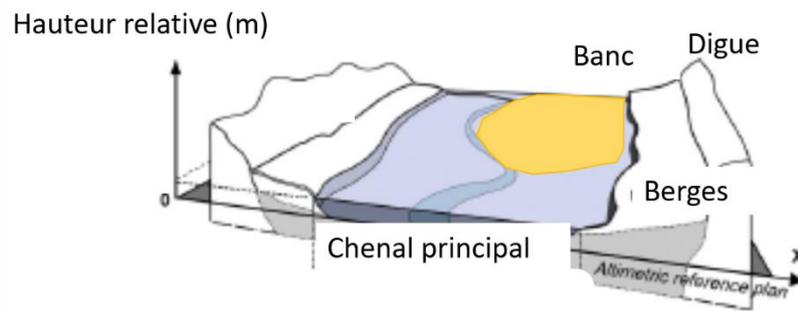
Figure 65: Schéma et images des principales étapes conduisant à la formation du MNT normalisé : a) schéma général, b) étape de construction des transects, b) interpolation, c) soustraction des valeurs de niveau d'eau au reste du MNT

Etape 3 : Identification des limites de digues

Le traitement se fait intégralement sous ArcGIS avec la toolbox « Fluvial Corridor », via un code python. Le principe consiste à seuiller le MNT normalisé par rapport à un niveau d'eau, puis à extraire les valeurs en dessous du seuil (pris ici à 2 m et une pente de 20°) et les convertir en polygones. Une série de filtres permet ensuite de ne conserver que le plus grand polygone, correspondant à l'emprise du chenal endigué. Sur cette emprise, il est alors possible de créer la ligne centrale décrivant la direction du chenal (outil « centerline » de « Fluvial Corridor »), ainsi que de créer des tronçons perpendiculairement à la direction du chenal (outil « segmentation »).

Etape 4 : Identification des lignes de berges et des lignes de bancs

L'identification des lignes de berge nécessite tout d'abord d'identifier les limites entre les bancs et l'eau en intersectant la couche de surface en eau et la couche d'emprise du chenal endigué sous forme de tronçons Figure 66. De manière similaire à l'identification des limites de digues, il s'agit ici de seuiller le MNT normalisé par rapport à un niveau d'eau, puis d'extraire les valeurs en dessous du seuil (pris ici à 0.5 m) et les convertir en polygones. Les polygones sont enfin prétraités et lissés afin d'enlever les surfaces trop petites ou « à trous ».



Adapté de Alber et Piégay (2011)

Figure 66: Schéma conceptuel de l'identification des zones émergées par rapport à la ligne d'eau. (adapté de Alber et Piégay, 2011)