
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Evaluation du potentiel de reprise des stocks de sédiments fins dans une rivière alpine

INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes

5 rue de la Doua, CS 20244 69625 VILLEURBANNE France



Tuteurs entreprise :

Junjian Deng / Lionel Pénard / Benoît Camenen

Doctorant/Chercheur/HDR Directeur Equipe Chercheur

Téa Piednoir

IMA

2020-2021

Tuteur académique :

Stéphane Rodrigues

Table des matières

1.	Introduction.....	1
1.1.	Problématiques liées aux sédiments fins	1
1.2.	Matières en suspension (MES)	1
1.3.	Stocks de sédiments	3
1.4.	Contexte et objectifs du stage.....	4
2.	Présentation du site Arc-Isère	4
2.1.	Présentation générale	4
2.2.	Chasses hydrauliques	7
2.3.	Mesures de stocks en sédiments fins.....	8
3.	Matériel et méthode	11
3.1.	Modélisation hydraulique unidimensionnelle.....	11
3.1.1.	Code de calcul.....	11
3.1.2.	Calcul de contrainte et transport solide.....	11
3.1.3.	Modèle hydraulique de l’Arc et de l’Isère	12
3.1.4.	Détermination des débits à entrer dans le modèle hydraulique	13
3.2.	Traitement SIG (Système d'Information Géographique)	15
3.2.1.	Modèles numériques de terrain.....	16
3.2.2.	Détermination d’une méthode d’interpolation des données	16
3.2.3.	Calcul des surfaces et volumes exondés	19
4.	Résultats et discussion	20
4.1.	Découpage en tronçons homogènes.....	20
4.2.	Surfaces et volumes exondés	21
4.2.1.	Par unités de 100 m.....	21
4.2.2.	Par tronçons homogènes.....	24
4.2.3.	Par bancs	26
4.3.	Calcul de transport solide et des stocks potentiellement remobilisables	27
5.	Conclusion	30
	Bibliographie.....	31
	ANNEXES.....	32

1. Introduction

1.1. Problématiques liées aux sédiments fins

Le premier effet notable d'un dépôt de sédiments fins concerne la végétation. En effet, un apport de sédiments fins contribue à l'installation de la végétation. Puis, la sédimentation sur les bancs est à son tour favorisée par celle-ci, ce qui constitue une boucle de rétroaction positive. La végétation ralentit effectivement les vitesses d'écoulement, augmente la cohésion des sédiments, diminue la capacité de transport des matières en suspension (les sédiments fins sont piégés par la végétation) et enfin diminue le transport par charriage (diminution de la vitesse et donc de l'énergie pour déplacer les sédiments grossiers, et contrainte critique de mise en mouvement plus forte) (Jourdain, 2017). Cela résulte donc en une diminution de l'érosion dans ce secteur et à un exhaussement régulier des dépôts associé à une végétalisation plus durable.

Cette dynamique peut poser de nombreux problèmes. En effet, l'établissement de végétation peut induire un risque accru d'inondation, car du fait de la résistance plus forte liée à la végétation, la hauteur d'eau est plus élevée en crue. Aussi la végétation peut provoquer un appauvrissement de la biodiversité (Jourdain, 2017). Des solutions de gestion existent, telles qu'un entretien mécanique de la végétation, une restructuration de la géométrie avec un élargissement de chenal, une restauration des processus hydro-sédimentaires, ou enfin une action sur les débits liquides. Néanmoins, il convient d'être prudent et de garder à l'esprit que ce type d'actions n'impactera pas uniquement la végétation du cours d'eau.

Mis à part cette problématique vis-à-vis de la végétation, les fines affectent également la qualité de l'eau, car elles peuvent être vecteurs de propagation des micropolluants (Antoine et al., 2020). De plus, elles peuvent affecter les habitats aquatiques. Elles ont également des impacts physiques, elles peuvent en effet engendrer des problèmes d'ensablement dans les centrales hydroélectriques, qui perdent alors de leur capacité de stockage (Misset, 2021).

Finalement, par le biais des échanges hyporhéiques (entre eaux souterraines et eaux de surface), les sédiments fins tendent à infiltrer la matrice graveleuse du lit et à rester piégés dedans. Parfois, la couche de surface subit un colmatage ce qui résulte en une absence d'échanges entre la surface et la subsurface. Ces phénomènes sont liés à l'apport de sédiments en amont, à la mobilité du lit de la rivière, à la présence ou non de végétation et au faciès considéré (Misset, 2021). Mais selon le degré de mobilisation du lit, ces fines stockées dans la matrice graveleuse peuvent être remobilisées. Ainsi, dans les rivières montagneuses, les sédiments fins stockés dans l'entièreté de la bande active, y compris sur les parties exondées, pourraient contribuer significativement aux flux vers l'aval (Misset, 2021).

1.2. Matières en suspension (MES)

Pour caractériser le transport des sédiments dans les cours d'eau, on distingue deux types de transport : le transport en suspension et le transport par charriage.

Les matières en suspension (MES) sont des éléments ou compositions d'éléments solides d'origine minérale ou organique susceptibles d'être transportés par un écoulement fluide, en suspension au sein de la colonne d'eau (Antoine, 2013). Pour ces particules, la vitesse de chute est inférieure à la composante verticale de turbulence, ce qui leur permet de se maintenir en suspension sans interagir avec le fond (Caillaud, 2013). Ces matériaux proviennent généralement de l'érosion du bassin versant.

Le transport par charriage, quant à lui, s'effectue proche du fond de la rivière et concerne les éléments plus grossiers qui se déplacent par glissement, roulement ou saltation. Le type de transport dépend donc à la fois de l'écoulement et de la taille (et masse volumique) des sédiments. Dans le cas d'éléments très fins ou bien très grossiers, le type de transport solide est facile à déterminer, mais ce n'est pas le cas pour toutes les classes granulométriques, notamment pour les sables, particules de taille intermédiaire qui

peuvent être transportées par suspension ou par charriage (Antoine, 2013). Le nombre de Rouse permet d'évaluer le mode de transport des sédiments :

$$R_o = \frac{W_s}{\kappa U^*} \quad (1)$$

où W_s est la vitesse de chute de la particule, $U^* = \tau/\rho$ la vitesse de cisaillement au fond avec τ la contrainte au fond et ρ la masse volumique, et κ la constante de von Karman ($\kappa=0,41$). Ainsi, un nombre de Rouse compris entre 0,8 et 2,5 ($0,8 < R_o < 2,5$) indique un transport par suspension.

La plupart des écoulements peuvent transporter par suspension les éléments très fins, tandis que les particules grossières nécessitent des conditions d'écoulements plus fortes pour être mobilisées. Le diagramme de Hjulström (Figure 1) illustre cela.

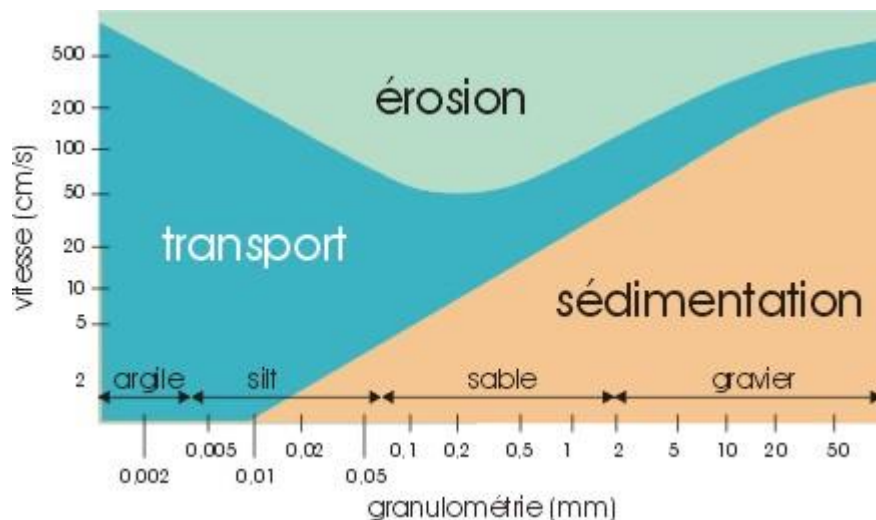


Figure 1: Diagramme de Hjulström (www.geolsed.com).

Il est communément admis que l'on distingue deux grandes familles de MES : les sédiments cohésifs et les sédiments non cohésifs. Les sédiments cohésifs ont une propriété de cohésion interparticulaire. Ces particules sont chargées électriquement, et présentent une taille suffisamment petite pour que les forces d'interactions électriques dominent les forces de gravité. Elles ont alors tendance à s'agréger sous la forme de floccs. Les sédiments non-cohésifs, quant à eux, ne présentent pas ces propriétés d'interaction. Au-dessus de 63,5 μm de diamètre, les particules ne sont plus considérées comme cohésives (Antoine, 2013).

Le transport des MES s'effectue majoritairement par des phénomènes d'advection et de dispersion. L'advection correspond à la translation pure de la matière d'un point à un autre, dépendant uniquement de la vitesse d'écoulement. La dispersion est due à une non-uniformité du profil des vitesses dans une section. Il existe également un phénomène de diffusion, qui implique le mouvement des particules d'un milieu où la concentration est élevée vers un milieu de plus faible concentration, mais ce phénomène est très faible en rivière (Antoine, 2013).

Le dépôt d'une particule en suspension est possible si la force de gravité excède la force de trainée de la particule. On peut calculer la vitesse de chute d'une particule, et son régime de chute variera en fonction du nombre de Reynolds de grain (Re^*). Un flocc pourra se déposer si sa force de cohésion interne est plus élevée que la contrainte de cisaillement au fond. Ces forces de cisaillement présentes dans la colonne d'eau dépendent de la turbulence de l'écoulement, cette dernière joue donc un rôle majeur dans le phénomène de dépôt des sédiments cohésifs (Antoine, 2013).

Ainsi, le comportement des matières en suspension dépend de nombreux paramètres qui peuvent interagir entre eux qui sont la concentration en MES, la turbulence de l'écoulement, la composition physico-chimique de l'eau et la nature des particules. Les valeurs des paramètres de transport, de dépôt ou d'érosion dépendent donc grandement du site d'étude (Antoine, 2013).

Il existe différents moyens de mesurer les concentrations en MES. Cette mesure peut se faire de façon directe, en quantifiant la masse de matière sèche d'un échantillon et en la ramenant au volume total de celui-ci, manuellement ou au moyen d'une pompe. Plusieurs manières indirectes existent également, en mesurant par exemple la turbidité, ou bien grâce à un ADCP, mais cette méthode est en cours de validation (Antoine, 2013).

1.3. Stocks de sédiments

Les rivières de piedmont à lit graveleux peuvent stocker une grande quantité de sédiments, notamment au niveau des fosses et des barres sédimentaires graveleuses où des dépôts rétroactifs sont souvent observés. Les stocks de sédiments fins sont relativement difficiles à estimer puisqu'ils sont facilement emportés et peuvent infiltrer la matrice de graviers. Cela reste donc compliqué de connaître la quantité de sédiments fins dans ces rivières où, de plus, la granulométrie est mal triée (Camenen et al., 2016).

Misset (2021) a travaillé sur des tronçons de rivières naturelles possédant des zones en tresses. Il a défini quatre facies sur lesquels il a travaillé : le chenal principal, les chenaux secondaires, les bancs non végétalisés et les bancs végétalisés. Cette classification a été utilisée pour différencier les processus mis en jeu dans la sédimentation qui ne sont pas les mêmes selon le facies. Des échantillons ont été prélevés sur des sections en travers le long de la rivière et un stock moyen a été obtenu pour chaque facies avant d'être multiplié par la surface de ce facies. La masse stockée dans le lit entier de la rivière pour une profondeur donnée a ensuite été obtenue en additionnant les stocks intégrés pour chaque facies.

Les résultats de Misset (2021), montrent que les stocks locaux peuvent être extrêmement variables. Ayant analysé les stocks locaux au sein de bassins versants et entre bassins versants différents, il a trouvé que cette variabilité existait dans les deux cas. Mais malgré cette irrégularité, il a été possible de distinguer des gammes de stockage bien définies pour les quatre facies, ce qui indique que les processus de stockage sont différents en fonction de ces quatre zones. Le chenal principal est le facies stockant le moins de particules fines (contrainte de cisaillement trop forte). Les bancs non végétalisés ont un stockage un peu meilleur, mais pas significativement statistiquement. Le stockage est nettement plus important dans les chenaux secondaires et encore plus sur les bancs végétalisés. Pour les trois facies secs (tous sauf le chenal principal), les stocks de subsurface étaient généralement supérieurs aux stocks de surface. Il semblerait ainsi que la remobilisation des stocks de subsurface soit contrôlée par la mobilité de la couche armurée, spécialement pour les bancs de galets. Sans considérer les facies, 75 % des mesures ont montré des stocks plus élevés en subsurface qu'en surface.

En conclusion, une part importante du stock est contrôlée par la mobilité de la couche armurée peu mobile, ce qui est particulièrement vrai pour les bancs (Misset, 2021). Il est possible que les bancs de galets et les chenaux secondaires soient submergés suffisamment souvent pour que les stocks de surface soient remobilisés fréquemment et que la végétation ne puisse se développer. Les facies secs, quant à eux, contribuent à stocker et relarguer des particules sur de courtes échelles temporelles (Misset, 2021). Le stockage et la remobilisation des fines de la surface peuvent être plus fréquents et principalement contrôlés par la submersion durant des épisodes de ruissellement, alors que la remobilisation des sédiments de la subsurface est plutôt contrôlée par la mobilisation de la matrice. Il convient de garder à l'esprit que le système de stockage est susceptible d'évoluer au cours du temps et que les processus de stockage dépendent fortement de l'hydraulique et de la configuration du lit (Misset, 2021).

Camenen et al. (2016) se sont intéressés à un banc de graviers situé 10 km à l'aval de St-Jean-de-Maurienne en Savoie, en réalisant des mesures avant et après un événement de chasse hydraulique. Les très fortes concentrations en MES associées à des contraintes de cisaillement et profondeurs d'eau assez faibles sur le banc ont résulté en un dépôt conséquent sur la partie aval du banc. Ainsi, ils ont montré que la formation d'un dépôt sur un banc de graviers est très sensible au niveau d'eau et à la durée de submersion du banc.

1.4. Contexte et objectifs du stage

Ce stage s'inscrit d'une part dans le cadre du site atelier Arc-Isère de la ZABR (Zone Atelier du Bassin du Rhône) qui a pour objectif d'établir une gestion intégrée de la ressource en eau sur le bassin versant du Rhône et de ses affluents, et d'autre part, dans le projet ANR DEAR (Deposition and Erosion of fine sediments in Alpine Rivers) qui aborde la problématique de la dynamique des sédiments fins dans les rivières alpines. Plus précisément, ce stage s'inscrit également dans le cadre de la thèse de Junjian Deng (2019-2022) portant sur la dynamique des sédiments fins dans les systèmes de bancs de galets alternés d'une rivière de montagne aménagée. Ainsi, depuis plusieurs années, l'équipe « Hydraulique des rivières » de l'unité RiverLy de INRAE étudie la dynamique hydro-sédimentaire sur différentes rivières, par le biais de relevés topographiques, d'études granulométriques ou encore hydrodynamiques et mesures de flux solide (matières en suspension, charriage).

Le site d'étude porte sur les rivières de l'Arc et de l'Isère, dans les Alpes françaises. Ces deux rivières alpines présentent des flux de sédiments importants. Ce sont également des rivières fortement aménagées, présentant notamment des barrages hydroélectriques, dont la gestion vis-à-vis des sédiments fins est extrêmement importante, afin de conserver leur capacité de stockage. De plus, les dépôts de sédiments fins peuvent augmenter le risque d'inondation, en se déposant sur des bancs, en augmentant leur hauteur mais surtout en permettant à la végétation de s'implanter. Il est donc essentiel de mieux comprendre la dynamique des sédiments fins afin d'éviter la stabilisation de dépôts sur les bancs de galets du système Arc-Isère.

Ce stage vise à évaluer ces stocks de sédiments fins et leur potentiel de reprise par l'écoulement grâce à une étude combinant modélisation numérique hydro-sédimentaire unidimensionnelle et analyse SIG (Système d'Information Géographique). L'objectif principal de ce stage est d'évaluer les surfaces des bancs de galets exondés et les hauteurs d'immersion pour différents débits de l'Arc et de l'Isère afin d'estimer les stocks de sédiments fins disponibles et la potentialité de les remettre en suspension. Ainsi, une première étape consiste à effectuer une modélisation hydraulique de ces rivières grâce au logiciel MAGE développé à INRAE (J.-B. Faure, 2019). Ce logiciel permettra d'obtenir un modèle 1D à débit constant, qui donnera la hauteur d'eau en fonction du débit. Puis, il conviendra de coupler sous SIG ces données hydrauliques avec des données Lidar en interpolant les lignes d'eau par rapport au MNT, ce qui permettra de connaître les surfaces exondées. Des mesures de terrain et de l'analyse photographique seront également effectuées.

2. Présentation du site Arc-Isère

2.1. Présentation générale

L'Arc et l'Isère sont deux rivières situées dans les Alpes françaises (localisation Figure 2), qui présentent un système fluvial largement influencé par l'Homme.

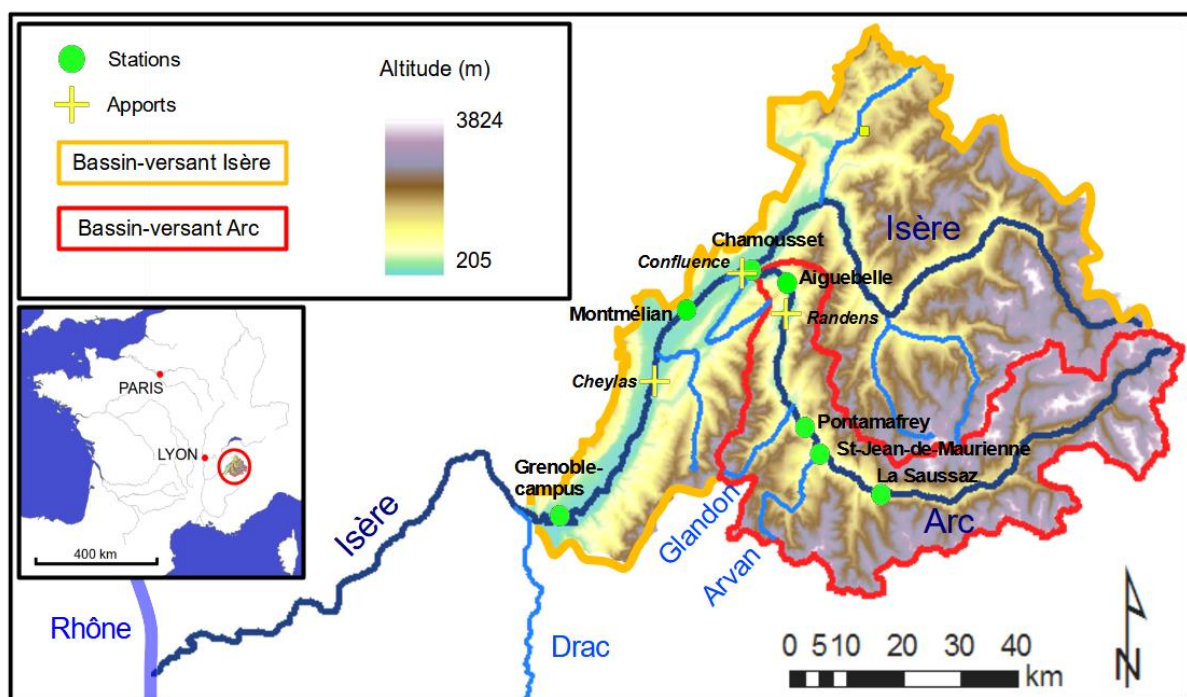


Figure 2: Localisation des stations hydrosédimentaires et des apports sur le système Arc-Isère (modifié depuis Thollet et al., 2021).

L'Arc est un affluent de l'Isère, qui est elle-même un affluent du Rhône. Ces rivières possèdent un régime hydrologique de type nival et les crues naturelles se produisent généralement en début d'été et en automne. De plus, les affluents de l'Arc et de l'Isère peuvent être très dynamiques, et il y a de fortes variations saisonnières de débit pendant l'année. Le lit des deux rivières est majoritairement constitué de graviers avec une distribution granulométrique mal triée. De plus, elles sont toutes deux caractérisées par des systèmes de bancs alternés qui sont souvent végétalisés dans le cas de l'Isère. Ce développement de bancs alternés est notamment lié au ratio d'aspect de la rivière et à la disponibilité des apports sédimentaires (Jaballah, 2013). Ces macro-formes de taille conséquente (parfois plus de 500 m de long) expliquent le comportement sédimentaire à seuil du système Arc-Isère. Le seuil correspond à l'inondation de ces bancs, moment à partir duquel des processus de dépôt et d'érosion des sédiments sont mis en place (Antoine, 2013). Elles sont aussi grandement touchées par les dépôts de sédiments fins sur les berges végétalisées. Cette végétalisation ainsi que l'augmentation de la taille des bancs due aux dépôts augmentent les hauteurs d'eau en crue (jusqu'à 40 cm supplémentaires localement), et diminue ainsi le débit débordant (Jourdain, 2017). Cette dynamique est perçue négativement par les gestionnaires, à cause du risque d'inondation, ils procèdent donc à un arasement de la végétation. Les caractéristiques des deux rivières sont détaillées ci-après, notamment les débits (Figure 3) et la pente (Figure 4) issue de la ligne d'eau en sortie du modèle hydraulique.

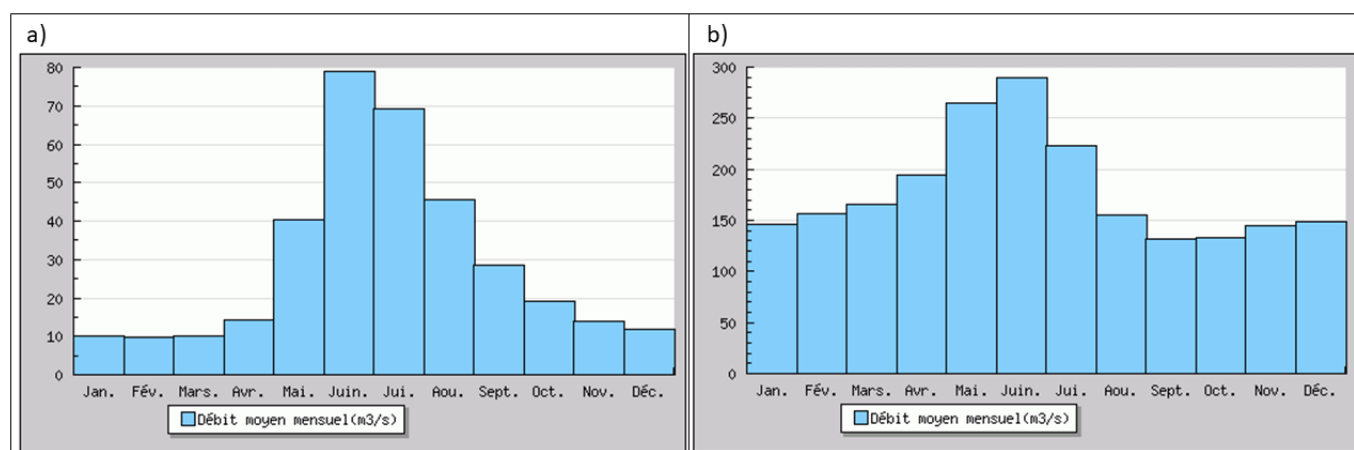


Figure 3: Débits moyens mensuels à la station de a) La Saussaz b) Grenoble-campus (banque hydro).

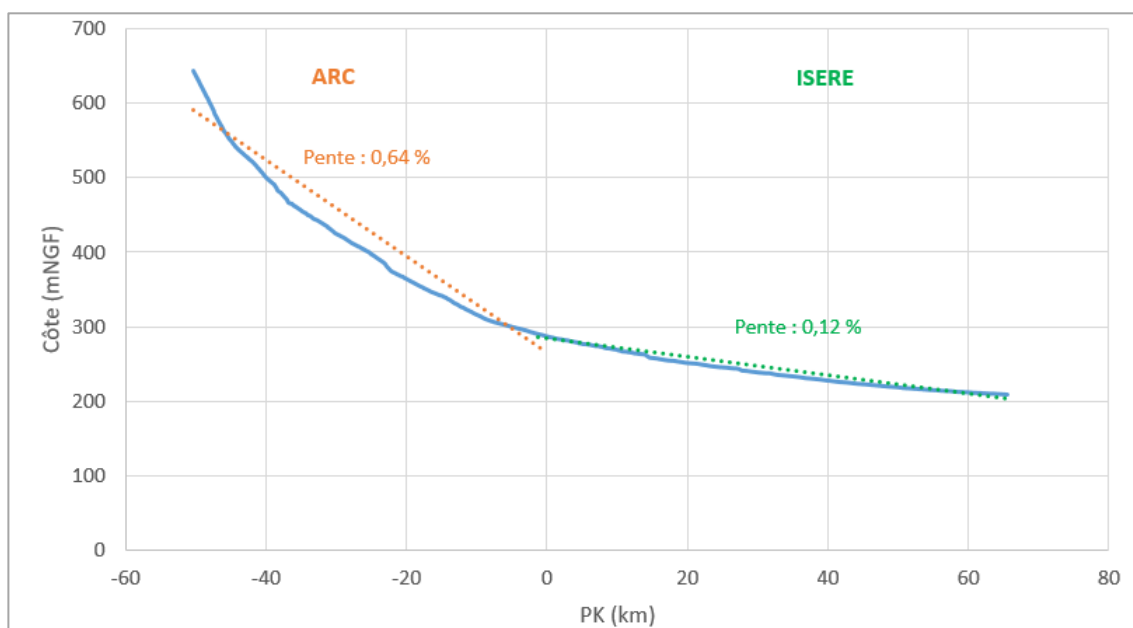


Figure 4: Ligne d'eau en fonction du PK et pente moyenne de l'Arc et de l'Isère.

L'Arc en Maurienne prend sa source à Levanna à 2700 m d'altitude, et parcourt 120 km depuis Bonneval jusqu'à sa confluence avec l'Isère, et draine un bassin versant de 1957 km². Son débit moyen annuel (module) est de 29,4 m³/s à Saint-Michel de Maurienne (station de la Saussaz). Le débit moyen mensuel peut atteindre 70 m³/s en été, contre environ 10 m³/s en hiver. Le débit de crue décennale est aux alentours de 180 m³/s (valeurs de la Banque Hydro, Eaufrance). La pente de la rivière est assez raide, variant entre 0,2 % au niveau de la confluence avec l'Isère à 1 % plus en amont à St-Jean-de-Maurienne. Il peut localement exister des ruptures de pente et en conséquence des écoulements supercritiques ($Fr > 1$) sont fréquemment observés à certains endroits (Antoine et al., 2020).

L'Arc est fortement aménagé. Auparavant de forme en tresse (Jaballah, 2013), il est aujourd'hui contraint latéralement par des digues et durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, trois barrages au fil de l'eau d'une capacité de 0,8 million de m³ ont été construits sur la section moyenne de l'Arc : le barrage de Freney, du Pont-des-Chèvres et de Saint-Martin-la-Porte. Ils sont exploités par EDF. Ces barrages engendrent de fortes disparités spatiales en matière de débit (Antoine, 2013). Ils sont ouverts lors des fortes crues et n'ont donc pas d'impact sur les dynamiques fluviales sur la partie aval de la vallée. De l'eau compensatoire s'écoule sur plus de 50 % de la longueur totale de la rivière Arc en raison des prises d'eau pour la génération d'hydroélectricité (Antoine et al., 2020). De plus, le débit subit une dérivation à trois endroits, afin d'alimenter les usines d'Hermillon, du Cheylas et de Randens.

Le bassin versant de l'Arc est naturellement érodable, les versants étant composés de marnes noires, formations géologiques composées de calcaire et d'argile (Antoine, 2013). Ainsi, l'Arc est une rivière à graviers, mais de grandes quantités de sédiments fins sont transportées et déposées en surface des bancs ou mélangées dans les sous-couches (Jaballah, 2013). Les sédiments en suspension, présents en grande quantité dans le bassin versant, présentent donc un intérêt important pour la gestion des ouvrages hydrauliques. En effet, le transport solide annuel s'estime à 71 % en suspension, 24 % en dissout et 4 % par charriage (Antoine, 2013).

L'Isère, quant à elle, s'inscrit dans un bassin versant de 5570 km² en amont de la ville de Grenoble, et possède un débit moyen annuel (module) de 179 m³/s. Au milieu de l'été, les débits mensuels moyens à Grenoble peuvent atteindre environ 250 m³/s, tandis qu'en hiver ils sont de 150 m³/s. Le débit de crue décennale est de 900 m³/s (valeurs de la banque hydro, Eaufrance). La pente de l'Isère oscille entre 0,2 % proche de la confluence et 0,09 % au niveau de Grenoble (Antoine et al., 2020).

Concernant le transport de sédiments, sur le site Arc-Isère, les MES se propagent à une célérité inférieure à celle des débits, avec $c_{MES} \approx 2/3c_Q$ (Antoine, 2013). En guise d'exemple, pour les chasses, la vitesse de propagation du signal de concentration est en moyenne égale à 2 m/s, contre 3 m/s pour les débits (Antoine, 2013). De plus, dans ce bassin-versant, le transport de MES a principalement lieu lors des crues. En effet, plus de 40 % du flux transité total l'est lors de ces événements, alors que leur durée est de seulement 3 % de la durée totale (Antoine, 2013).

Les résultats de Jourdain (2017) indiquent que la présence de sédiments fins à la surface des bancs suivis dans son étude sur l'Isère évolue rapidement au cours du temps. En effet, les crues présentant une forte concentration de MES tendent à déposer des sédiments fins dans les zones submergées, tandis que les crues présentant une faible concentration en MES tendent à mobiliser les sédiments fins présents à la surface des bancs. Jourdain (2017) rapporte que le début de la mobilité des sédiments grossiers du site situé à Chamousset à l'aval de la confluence Isère-Arc s'effectue pour un débit de 400 m³/s. Pour le site à Montmélian, le début de mobilité se situe aux alentours de 300 m³/s. Cette mobilité des sédiments grossiers et très fortement liée à la mobilité des fines stockées dans la matrice.

Le ratio stock/flux est de 10 % pour l'Arc, ce qui suggère qu'elle a une plus faible capacité tampon que les rivières en tresses mais peut quand-même être considérée comme une source significative de sédiments à une échelle de temps plus faible (Misset, 2021).

2.2. Chasses hydrauliques

Afin de maintenir la capacité de stockage des réservoirs existants, les trois barrages présents sur l'Arc subissent simultanément chaque année au mois de juin une chasse hydraulique. Ce processus consiste à ouvrir les vannes de sortie du barrage pour produire des écoulements à des vitesses suffisantes pour évacuer les sédiments accumulés dans le réservoir (Antoine et al., 2020). Ces chasses peuvent avoir un impact significatif sur la morphologie et l'écologie de la partie aval de la rivière. C'est pourquoi EDF réalise depuis plus de dix ans des mesures de concentrations en MES, de débit et de topographie du lit le long du système Arc-Isère, afin d'estimer l'efficacité des chasses hydrauliques (par le biais d'une estimation des volumes remobilisés) mais aussi l'impact de ces événements sur le lit de la rivière en aval des barrages. Le suivi des MES permet ainsi d'étudier et de prévoir les éventuels impacts des chasses, qui, comme détaillé précédemment, peuvent être soit des risques accrus d'inondation suite à des dépôts de ces sédiments fins sur des bancs, qui peuvent conduire à un établissement pérenne de la végétation, soit des problématiques touchant plus aux polluants transportés lors de ces chasses (Antoine et al., 2020).

Les chasses des trois barrages présentent le même hydrogramme de projet, et l'évènement se déroule de la même façon chaque année : une première vague d'avertissement par sécurité et pour la faune (20 m³/s), une phase d'évacuation (90 m³/s), l'eau est prodiguée par de plus grands réservoirs en amont pour maintenir le débit et même l'augmenter à sa valeur maximale (130 à 150 m³/s soit une crue annuelle), et enfin un retour au niveau d'eau normal. Cette opération dure généralement 12h. Elle est annulée si une crue significative se produit dans les mois précédents, ce qui a été le cas en 2008.

L'apport total en sédiments par les barrages varie de 12 000 tonnes en 2007 à 52 000 tonnes en 2012 (Antoine et al., 2020). Ces variations s'expliquent par la variabilité des apports de l'amont du bassin-versant et par les opérations d'entretien du barrage pendant l'année. Il convient de noter que la masse de sédiments transportés pendant une chasse ne représente pas plus de 5 % de la masse des flux annuels de MES transitant à Grenoble. De plus, lors de ces chasses, les flux de MES provenant des affluents sont négligeables par rapport au flux total, et n'ont qu'un effet de dilution (Antoine et al., 2020). Les résultats d'Antoine et al. (2020) montrent l'importance de la dynamique des MES avant l'évènement de chasse, car la distribution spatiale des dépôts de sédiments affecte fortement leur potentielle remobilisation pendant celle-ci. Le stock initial en sédiments fins et la géométrie de la rivière a donc un grand effet sur le flux de sédiments relargué par l'ouverture des barrages.

2.3. Mesures de stocks en sédiments fins

Des mesures granulométriques ont été effectuées sur des bancs de l'Arc et de l'Isère dans le cadre de la thèse de Junjian Deng. Le protocole de mesures granulométriques repose sur un protocole introduit par Navratil et al. (2010) et Misset (2019), qui était plus rapide mais ne prenait en compte que l'argile et le limon. Le nouveau protocole utilisé est donc optimisé pour prendre en compte la fraction sableuse. Cette approche est plus longue (environ 1h par mesure) ; un banc de graviers ne pourra donc être décrit que par 2 à 4 placettes dans cet objectif d'une vision spatiale sur l'ensemble du système Arc-Isère.

L'idée est d'échantillonner une surface représentative d'une zone d'un banc de galets (tête de banc, chenal secondaire, zone végétalisée, etc.). Tout d'abord, il faut définir une zone d'échantillonnage. Puis poser le cadre en bois (placette) ($30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, soit de surface $A_p = 0,09\text{ m}^2$) sur cette zone (Figure 5a), la localiser au GPS. Ensuite, creuser la première couche (couche de surface) avec une pelle en collectant tous les sédiments ; cette couche doit correspondre à une couche de sédiments facilement mobilisables ; l'épaisseur H_1 mesurée à partir de la base du cadre (valeur moyenne sur plusieurs points) doit être de l'ordre du D_{90} des sédiments. Puis la seconde couche (couche de subsurface) avec une pelle en collectant tous les sédiments ; l'épaisseur $H_b = H_2 - H_1$ mesurée à partir de la base du cadre (valeur moyenne sur plusieurs points pour H_2) doit être aussi de l'ordre du D_{90} des sédiments.

Le tamisage (Figure 5b) est aussi réalisé sur site afin d'optimiser la mesure et limiter le nombre d'échantillons à ramener pour une analyse de laboratoire. Quatre tamis sont utilisés (5 mm, 2 mm, 500 μm et 100 μm). La première étape consiste à positionner la colonne de tamis sur un grand récipient vide et propre avec un support. Puis il faut tamiser l'ensemble de l'échantillon en versant une quantité connue d'eau $V_{s/b}$ (l'indice s ou b indique un échantillon de surface ou subsurface). Les masses des refus à 5 mm (grossiers) et 2 mm (graviers fins) sont mesurés sur place avec une balance de terrain et les refus à 500 μm (sables grossiers) et 100 μm (sables fins) sont récoltés délicatement (utilisation d'une brosse souple) dans des sacs plastiques (ou récipient) pour une mesure de la masse sèche en laboratoire après séchage à 105°C. Après avoir remis en suspension tous les sédiments fins (passant à 100 μm) du récipient, un flacon de 500 ml est rempli rapidement. La concentration $C_{s/b, \text{ fines}}$ sera mesurée en laboratoire a posteriori.

En 2020, ces mesures s'étalent du 29/06 au 03/07 et du 17 au 21/08. 14 bancs ont ainsi été étudiés en 2020, 6 sur l'Arc et 8 sur l'Isère. Un seul banc a été zoné avec un GPS (zone d'étiage, zone végétalisée, amont/aval). En 2021, lors de ce stage, de nouvelles campagnes de mesures ont été réalisées : le 16/03 et le 14-15/04 ainsi qu'une semaine du 02 au 06/08. Les zonages GPS ont cette fois été réalisés pour chacun des bancs pour améliorer la représentation spatiale des placettes (Figure 5c), de façon à définir des zones homogènes sur les bancs, et également de recueillir la ligne d'eau le long du banc qui permettra plus tard de vérifier les résultats obtenus lors du stage. De plus, sur la partie supérieure végétalisée des bancs, l'épaisseur de dépôt a été estimée en des endroits aléatoires afin de pouvoir par la suite effectuer des statistiques.

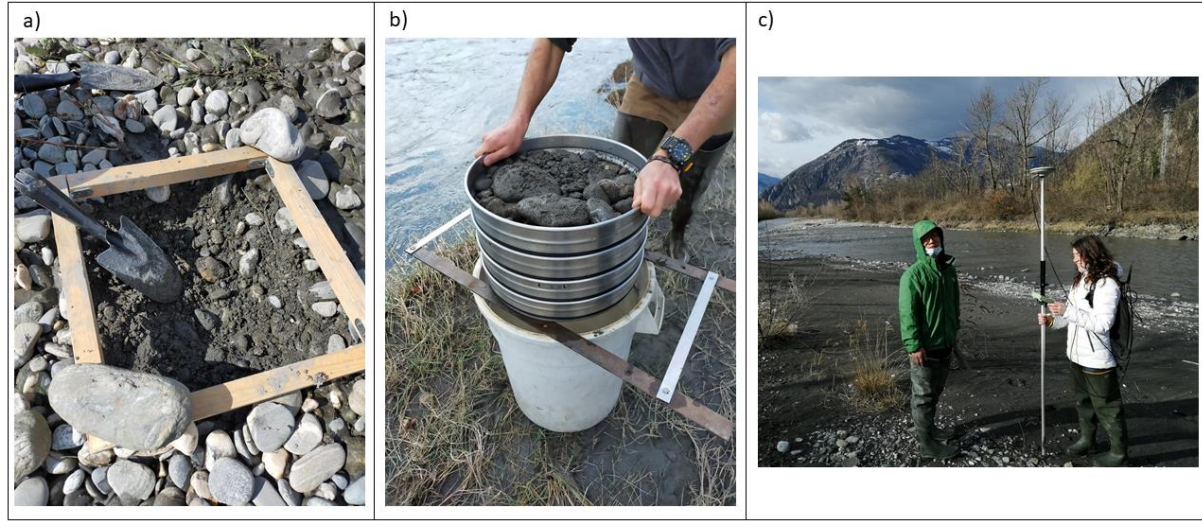


Figure 5: Méthodologie de mesure des stocks de sédiments fins avec (a) la placette échantillonnée, (b) le tamisage d'échantillon, et (c) la localisation au GPS.

La masse de sédiment fins ($D < 100 \mu m$) disponibles dans chacune des couches sera donc :

$$M_{s/b,fines} = C_{s/b,fines} V_{s/b} \quad (2)$$

Le stock de sédiments fins disponible en surface S_{ts} , exprimé en kg/m^2 est donc :

$$S_{ts} = \frac{M_{s,fines} + M_{s,100\mu m} + M_{s,500\mu m}}{A_p} \quad (3)$$

De la même manière, le stock de sédiments fins disponible en subsurface S_{tb} , exprimé en kg/m^3 est :

$$S_{tb} = \frac{M_{b,fines} + M_{b,100\mu m} + M_{b,500\mu m}}{A_p H_b} \quad (4)$$

Enfin, l'évaluation des stocks totaux de fines en surface Γ_{ts} (équation 5) et en subsurface Γ_{tb} (équation 6) peut être obtenue en multipliant S_{ts} par la surface A_{bi} du banc i et S_{tb} par cette même surface et une épaisseur potentielle d'érosion δ_i . Si le banc est subdivisé en plusieurs zones homogènes $A_{bc,ij}$, on obtient donc :

$$\Gamma_{ts} = \sum_j A_{bc,ij} S_{ts,ij} \quad (5)$$

$$\Gamma_{tb} = \sum_j A_{bc,ij} S_{ts,ij} \delta_{ij} \quad (6)$$

La Figure 6 expose les résultats de la distribution granulométrique des sédiments pour l'Arc et pour l'Isère.

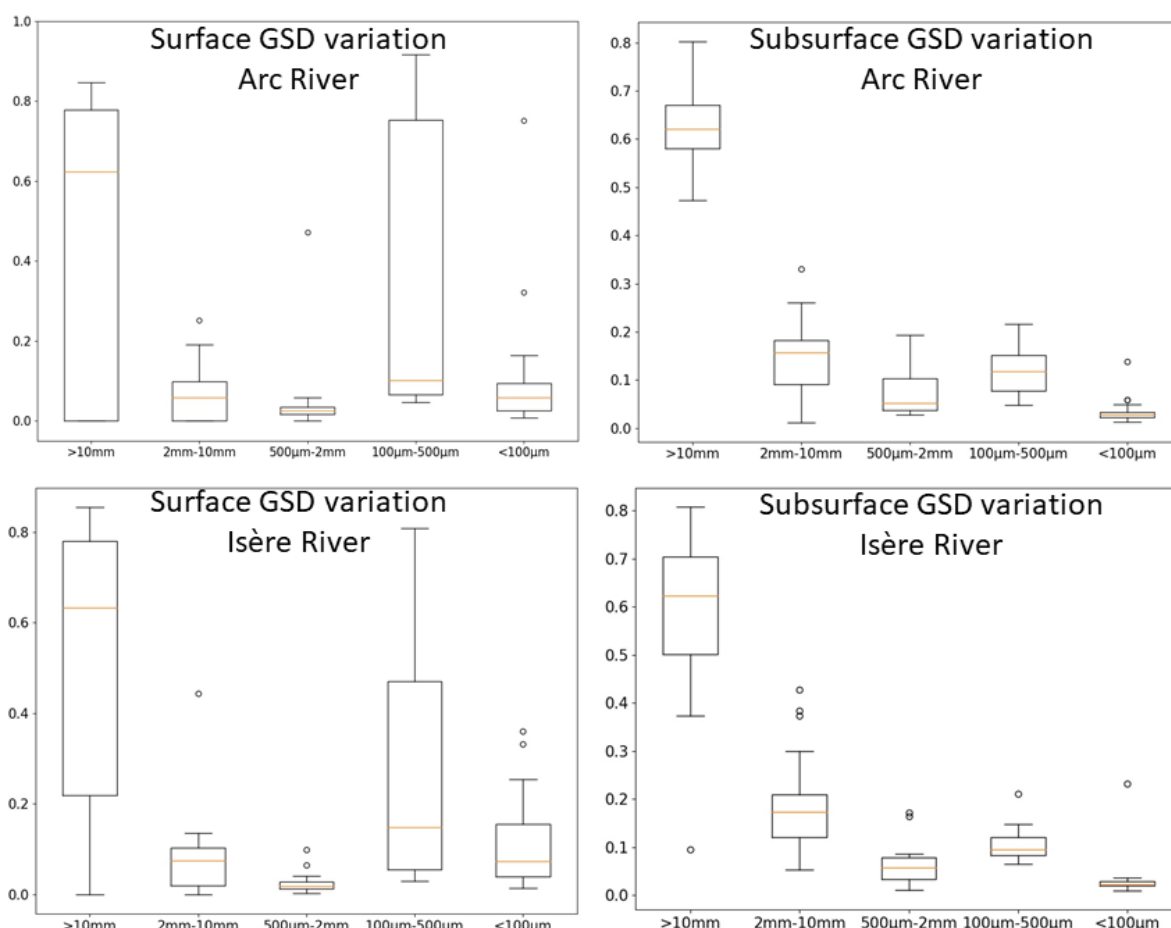


Figure 6: Distribution granulométrique des sédiments de l'Arc et de l'Isère en surface et subsurface (Junjian Deng).

On peut remarquer une importante dispersion au niveau des sédiments grossiers (>10mm) et des sables fins (100 µm – 500 µm) à la surface. Cela s'explique car certaines placettes étaient positionnées au niveau de zones de dépôts impliquant un excès de sédiments fins, tandis que les autres comportaient beaucoup plus de sédiments grossiers. En subsurface en revanche on retrouve moins cette dispersion, mais on peut distinguer deux modes : les graviers et les sables fins.

De plus, on ne retrouve pas une différence significative entre l'Arc et l'Isère. Les résultats montrent qu'il y a entre 5 et 10 % de sédiments fins, et que ces deux rivières comprennent beaucoup de sable. Afin de vérifier la véracité des résultats, des tests ont été effectués sur des zones homogènes afin de voir si des différences notables existaient, ce qui n'est pas le cas. La même comparaison a été effectuée avec un tamisage précis, pour voir si la rapidité sur le terrain n'affectait pas les résultats, mais une fois encore les différences ne sont pas élevées. Misset (2019), quant à lui, a effectué plus de mesures et donc plus de zones, mais il s'est intéressé uniquement aux fines. Contrairement à lui qui avait à disposition des photographies aériennes par drone le jour même de ses mesures sur le terrain, nous ne disposons que de données LiDAR n'ayant pas été réalisées la même année. Il y a donc des différences d'où l'idée de spatialiser les données grâce à un GPS. Une hypothèse a donc été faite que les fonds n'ont pas beaucoup évolués. Sur la partie végétalisée des bancs, il s'est avéré qu'à l'amont, il n'y avait que très peu de dépôts et qu'ils étaient fins, tandis qu'au centre il y avait plus de dépôts, de taille moyenne, et qu'enfin à l'aval, il y avait des dépôts pouvant être assez épais, atteignant 50 cm. C'est cette délimitation qui peut être effectuée sur le terrain.

A partir des mesures, Junjian Deng a pu déterminer les stocks de sédiments fins en subsurface. Ces derniers s'élèvent à 250 kg/m³ au total, avec 220 kg/m³ de sables et 30 kg/m³ de limons/argiles en

subsurface. Ces valeurs de stocks pourront être multipliées par le volume exondé des bancs pour avoir les stocks totaux.

Mis à part l'évaluation des stocks, un travail d'évaluation de la granulométrie a également été réalisé. Le D_{50} et le D_{90} ont été déterminés pour l'Arc à partir des données fournies par Junjian Deng et recensant le D_{50} , D_{30} et D_{10} des bancs ayant été analysés. Pour l'Isère les valeurs obtenues par Camille Jourdain (2017) ont été retenues. Les valeurs sont présentées par secteur de MNT dans le Tableau 1.

Tableau 1: D_{50} et D_{90} choisis selon les secteurs correspondants aux MNTs.

Secteur	D_{50} (mm)	D_{90} (mm)
SMLP – Randens	30	60
Randens – Confluence	27	54
Confluence – Montmélian	24	48
Montmélian – Grenoble	20	40

3. Matériel et méthode

3.1. Modélisation hydraulique unidimensionnelle

3.1.1. Code de calcul

La modélisation hydraulique s'effectue par le logiciel MAGE par le biais de l'interface PamHyr. MAGE est un logiciel de simulation monodimensionnelle d'écoulement en rivière en régime transitoire, développé par INRAE. Les équations utilisées sont les équations de Barré de Saint-Venant avec la formule de perte de charge de Manning-Strickler.

$$\text{Équation de continuité : } \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q = q_{\text{apports}} - \frac{\partial S_{\text{majeur}}}{\partial t} + q_{\text{déversements}} \quad (7)$$

$$\text{Équation dynamique : } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial Z}{\partial x} = -gS(J + J_s) + kqV \quad (8)$$

avec : t le temps, x l'abscisse en long, S la section mouillée, Q le débit, Z la cote de la surface libre, V la vitesse moyenne : $V = Q/S$, β le coefficient de quantité de mouvement, g la gravité, J les pertes de charge linéaires par frottement, J_s pertes de charge singulières : élargissement ou rétrécissement brusques, q les pertes ou apports latéraux (en m^2/s) (ruissellement, pluie, déversements, échanges avec le lit majeur) et $k = 1$ si $q < 0$, $k = 0$ sinon.

L'équation de Manning-Strickler est utilisée dans MAGE pour exprimer la pente de charge J qui est un terme source utilisé dans le système Saint-Venant :

$$J = \frac{|Q|Q}{D^2} \quad \text{avec} \quad D = K_s S R_h^{2/3} \quad (9)$$

3.1.2. Calcul de contrainte et transport solide

A partir de ces résultats hydrauliques, il est possible de calculer les contraintes s'exerçant sur le fond de la rivière. La force tractrice τ se calcule à l'aide de la formule suivante.

$$\tau = \gamma R_h^{-1/3} K^{-2} V^2 \quad (10)$$

Avec $\gamma = \rho g$, ρ le poids volumique de l'eau soit 1000 kg/m^3 , g l'accélération de la pesanteur, R_h le rayon hydraulique représentant le ratio entre la section d'écoulement et le périmètre mouillé, K le coefficient de Strickler, V la vitesse.

Après avoir calculé cette contrainte, il convient de calculer la contrainte efficace (τ_{eff}), c'est-à-dire la contrainte qui s'applique sur les sédiments.

$$\tau_{eff} = \left(\frac{K}{K_S}\right)^{1,5} \tau \quad (11)$$

avec $K_S = 26 / D_{90}^{1/6}$ le coefficient de Strickler de peau.

Puis, le paramètre de Shields (ou contrainte adimensionnelle de cisaillement θ) peut être calculé.

$$\theta = \frac{\tau_{eff}}{(\rho_s - \rho) g D_{50}} \quad (12)$$

avec ρ_s la masse volumique du solide soit 2650 kg/m³ pour le sable quartzueux, D_{50} la médiane de taille des sédiments (cf. Tableau 1). On attribue au paramètre de Shields critique la valeur de : $\theta_{cr} = 0,05$. Ainsi, lorsque $\theta > \theta_{cr}$ il y a mise en mouvement des sédiments de taille donnée par le D_{50} .

Il est également intéressant de quantifier la capacité de transport par charriage. Pour cela, deux formules peuvent être testées. La formule de Meyer-Peter & Müller (1948) est l'une des plus utilisées.

$$\phi = 8 (\theta - \theta_{cr})^{1,5} \quad (13)$$

Il existe de nombreuses autres formules dont celle de Recking (2010).

$$\phi = \begin{cases} 5 \times 10^{-4} \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-18\sqrt{I_f}} \left(\frac{\theta_{84}}{\theta_{c84}}\right)^{6,5} & \text{pour } \theta_{84} \leq \theta_m \\ 14 \theta_{84}^{2,45} & \text{pour } \theta_{84} > \theta_m \end{cases} \quad (14)$$

avec θ_{84} le paramètre de Shields calculé avec D_{84} (au lieu de D_{50}) et le paramètre de Shields de référence θ_m donné par :

$$\theta_m = 12,53 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{4,445\sqrt{I_f}} \theta_{c84}^{1,605} \quad (15)$$

et θ_{c84} donné par l'équation :

$$\theta_{c84} = (1,32I_f + 0,037) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-0,93} \quad (16)$$

3.1.3. Modèle hydraulique de l'Arc et de l'Isère

Un modèle hydraulique unidimensionnel a été construit par Junjian Deng et commence en aval du barrage de Saint-Martin-La-Porte (SMLP) sur l'Arc jusqu'à Grenoble sur l'Isère, ce qui représente environ 110 km. Il y a au total 1558 profils en travers, cinq seuils et quatre apports latéraux. Un modèle avait déjà été construit sur l'Isère par Roxanne Caillaud (2013), sa géométrie est utilisée pour la partie de l'Isère, tandis que différentes données ont été sélectionnées pour la partie Arc afin de construire la géométrie du modèle avec un effort mis en œuvre pour représenter au mieux les bancs de galets (Tableau 2). Les données autour de 2010-2011 sont majoritairement choisies dans l'objectif de construire un modèle pour analyser les comportements des Matières En Suspension (MES) pendant les chasses de barrage en 2010 et 2011.

Tableau 2: Tableau récapitulatif des données sélectionnées pour l'Arc.

Type	Date	Rivière	Tronçon	Précision
Bathymétrie	Post-crue 2008	Arc	SMLP-Confluence	36 profils en travers sur 50 km
Bathymétrie	Janv. 2011	Arc	Aiguebelle-Confluence	7 profils en travers sur 8 km
Bathymétrie	2011	Arc	Ste Marie de Cuines	54 profils en travers sur 5 km
LiDAR	Nov. 2013	Arc	SMLP-Confluence	Nuage de points de 25 cm

Compte-tenu de la présence de bancs de galets alternés, une interpolation des profils en travers a été effectuée, leur nombre étant trop faible pour représenter les bancs.

Cinq seuils ont ensuite été représentés dans le modèle (Tableau 3). Les équations de Barré de Saint-Venant ne fonctionnent plus dans les profils de seuil et sont remplacées par une équation de seuil.

Tableau 3: Tableau récapitulatif des paramètres des seuils dans le modèle hydraulique.

Nom du seuil	PK (km)	Côte de déversement (m)	Largeur déversante L (m)	Coefficient de débit μ
Longefan	- 49,6	508,00	10	0,4
La Christine	-13,0	334,90	45	0,4
Aiguebelle	-9,3	313,31	25	0,4
Montmélian	14,1	260,95	50	0,4
Cheylas	27,4	242,90	90	0,4

Afin d'effectuer le calage du modèle, les conditions aux limites avec en amont l'hydrogramme à Pontamafrey et en aval une courbe de tarage à Grenoble, ainsi que différents hydrogrammes correspondant aux apports ont été réalisés. Le modèle a été calé avec 2 crues de 2010 et 2011. Le calage a permis de déterminer des coefficients de Strickler adaptés pour le lit mineur et le lit moyen (Tableau 4). La crue de 2011 présentant des débits plus faibles que celle de 2010, elle a été utilisée pour caler le coefficient de frottement du lit mineur, tandis que celle de 2010 a pu permettre la détermination du coefficient de Strickler du lit moyen.

Tableau 4: Tableau récapitulatif des valeurs de coefficient de Strickler calées pour les chasses de 2010 et 2011.

	PK début (km)	PK fin (km)	K_m ($m^{1/3}/s$)	K_M ($m^{1/3}/s$)
Tronçon 1	-50,5	-40	20	20
Tronçon 2	-40	-30	25	20
Tronçon 3	-30	-10,4	30	20
Tronçon 4	-10,4	0	40	15
Tronçon 5	0	66	45	15

Dans le cadre de ce stage, le modèle est lancé en régime permanent et ne nécessite donc pas d'hydrogramme. De la même façon, les apports seront définis en tant que valeur permanente pour chaque simulation, ils seront définis pour chaque débit d'entrée à Pontamafrey grâce à des courbes des débits classés (voir Partie 3.2).

3.1.4. Détermination des débits à entrer dans le modèle hydraulique

Afin d'être en capacité de caractériser les différents débits affectés au modèle hydraulique, il s'avère intéressant de connaître l'occurrence des débits le long du système Arc-Isère. Pour cela, des courbes des débits classés peuvent être établies. Il s'agit de courbes représentant le pourcentage du temps durant lequel une valeur de débit a été atteinte ou dépassée. Elles permettront notamment de définir les apports liquides (localisation Figure 2) à rentrer dans le modèle hydraulique pour réaliser les simulations.

Des chroniques de débits sont disponibles sur BDOH (Base de Données des Observatoires en Hydrologie, INRAE) pour quatre stations sur l'Arc et l'Isère : Pontamafrey, Aiguebelle, Montmélian et Grenoble (localisation Figure 2).

Afin d'établir une courbe des débits classés la plus fiable possible, l'entièreté des données de débits disponibles et validées a été recensée. Les dates de début et de fin des chroniques de débit utilisées pour réaliser les courbes sont contenues dans le tableau suivant (Tableau 5).

Tableau 5: Dates de début et de fin des chroniques de débit.

Station	Début	Fin
Pontamafrey	01/01/2009	01/01/2021
Aiguebelle	25/05/2011	13/11/2019
Montmélian	01/01/2010	31/12/2015
Grenoble-campus	01/01/2005	31/12/2020

Les données de débit ont directement été téléchargées à un pas de temps horaire depuis BDOH, et un traitement des données sous Python a été réalisé afin de ne pas conserver les lacunes (absence de données). Elles ont par la suite été transférées en format Excel puis utilisées pour établir une courbe des débits classés pour chaque station. Pour ce faire, pour chacune des quatre stations, les n données ont été triées selon un ordre décroissant, puis, un rang r ($1 \leq r \leq n$) a été attribué à chaque ligne. L'occurrence p a été calculée selon la formule :

$$p = \frac{r}{n} \quad (17)$$

Un graphique représentant le débit Q en fonction de l'occurrence a ensuite été établi : il s'agit d'une courbe des débits classés. Ces courbes des débits classés pour chaque station sont présentes ci-dessous (Figure 7). Afin d'en faciliter la lecture au niveau des faibles pourcentages et donc des débits de crue, l'axe des abscisses est représenté en log (base 10).

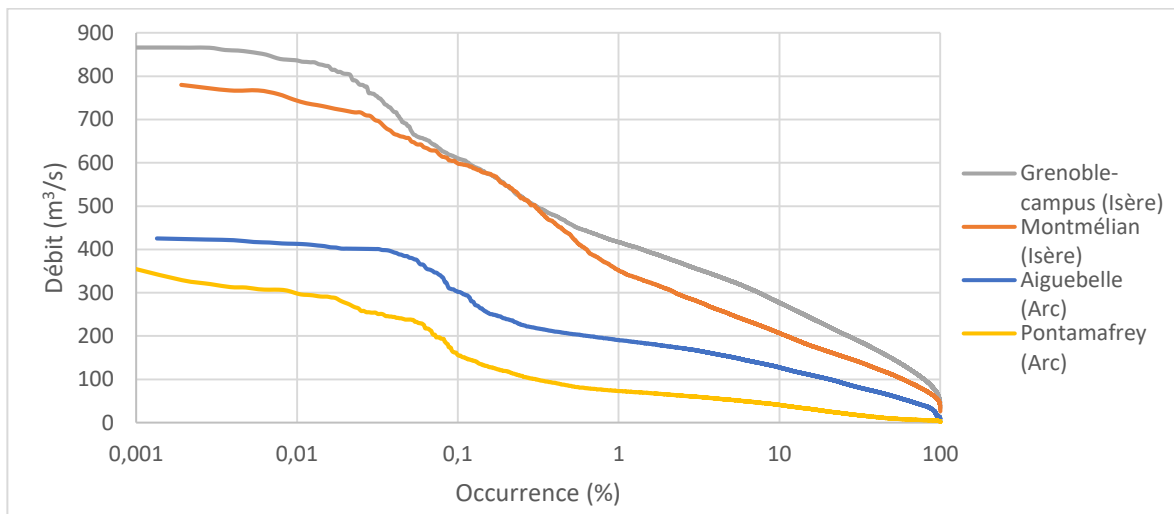


Figure 7: Courbes des débits classés aux stations de Pontamafrey, Aiguebelle, Montmélian et Grenoble-campus.

Pour rappel, les courbes des débits classés représentent le pourcentage du temps durant lequel la valeur du débit horaire figurant en ordonnée a été atteinte ou dépassée. Ainsi, par exemple à la station de Grenoble-campus, 1 % des débits sont supérieurs ou égaux à environ 415 m³/s et 0,1 % des débits sont supérieurs ou égaux à environ 610 m³/s.

Ces courbes sont globalement parallèles ce qui est cohérent vis-à-vis du résultat attendu, mise à part la courbe des débits classés de Montmélian qui rejoint celle de Grenoble aux alentours des 0,1 % d'occurrence. Cela peut s'expliquer par la plus faible quantité de données présentes pour la chronique de Montmélian ou bien plus vraisemblablement par un arrêt de l'usine Cheylas pour ces forts débits. Le fait que les débits de crue encore plus forts soient à nouveau différents entre Grenoble et Montmélian pourrait s'expliquer par le fait que l'usine Cheylas devient négligeable par rapport aux débits transités par les torrents constituant également des apports liquides.

L'objectif étant de faire des simulations hydrauliques de l'ensemble du tronçon Arc-Isère pour différents débits d'occurrence donnée, il est nécessaire d'adapter ces débits le long du système au niveau de chaque

principal apport liquide (restitution à Randens, confluence Isère, restitution au Cheylas). A noter que cette méthodologie implique que tous les apports intermédiaires (affluents mineurs) sont regroupés et intégrés dans ces trois apports principaux. Ainsi, pour la même occurrence, la différence de débit entre les courbes correspond aux apports à rentrer dans le modèle hydraulique. Par exemple, pour une occurrence donnée, la différence de débit entre Aiguebelle et Pontamafrey correspond à l'apport de l'usine Randens et pourra être rentré en tant que tel dans les conditions initiales du modèle. La même opération s'effectuera pour les autres apports : la différence de débit entre Montmélian et Aiguebelle correspond à l'apport de la confluence et la différence de débit entre Grenoble-campus et Montmélian correspond à l'apport de l'usine Cheylas.

Il convient de garder à l'esprit que concernant les débits d'entrée du modèle hydraulique, il faut réfléchir en terme de débits et non d'occurrence, bien que cette dernière permettra de caractériser les débits choisis et de définir les apports. Ainsi, le Tableau 6 a été établi et indique le débit à Aiguebelle, Montmélian et Grenoble-campus en fonction de l'occurrence d'un débit précis à Pontamafrey. Le tableau indique également la différence de débit entre chaque station et donc les apports à Randens, à la confluence et au Cheylas. Il servira donc de support afin de connaître les données d'entrée du modèle hydraulique, une simulation pouvant être réalisée pour chaque débit à Pontamafrey.

Tableau 6: Débits aux stations de Pontamafrey, Aiguebelle, Montmélian et Grenoble-campus pour les mêmes occurrences et définition des apports.

Occurrence	Débits (m ³ /s)						
	Pontamafrey	ΔQ Randens	Aiguebelle	ΔQ Confluence	Montmélian	ΔQ Cheylas	Grenoble-campus
5,90%	50	96	146	93	239	77	316
3,00%	60	107	167	115	282	74	356
1,35%	70	115	185	147	332	70	402
0,610%	80	121	201	202	403	42	445
0,425%	90	119	209	243	452	22	474
0,305%	100	118	218	279	497	4	501
0,190%	120	121	241	311	552	4	556
0,110%	150	146	296	299	595	11	606
0,087%	175	135	310	296	606	14	620
0,072%	200	147	347	281	628	12	640
0,034%	250	148	398	288	686	55	741
0,010%	300	112	412	328	740	97	837
0,001%	350	75	425	357	782	84	866

Par exemple, le débit de 50 m³/s se produit à l'occurrence de 5,90 % à Pontamafrey, et pour cette même occurrence, le débit à Aiguebelle est de 146 m³/s, celui de Montmélian à 239 m³/s et celui à Grenoble de 316 m³/s. Concernant la plus faible occurrence (0,001 %), le nombre plus réduit de données à Montmélian ne permet pas d'obtenir cette valeur, l'hypothèse est alors établie que le ΔQ à la confluence reste inchangé.

3.2. Traitement SIG (Système d'Information Géographique)

L'objectif du traitement SIG est de créer une surface à partir des lignes d'eau calculées par le modèle hydraulique, puis de croiser cette surface avec le MNT pour évaluer les surfaces et volumes exondés. Cette opération doit être réalisée pour chacun des débits du Tableau 6.

3.2.1. Modèles numériques de terrain

Au total, 5 modèles numériques de terrain (MNT) différents composent la topographie du système Arc-Isère servant à réaliser les calculs sous ArcMap (Tableau 7).

Tableau 7: Récapitulatif des MNTs utilisés.

MNT	Secteur	Date	Pas	Données
MNT 1	SMLP - Randens	2013	0,5 m	Lidar, format XYZ
MNT 2	Randens - confluence	2013	0,5 m	Lidar, format XYZ
MNT 3	Confluence - Montmélian	2011	0,5 m	Lidar, format XYZ
MNT 4	Aval Montmélian (manquant)	-	0,5 m	Géométrie modèle, XYZ
MNT 5	Suite Isère -Grenoble	2015	1 m	Lidar, format ASCII

Des MNTs issus de levés Lidar ont été récupérés. Le premier modélise la topographie de l'Arc depuis Saint-Martin-la-Porte jusqu'à Randens, il date de 2013 et est au pas de 0,5 m. Il est fourni au format .xyz ce qui signifie qu'il doit être modifié pour être visualisable sous ArcGIS. Ainsi, l'outil ASCII 3D vers classe d'entité permet de l'ouvrir sous forme d'un nuage de points, en lui appliquant un système de coordonnées Lambert 93 et un espacement de 0,5 m. Puis l'outil IDW permet d'interpoler cette nouvelle classe d'entité en un raster. Cet outil d'interpolation de pondération par l'inverse de la distance, détermine la valeur de chaque pixel de taille spécifiée à travers une combinaison pondérée de manière linéaire d'un ensemble de points d'échantillonnage. Cette méthode fonctionne sur le principe qu'une variable plus lointaine a moins d'influence qu'une plus proche. Une comparaison a été effectuée en convertissant les couches .xyz en .tif grâce à QGIS, ce qui donne un même raster en sortie. Cependant, la méthode précédente permet de s'affranchir des problèmes de répétition de données contenus dans les fichiers .xyz, c'est pourquoi elle a été utilisée. La même opération a été réalisée pour les 2 MNTs suivants au format .xyz. Concernant le dernier MNT sur l'Isère, qui date quant à lui de 2015, avec un pas de 1 m, il est fourni sous format ASCII directement visualisable sous ArcGIS. L'ensemble de ces levés Lidar permet de couvrir la quasi-totalité du système Arc-Isère, mis à part un secteur de 6 km situé à l'aval de Montmélian. A cet endroit, le MNT a donc été créé à partir de la géométrie du modèle hydraulique préalablement réalisé. Les points de la géométrie des profils en travers ont ainsi été récupérés, avant d'être interpolés plus finement (10 m) sous Secma, puis d'être à leur tour interpolés par l'outil Voisin Naturel selon un pas de 0,5 m. Ce secteur présente donc une forte incertitude compte tenu du manque de données. Les calculs de stocks y seront réalisés mais les résultats ne seront pas interprétés.

3.2.2. Détermination d'une méthode d'interpolation des données

Une fois les simulations hydrauliques effectuées sous MAGE, il convient de spatialiser les résultats sur SIG. Pour ce faire, le logiciel choisi est ArcMap 10.6, car il contient plus de fonctionnalités que QGIS. Avant de traiter les données de ligne d'eau issues de MAGE, il convient de déterminer une méthode efficace et correcte permettant à terme de connaître la surface et le volume des bancs en fonction du débit.

Ainsi, une première simulation test à un débit de 50 m³/s a été réalisée. Les résultats de la modélisation sur MAGE ont été extraits depuis un fichier contenant de nombreuses informations mais surtout ce qui nous intéresse : la ligne d'eau de l'amont à l'aval. Plus précisément, il y a une valeur de côte (Z) attribuée à chaque profil. La géométrie de chaque bief a également été exportée (elle reste inchangée peu importe la simulation). Les fichiers contenant cette géométrie comportent la latitude et la longitude (XY) ainsi que la côte du fond. Il convient donc d'attribuer à ces points XY le Z de la ligne d'eau du fichier résultat. Un fichier texte contenant la ligne d'eau simulée pour ce débit et les coordonnées XY (contenues dans la géométrie du modèle) du tronçon étudié a ainsi été créé par le biais d'un programme Python. Il est ensuite possible d'utiliser les fichiers .txt sous ArcGIS en les important en créant une classe d'entités à partir de XYZ. Cela crée un nuage de points. Plusieurs tests d'interpolation de ce nuage de points ont été

réalisés afin de voir quels outils peuvent permettre une bonne interpolation. L'outil « Voisin naturel » s'est avéré intéressant. Cet outil d'interpolation recherche le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point désigné et lui applique une pondération sur la base de surfaces proportionnelles. Il s'appuie sur l'utilisation du diagramme de Voronoï. Afin de connaître les surfaces exondées ou non, il est ensuite possible d'effectuer une simple soustraction entre cette interpolation et le MNT. Si le raster résultant de cette soustraction donne des valeurs négatives, cela veut dire que le MNT est plus élevé que la ligne d'eau, et donc que le secteur est exondé.

Trois possibilités s'offraient quant à la nature du fichier texte utilisé pour réaliser l'interpolation avec l'outil « Voisin Naturel » :

- *Méthode 1* : Contenir les coordonnées XY des points aux extrémités de chaque profil ainsi que la ligne d'eau correspondante à ce profil ;
- *Méthode 2* : Partir de ce fichier contenant les extrémités uniquement et les interpoler pour obtenir un maillage très fin avec le Z de la ligne d'eau sur l'entièreté des points du profil ;
- *Méthode 3* : Utiliser l'ensemble des points XY du maillage du modèle hydraulique (une cinquantaine de points par profil) et y attribuer la côte de la ligne d'eau.

Afin de tester à la fois la fiabilité de l'outil « Voisin Naturel » pour interpoler le jeu de données en un raster, et quel type de fichier texte en entrée est le plus adapté (i.e. quelle quantité de points pour l'interpolation), un secteur d'environ 8 km a été étudié. Ce secteur se situe sur l'Arc, au niveau de Sainte-Marie-de-Cuines. Il a été choisi à cause de la présence d'un virage, ce qui constitue donc une zone délicate à interpoler.

Chacune des trois possibilités listées précédemment a été testée. Afin de réaliser la seconde, soit une interpolation très fine des points avant de réaliser l'interpolation en un raster, l'outil Secma a été utilisé. Ce logiciel permet de réaliser un maillage plus fin de la zone, en ajoutant des sections transversalement ou longitudinalement. Ainsi, le jeu de données XYZ contenant uniquement les points aux extrémités de chaque profil et la côte de la ligne d'eau correspondante (*méthode 1*) a été transformé en format .st (grâce à un programme Python) afin d'être lu par le logiciel Secma. Un maillage très fin avec un pas raffiné transversalement et longitudinalement a été créé. Le fichier .m de maillage sorti par Secma est ensuite transformé sous Python en fichier .xyz afin de pouvoir être lu dans ArcGIS. Il est ensuite possible, tout comme pour les autres options, de créer une classe d'entité à partir de ces points et de réaliser l'interpolation avec l'outil « Voisin Naturel », et enfin de réaliser une soustraction avec le MNT.

La *méthode 2*, avec un maillage très fin, peut être considérée comme la référence compte tenu du nombre très élevé de points entrant en compte dans l'interpolation. Néanmoins, le problème réside dans le temps d'interpolation sous ArcMap qui est largement plus élevé dans le cas présent (30 min), sachant qu'il s'agit uniquement d'un tronçon de 8 km et que l'interpolation devra être réalisée pour chaque simulation sur l'entièreté du secteur étudié soit environ 110 km. Le temps de calcul pour la *méthode 1* est de 5 min et s'élève seulement à 6 min 30 pour la *méthode 3*.

Une comparaison entre les rasters résultant de la *méthode 1* et 3 et le raster de référence (*méthode 2*) a été réalisée en réalisant une soustraction (Figure 8). Si les différences ne sont pas significatives (quelques centimètres), cela permet de choisir cette possibilité et de l'utiliser pour chaque simulation, en réalisant une interpolation par l'outil « Voisin Naturel », sinon, il faudrait utiliser Secma pour raffiner le maillage sur l'ensemble du secteur.

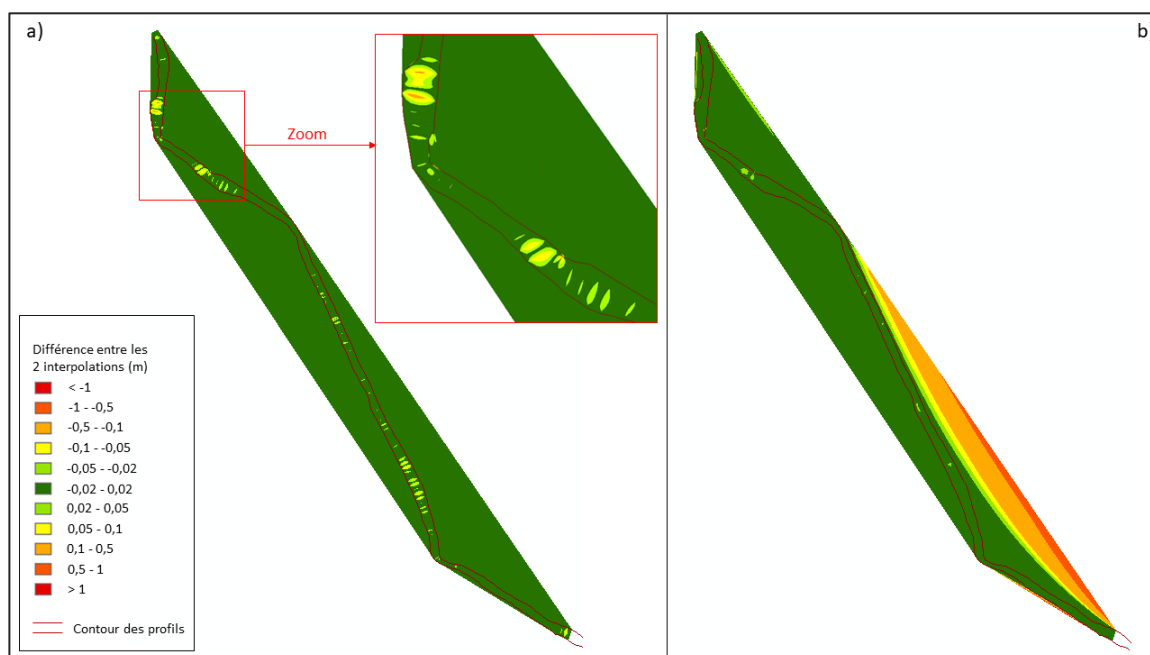


Figure 8: Différence entre l'interpolation de référence (méthode 2) et (a) l'interpolation avec la méthode 1 (b) l'interpolation avec la méthode 3

Les résultats de la soustraction donnent une moyenne de différence très faible dans les deux cas, mais pour la *méthode 1*, des différences assez élevées (environ 10 cm) sont visibles transversalement au niveau de certains profils. Cette différence peut s'expliquer par la variabilité engendrée par l'utilisation du diagramme de Voronoï pour l'interpolation. En effet, il semble y avoir des problèmes dans l'interpolation lorsque les profils consécutifs sont peu parallèles et lorsqu'il y a un élargissement ou un rétrécissement local de la longueur du profil (Figure 9).

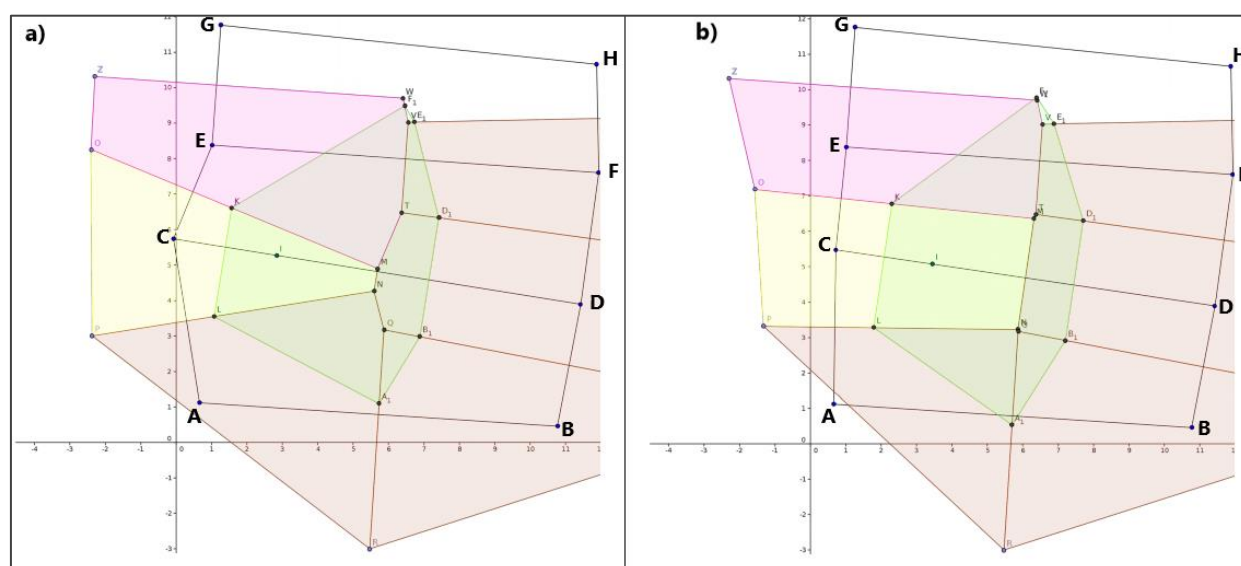


Figure 9: Explication du fonctionnement de l'outil "Voisin Naturel" (ArcGIS), avec (a) maillage irrégulier et (b) maillage régulier.

En revanche, concernant la *méthode 3*, les différences sont très majoritairement inférieures à 2 cm et ne dépassent pas 5 cm. Les résultats sont donc améliorés en prenant chaque point du maillage et en y attribuant la côte de la ligne d'eau, sans pour autant augmenter de beaucoup le temps de calcul. Une incertitude réduite subsiste mais peut être négligeable si l'erreur du modèle hydraulique est du même ordre.

3.2.3. Calcul des surfaces et volumes exondés

Par la suite, il convient de trouver une méthode pour calculer la surface exondée des bancs pour chacun des débits, et à terme leur volume. Un outil a été trouvé. Il s'agit de l'outil Surface-Volume (3D Analyst – Surface Fonctionnelle) de la boîte à outils ArcGIS. Il est possible d'y spécifier la hauteur du plan, ici 0, avec un facteur Z de 1, et si l'on veut la surface et le volume en dessous ou au-dessus de ce plan. Ici on choisit BELOW car le raster de soustraction entre XYZ de la ligne d'eau et le MNT est négatif si la ligne d'eau est inférieure au MNT donc si la surface est exondée. Cet outil donne en résultat un fichier texte indiquant la surface (en m²) et le volume (en m³) exondés (la vérification de l'outil a été effectuée en calculant manuellement la surface d'un banc sur la carte). Néanmoins, avant de pouvoir utiliser cet outil pour calculer la surface d'un banc, il convient de créer un polygone englobant le banc mais excluant les berges et de découper le raster de soustraction entre la ligne d'eau et le MNT en fonction de ce polygone. Cette étape est très chronophage si elle doit être réalisée pour chaque banc et chaque simulation. Il convient donc de trouver une solution pour automatiser un minimum la manœuvre. L'idée retenue, plutôt que d'analyser chacun des bancs un à un, a été de créer des secteurs de 100 m (unités) compris entre les lignes des berges grâce à l'outil segmentation de la boîte à outils Fluvial corridor. Le raster de soustraction est ensuite fractionné selon ces unités de 100 m. Puis, un model builder est créé afin d'automatiser l'outil Surface-Volume sur l'ensemble des rasters. Cela donne en sortie un fichier texte avec une ligne correspondant à chaque raster avec surface et volume exondé.

Avant d'appliquer cette méthode sur les lignes d'eau issues des simulations hydrauliques pour différents débits, afin d'obtenir des stocks potentiels, il est intéressant et important de connaître le volume des bancs sur la base de l'étiage sévère. C'est pourquoi le volume exondé a été calculé sur la base de la ligne d'eau du Lidar, ce qui donnera un stock brut de référence. Pour cela, la première étape consiste en la création des lignes de berges rive droite et rive gauche sur l'entièreté du système Arc-Isère (par expertise vis-à-vis du MNT et visualisation simultanée sur Géoportail). La problématique de délimitation de ces lignes est très importante, c'est pourquoi elles pourront être affinées par la suite après un premier essai et visualisation des résultats, notamment s'il existe des problèmes au niveau des volumes, qui indiqueraient une prise en compte de berges au lieu de bancs, par exemple. Ensuite, la ligne d'eau du Lidar, c'est-à-dire la partie la plus profonde le long du MNT, a été extraite avant d'être affectée aux points de géométrie grâce à un programme Python et d'être importée en tant que classe d'entité sous ArcGIS. Cette ligne d'eau a alors été interpolée en un raster avec l'outil « Voisin Naturel », puis soustraite avec le MNT (même méthode que pour les données XYZ en sortie de MAGE). La soustraction a ensuite été fractionnée selon les unités de 100 m puis l'outil Surface-Volume appliqué à tous les rasters découpés. Le fichier texte en sortie permet la création d'un graphe représentant le volume exondé en fonction du PK. Ce graphe a permis de repérer des valeurs extrêmes indiquant possiblement une erreur dans la caractérisation des bancs, et donc de modifier les lignes des berges après une analyse plus pointue de ces endroits. Puis, afin d'affiner encore la précision du tracé, l'élévation des berges en rive gauche et rive droite a été comparée. Une valeur seuil de 3 m de différence a été choisie pour définir un écart trop important qui nécessite de s'intéresser au secteur et d'y modifier le tracé des lignes de berge. La différence avec la hauteur de la ligne d'eau a aussi été calculée, car il est possible que la hauteur des points correspondant aux lignes de berge soit cohérente mais que les deux berges soient toutes deux situées trop haut. Sachant que 180 points avaient une différence supérieure à 3 m entre rive gauche et rive droite, et que 272 points avaient cette même différence entre berge et ligne d'eau, l'entièreté de ces points a été vérifié manuellement. Les lignes de berge ont ainsi pu être légèrement décalées car empiétant sur le haut de la berge, ou ont pu être conservées telles quelles si la différence d'élévation était explicable par la présence d'un banc végétalisé par exemple. Les secteurs comprenant des bancs végétalisés augmentant significativement le volume mais ne possédant pas de stocks remobilisables, ont été notés. Après ces parties de vérification et de modification, il a été possible de recommencer les étapes de segmentation, de fractionnement et de calcul des volumes, à partir de limites de berges corrigées.

Cela a abouti finalement à un second graphique présentant moins de valeurs extrêmes ou bien des valeurs élevées mais expliquées. Les lignes ainsi tracées et les unités de 100 m ont été utilisées telles quelles et en suivant la même méthodologie pour le calcul des stocks potentiels par débit, pour chaque débit d'occurrence choisie dans le Tableau 5.

4. Résultats et discussion

4.1. Découpage en tronçons homogènes

Il a semblé intéressant d'analyser les résultats sur de plus petits secteurs représentatifs. Ainsi, 18 tronçons homogènes ont été définis. Ils sont visibles sur cette carte (Figure 10) et leurs caractéristiques sont présentées dans un tableau en Annexe 1. Les limites de ces tronçons d'environ 5 à 10 km sont situées au niveau de confluences, d'apports, de ruptures de pente et de méandres. L'indice de sinuosité de chacun de ces tronçons a été calculé en divisant la longueur développée par la longueur à vol d'oiseau, le nombre résultant permet d'attribuer une classe de sinuosité au secteur.

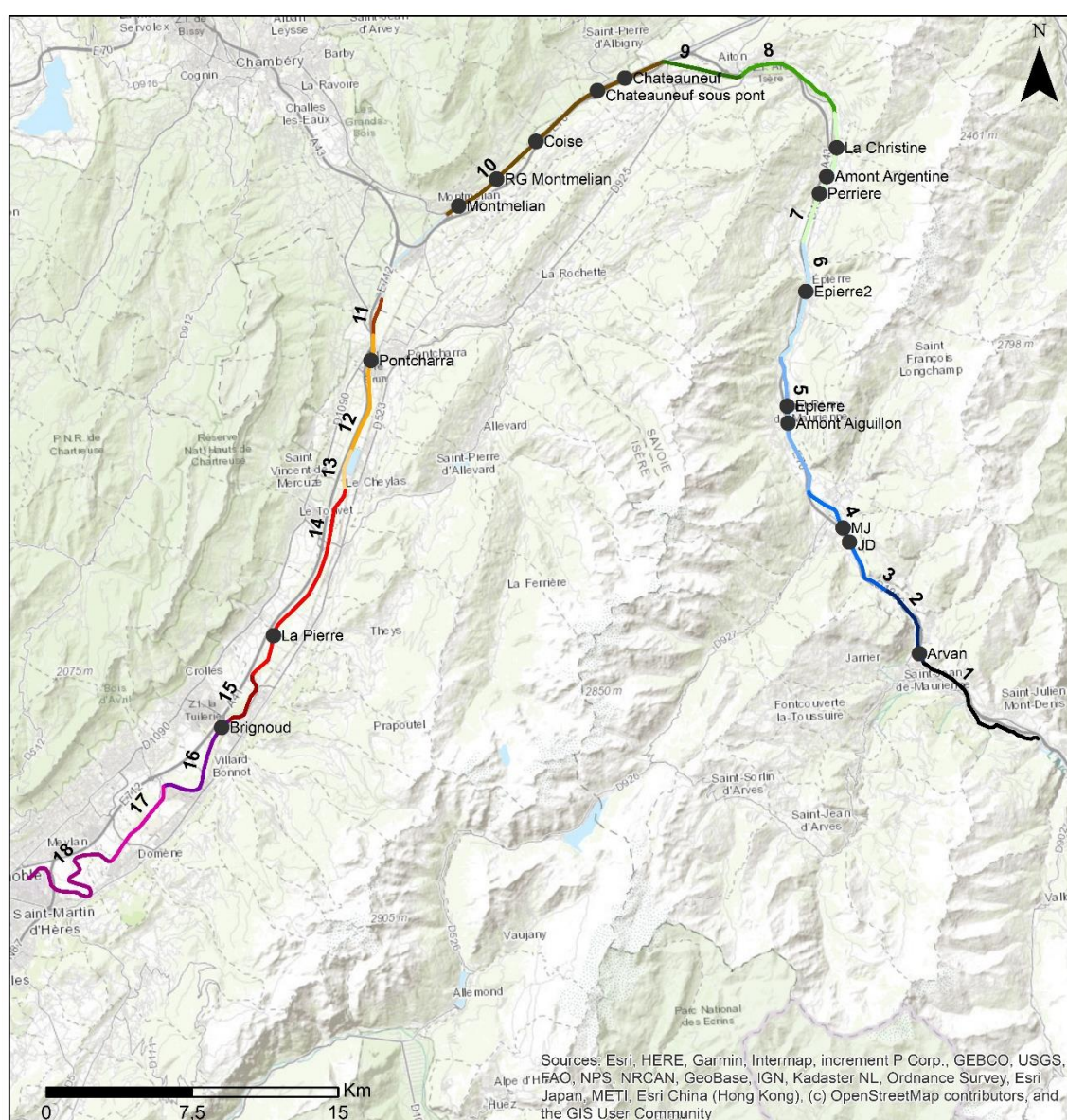


Figure 10: Carte des tronçons homogènes le long du système Arc-Isère et bancs étudiés.

4.2. Surfaces et volumes exondés

4.2.1. Par unités de 100 m

LiDAR

Le calcul des volumes exondés sur la base du LiDAR permet de déterminer le stock brut de sédiments. Comme expliqué dans la méthodologie, plusieurs étapes préalables afin d'ajuster le tracé des berges ont été réalisées. Les résultats de ces changements et quelques illustrations sont présentés en Annexe 2, mais seuls les résultats finaux des calculs sont présentés ici.

Le Tableau 8 recense le volume exondé par secteurs correspondant aux MNTs, afin d'avoir une vision globale des stocks et de la surface exondée. Les volumes ont été également calculés dans le secteur « manquant » correspondant à la zone en aval de Montmélian et ne comprenant pas de relevé Lidar, mais les résultats ne sont pas significatifs compte-tenu du manque de données, les volumes étant parfois bien trop élevés par rapport à la réalité, ce secteur n'est donc pas analysé. Les surfaces et volumes ont également été exprimés par mètre linéaire pour comparer plus aisément les secteurs.

Ici et dans la suite du rapport, les variables sont : L : Longueur, S_e : Surface exondée, S_{el} : Surface exondée par mètre linéaire, V_e : Volume exondé, V_{el} : Volume exondé par mètre linéaire, H_e : Hauteur exondée.

Tableau 8: Surface, volume et hauteur exondés sur la base de l'étiage (LiDAR) selon les secteurs des MNTs.

Secteurs	PK début et fin (km)	L (km)	S_e (m ²)	S_{el} (m ² /m)	V_e (m ³)	V_{el} (m ³ /m)	H_e (m)
SMLP - Randens	-50,7 à -4,2	46,6	1976.10 ³	42	1676.10 ³	36	0,86
Randens - Confluence	-4,2 à 0	4,2	232.10 ³	55	133.10 ³	32	0,58
Confluence - Montmélian	0 à 13,9	13,9	1452.10 ³	104	1101.10 ³	79	0,78
Montmélian - Grenoble	20,2 à 64,6	44,5	2553.10 ³	57	1857.10 ³	42	0,79
Total	-50,7 à 64,6	109,2	6213.10 ³	57	4766.10 ³	44	0,70

Sur la totalité du système Arc-Isère étudié (excepté le secteur manquant), il y a un volume d'un peu moins de 4,8 millions de mètres cubes sur une longueur d'environ 109 km. Le volume exondé par mètre linéaire maximal se situe entre la confluence et Montmélian, avec 79 m³/m. L'indication de la surface permet de connaître la hauteur moyenne exondée qui s'élève à 0,70 m en moyenne, avec un maximum de 0,86 m dans le secteur allant de Saint-Martin-la-Porte (SMLP) à Randens, tandis que le minimum est au niveau du secteur allant de Randens à la confluence avec 0,58 m.

Le graphique (Figure 11) représente le volume exondé par mètre linéaire (m³/m) sur la base de la ligne d'eau du LiDAR et donc d'un étiage sévère, en fonction du point kilométrique (PK). Le 0 correspond à la confluence, tandis qu'un PK négatif indique que l'on se trouve sur l'Arc et un PK positif sur l'Isère. La partie grisée correspond à un manque de données au niveau de l'aval de Montmélian, où il n'y a pas de données LiDAR (secteur « manquant »).

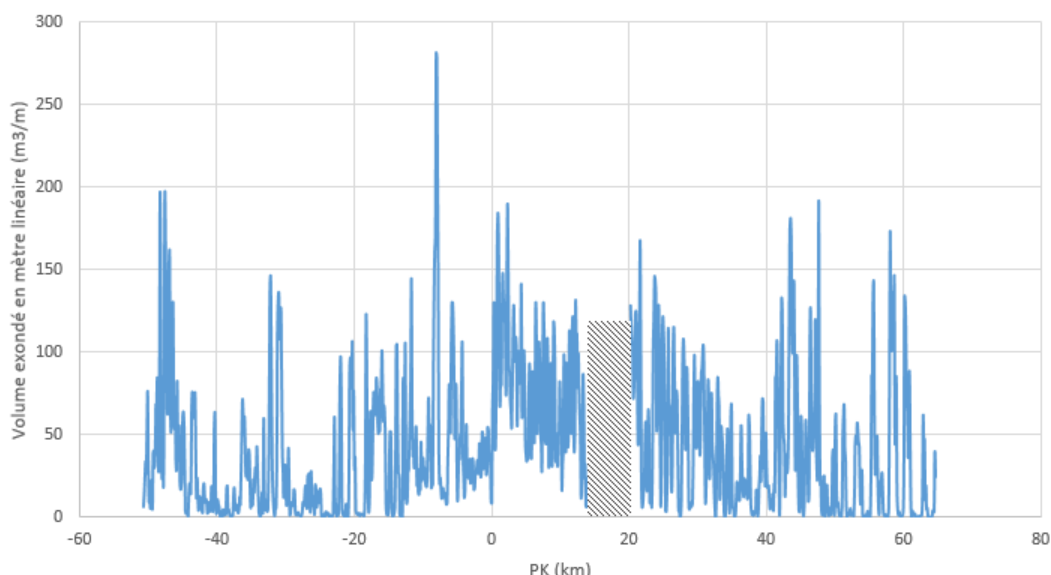


Figure 11: Volume exondé sur la base étiage sévère (LiDAR) en fonction du PK.

On peut remarquer une alternance dans les pics de volume exondé, correspondant justement aux bancs alternés le long du système. On distingue sur le graphique la partie directement en aval de la confluence comprenant des valeurs plus élevées (cf. Tableau 8). En effet, le secteur s'étendant de la confluence à Montmélian présente des valeurs élevées sans atteindre des valeurs extrêmes. Après visualisation photographique sur Géoportail, cela peut s'expliquer par le nombre très important de bancs alternés le long de ce secteur, parfois boisés. Le plus haut pic s'élevant à environ 280 m³/m correspond à une zone très large (environ 230 m) avec une anse d'érosion et de nombreux bancs (au niveau de Randens). La partie plus en aval sur l'Isère présente plusieurs pics de valeur assez élevée, ce qui peut s'expliquer par la présence de bancs végétalisés.

Sur l'ensemble du système Arc-Isère étudié, pour un débit d'étiage, on a en moyenne un volume exondé par mètre linéaire de 43 m³/m, avec un maximum de 281 m³/m. Il y a au total 1092 unités (secteurs de 100 m). Le nombre de secteurs ayant un volume supérieur à un certain nombre est représenté Figure 12.

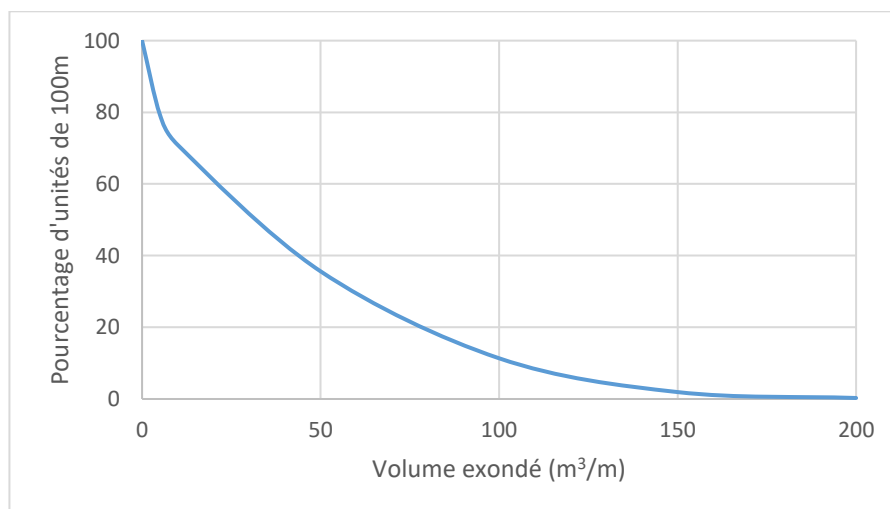


Figure 12: Pourcentage d'unités de 100 m dépassant un seuil de volume exondé par mètre linéaire.

Ainsi, par exemple, environ 11 % des unités ont un volume exondé supérieur à 100 m³/m, et seulement 2 % ont un volume supérieur à 150 m³/m.

Les volumes exondés ont ensuite pu être multipliés par les valeurs de stocks (cf. Partie 2.3), et les stocks bruts totaux ont pu être représentés par tronçon homogène sur le graphique Figure 13.

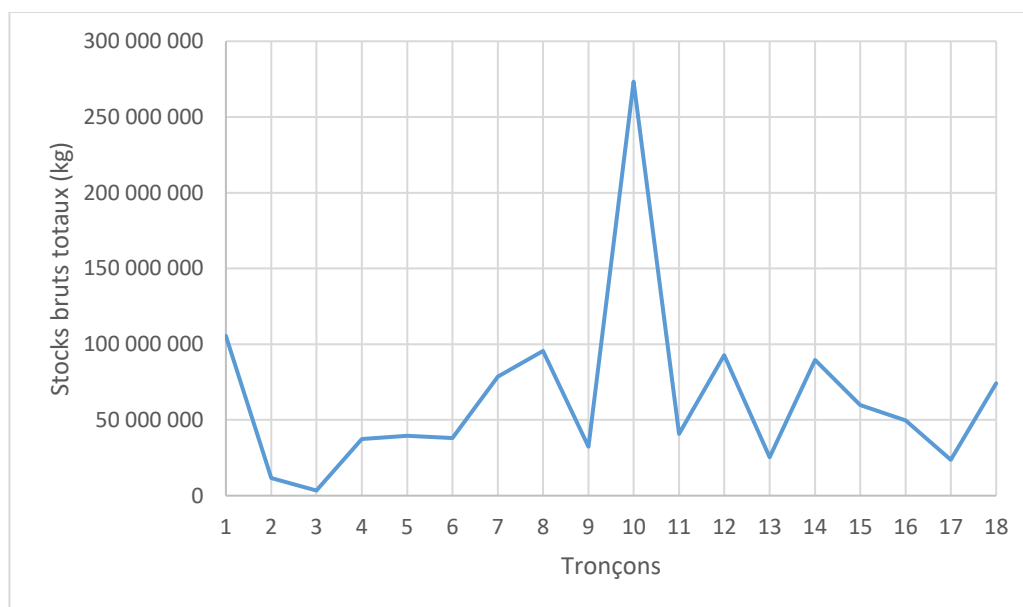


Figure 13: Stocks bruts en subsurface pour les 18 tronçons homogènes.

Le stock brut total en sédiments fins en subsurface sur l'ensemble du système est de $1,17 \cdot 10^9$ kg. Ce stock total correspond à 40 % du flux annuel mesuré à Grenoble, il est ainsi du même ordre de grandeur. Il comprend 88 % de sables soit $1,03 \cdot 10^9$ kg, et 12 % de limons et argiles soit $1,41 \cdot 10^8$ kg. Cela correspond à en moyenne $1,1 \cdot 10^4$ kg/m de sédiments, ou encore 199 kg/m^2 de sable et de limons/argiles. Le tronçon 10 comporte un stock brut plus élevé, ce qui peut s'expliquer car c'est également le tronçon où le volume exondé par mètre linéaire est le plus important, mais c'est aussi le plus long tronçon.

Simulations de débit

Les mêmes tableaux et graphiques que dans la partie précédente ont été réalisés pour chaque débit simulés sur MAGE (cf. Partie Matériel et méthode Tableau 6). Chaque débit ne pouvant être présenté en détails, la Figure 14 résume les résultats.

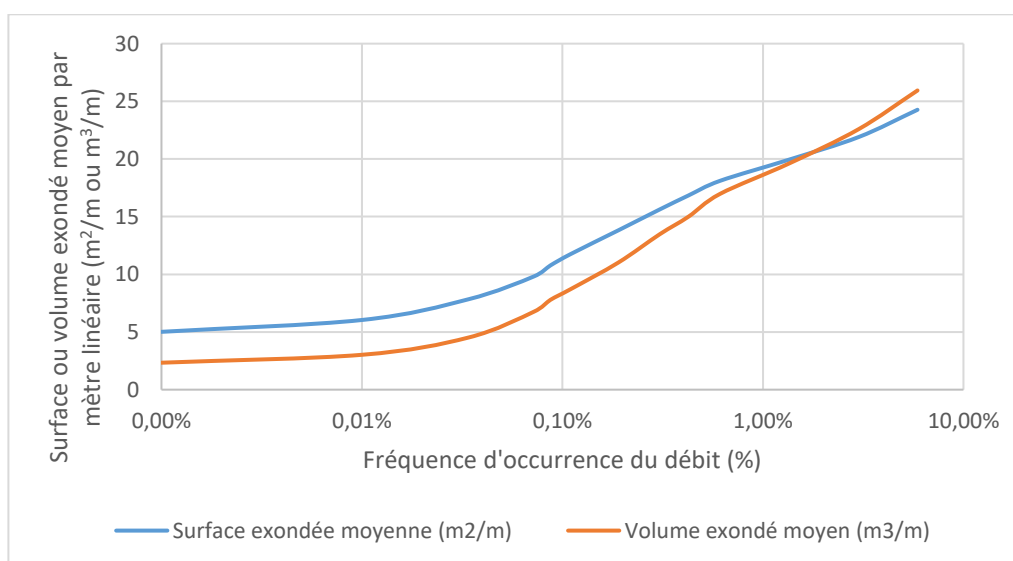


Figure 14: Volume exondé moyen et surface exondée moyenne par mètre linéaire en fonction du débit.

De manière évidente, la surface et le volume exondés diminuent lorsque la fréquence d'occurrence des débits diminue (et donc que les débits augmentent). Pour les débits d'occurrence plus forte, les volumes exondés diminuent peu à peu, tandis qu'en dessous du débit de pourcentage d'occurrence 0,425 %, les volumes exondés chutent plus rapidement, avant que la pente ne diminue à nouveau en dessous de 0,34 %. Le même type de courbe existe pour la surface exondée. La hauteur exondée moyenne, quant à elle, va de 1,08 m pour la plus forte occurrence à 0,47 m pour la plus faible.

4.2.2. Par tronçons homogènes

Le volume exondé en fonction de la fréquence d'occurrence du débit a été représenté pour chacun des tronçons (Figure 10) en échelles logarithmiques sur le graphique Figure 15.

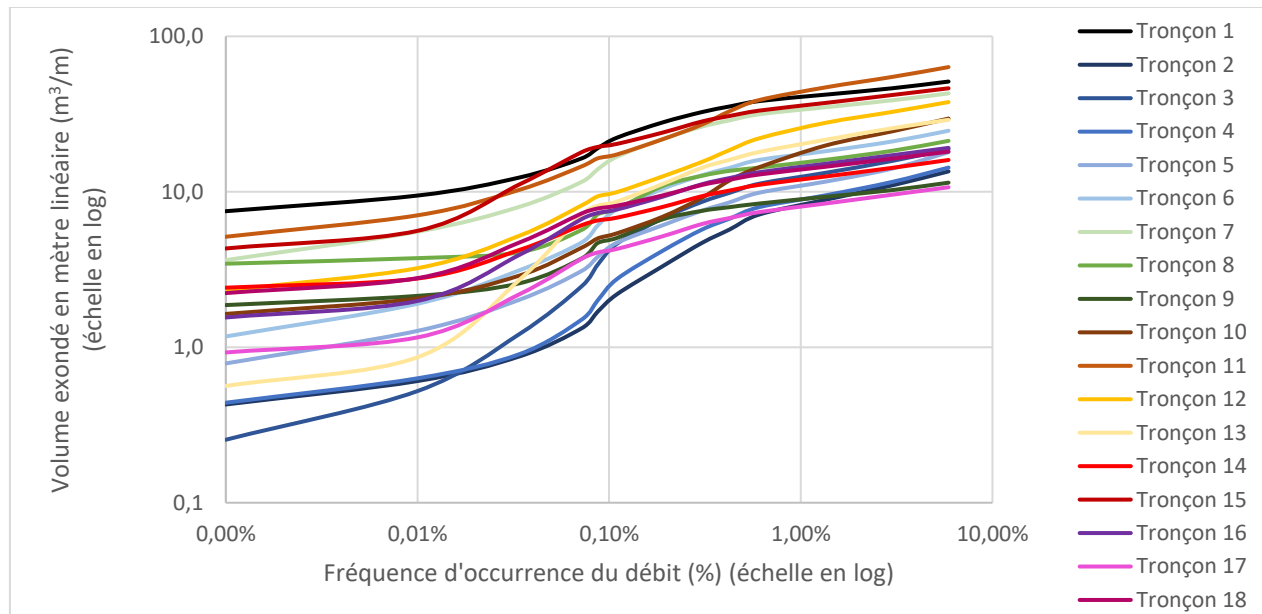


Figure 15: Volume exondé en fonction du débit pour chaque tronçon.

Le tronçon 1, dont les volumes exondés sont anormalement élevés, ne sera pas analysé car les valeurs sont aberrantes. En effet, le modèle est mal calé à ce niveau, la ligne d'eau étant inférieure au MNT, ce qui implique des exagérations considérables au niveau des volumes. On remarque en revanche que les volumes exondés sur les tronçons sur l'Arc sont globalement inférieurs à ceux de l'Isère, ce qui est logique compte tenu du fait que les bancs de l'Arc sont plus petits que ceux de l'Isère. Les bancs 7-8-9, avant la confluence avec l'Isère, présentent des volumes plus élevés. Cela peut s'expliquer par la végétalisation des bancs dans ces secteurs contrairement aux autres bancs sur l'Arc. De plus, les tronçons 8 et 9 ont un comportement qui se rapproche de celui de l'Isère, avec une augmentation du débit par l'apport de Randens et une pente qui s'adoucit. Les tronçons de l'Isère 13 et 17 présentent des valeurs de volumes basses par rapport aux autres tronçons de l'Isère, ce qui peut s'expliquer par la très faible présence de bancs au sein de ces tronçons. De plus, une forte différence de volume exondé se remarque entre le tronçon 13 et le 14, ce qui peut être expliqué par l'apport du Cheylas qui augmente le débit entre ces deux tronçons. On arrive ainsi à distinguer les tronçons où le débit est maîtrisé et les tronçons avec un fonctionnement « naturel » qui sont situés entre Randens et la confluence (tronçons 8 et 9) et en aval de Cheylas (à partir du tronçon 14).

Pour toutes les courbes, on peut distinguer 3 étapes : pour des débits de plus grande occurrence la pente est faible, puis elle devient plus forte et enfin s'affaiblit à nouveau. Un schéma conceptuel a été réalisé afin d'expliquer ce phénomène (Figure 16). On remarque également que la pente des courbes représentant les tronçons de l'Arc est plus forte que celle de l'Isère.

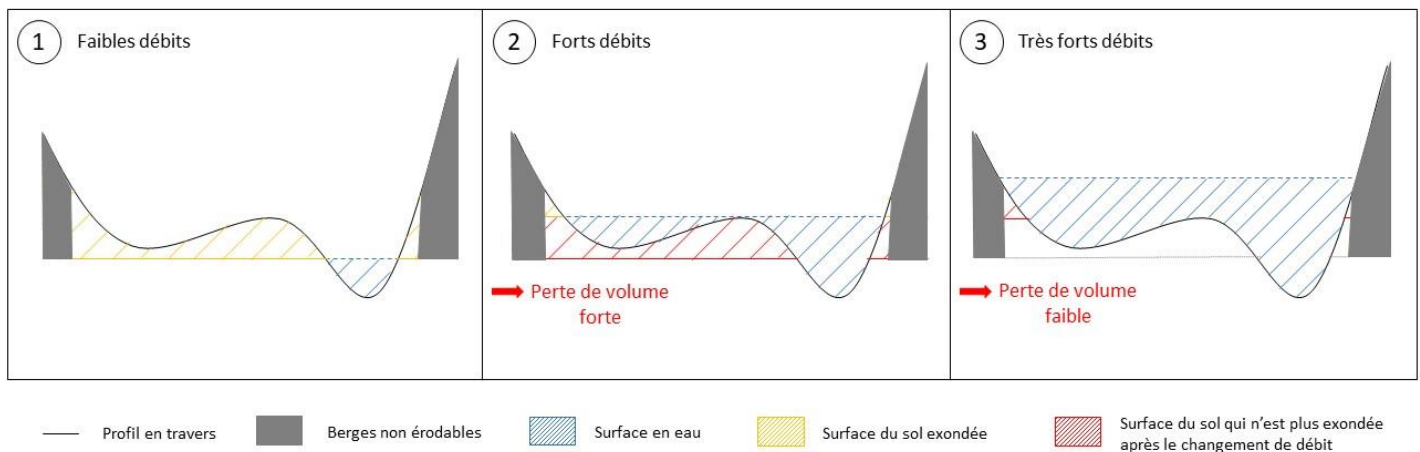


Figure 16: Schéma explicatif des pertes de volume en fonction du débit.

Ainsi, concernant la faible pente pour les plus faibles débits (étape 1), elle s'explique par le fait que l'occurrence change mais que les débits n'augmentent que très peu, donc la hauteur d'eau n'augmente que peu elle aussi. Puis, lorsque les débits augmentent (lorsque la fréquence d'occurrence diminue), la perte de volume occasionnée est très forte (étape 2), car elle prend en compte une grande partie des bancs. En revanche, lorsque l'on se trouve en présence de très forts débits (étape 3), d'occurrence faible, les bancs sont déjà inondés et la perte de volume concerne uniquement le bas des berges.

Les dérivées ont été calculées afin de détecter des changements brusques, que l'on voit légèrement aux alentours de 0,10 % sur le graphique Figure 17, elles sont représentées ci-dessous. Pour calculer les dérivées, l'occurrence et le volume exondé ont été passés en log de 10. En effet, l'axe des abscisses correspond à de nouvelles occurrences calculées de la façon suivante : $10^{(\log Occ_1 - \log Occ_2)/2}$ tandis que l'axe des ordonnées correspond au log du volume exondé rapporté aux nouvelles occurrences et est calculé de cette manière : $(\log V_{e1} - \log V_{e2}) / (\log Occ_1 - \log Occ_2)$.

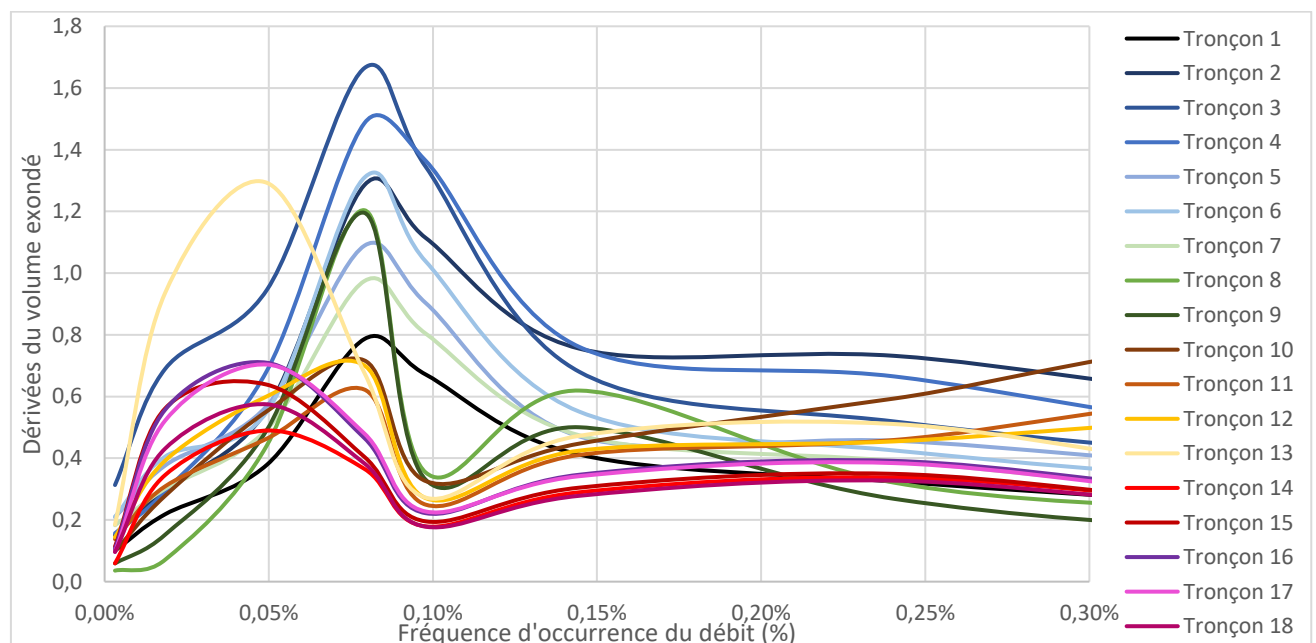


Figure 17: Dérivées du volume exondé en fonction du débit pour chaque tronçon.

On observe clairement des similitudes dans le comportement des courbes représentant les tronçons de l'Arc (dégradé de bleu/vert) et, de la même manière, on retrouve des comportements semblables au sein des tronçons de l'Isère (dégradé de jaune/rouge). Au-delà de ça, les tronçons se suivant

géographiquement sont également les plus semblables, excepté le tronçon 1 qui n'est pas analysé. Les dérivées forment un plateau au niveau des plus grandes occurrences. Pour les tronçons de l'Arc, l'inondation des bancs se situe pour un débit de fréquence d'occurrence de 0,079 %. Pour les tronçons 10-11-12 sur l'Isère, elle est à 0,079 % aussi. Pour les autres tronçons de l'Isère, l'inondation des bancs est située à un débit d'occurrence 0,049 %. L'inondation des bancs se produit donc pour des débits plus élevés pour l'Isère que pour l'Arc.

4.2.3. Par bancs

Mis à part l'analyse du volume exondé en fonction du débit par unités de 100 m puis par tronçons homogènes, il a semblé intéressant d'également connaître l'évolution du volume exondé en fonction du débit au niveau de certains bancs du système Arc-Isère (localisation Figure 10). Ces bancs sont ceux où des manipulations de terrain ont été effectuées (granulométrie, zonage GPS, ou autre). Le graphique Figure 18 représente le volume exondé de ces bancs en fonction du débit. L'échelle étant logarithmique, les valeurs égales à 0 ne sont pas représentées, c'est pourquoi certaines courbes s'arrêtent. Les bancs sont représentés de la couleur du tronçon où ils se situent.

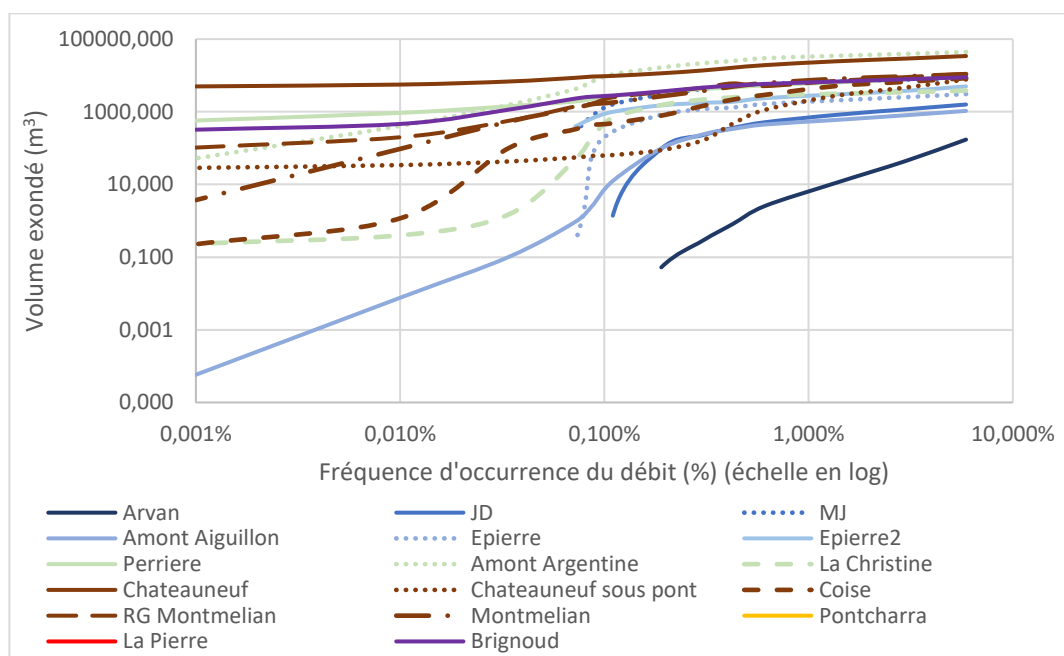


Figure 18: Volume exondé en fonction du débit pour chacun des bancs étudiés.

Les courbes semblent suivre les mêmes étapes que sur le schéma conceptuel Figure 16, avec une période de faible perte de volume puis une période de forte perte et enfin un retour à de faibles pertes car le banc est déjà inondé et les faibles pertes correspondent probablement à de la berge. Les fortes pertes de volume correspondant à la seconde étape se situent approximativement aux mêmes valeurs que pour les tronçons, c'est-à-dire aux alentours de 0,10 %. Il existe toutefois une forte variabilité entre les bancs.

Le banc « RG Montmélian » comporte un passage où le volume exondé augmente alors que le débit diminue, ce qui est potentiellement dû à un problème dans le modèle hydraulique 1D, c'est-à-dire une instabilité ou un passage en régime torrentiel.

En revanche, le banc « Châteauneuf » comporte des valeurs de volume exondé étonnamment élevées et ne diminuant que peu. Cela peut être dû à un problème au niveau du LiDAR, une prise en compte excessive de berge ou à une très forte végétation. Afin de vérifier, le profil en long du banc a été tracé. Il est visible Figure 19.

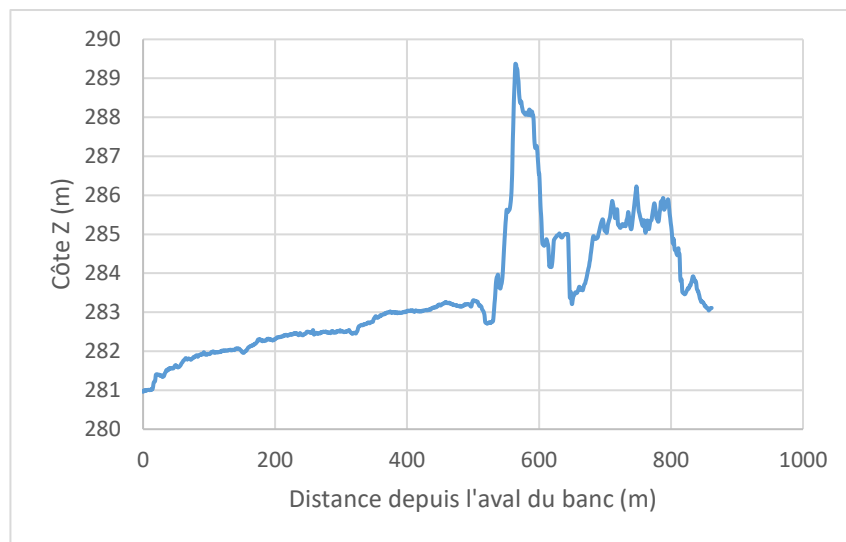


Figure 19: Profil en long du banc de Châteauneuf.

On peut voir sur ce profil en long que la partie au milieu/amont du banc est très surélevée sur le LiDAR, s'élevant à plus de 6 m au-dessus de la partie aval. On visualise sur le LiDAR une forme circulaire surélevée de cette façon. Cette partie correspond à une zone végétalisée sur Géoportail mais cela n'explique pas ces valeurs aussi importantes. Il semblerait donc plus probable que l'erreur soit due au traitement LiDAR. L'amont du banc comporte également une côte élevée. Cela explique que pour les plus grandes occurrences de débit, la partie aval du banc soit progressivement inondée, puis, lorsque les fréquences d'occurrence du débit diminuent, que la perte de volume exondée diminue très fortement car le reste du banc est trop élevé pour être inondé.

4.3. Calcul de transport solide et des stocks potentiellement remobilisables

Tout d'abord, le transport solide par charriage a été calculé à partir de deux formules différentes : celle de Meyer-Peter & Müller (1948) et celle de Recking (2010), expliquées la Partie 3.1.2. Ces calculs s'effectuent uniquement sur le lit moyen, c'est-à-dire au niveau des bancs. Le premier graphique (Figure 20) représente la capacité de transport calculée depuis la formule de Meyer-Peter & Müller (1948) en fonction de l'occurrence du débit. Le second (Figure 21) correspond à la formule de Recking (2010).

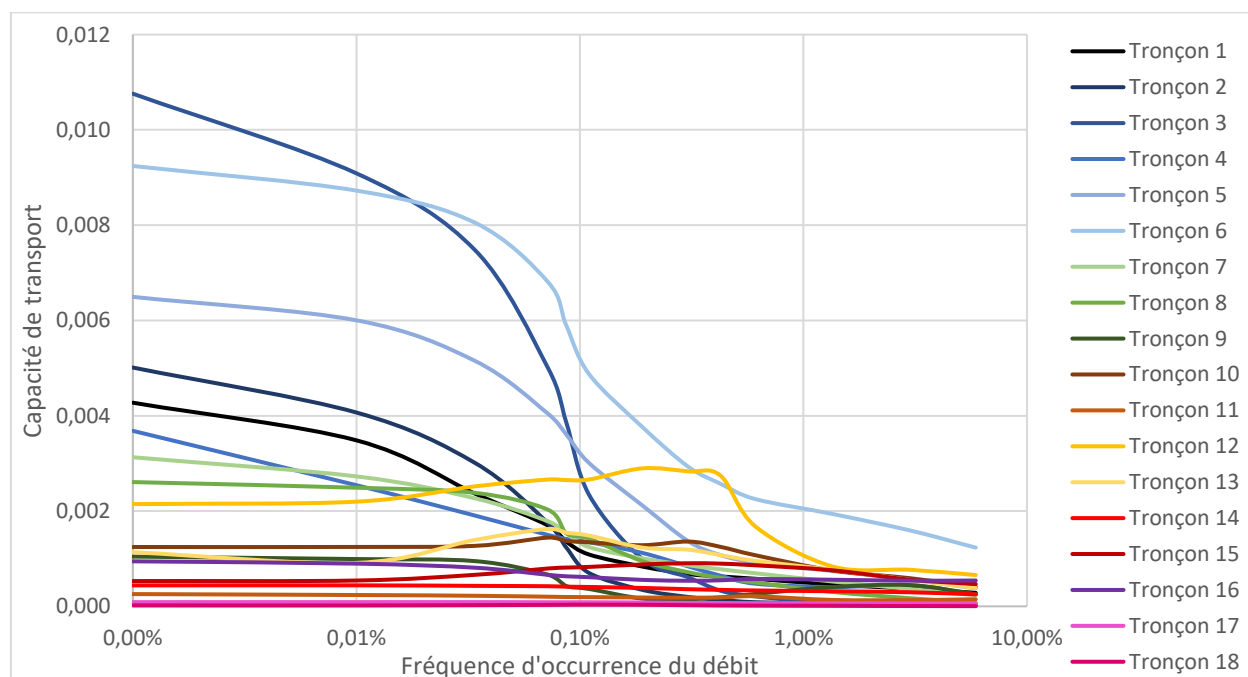


Figure 20: Capacité de transport en fonction du débit (formule de Meyer-Peter & Müller, 1948).

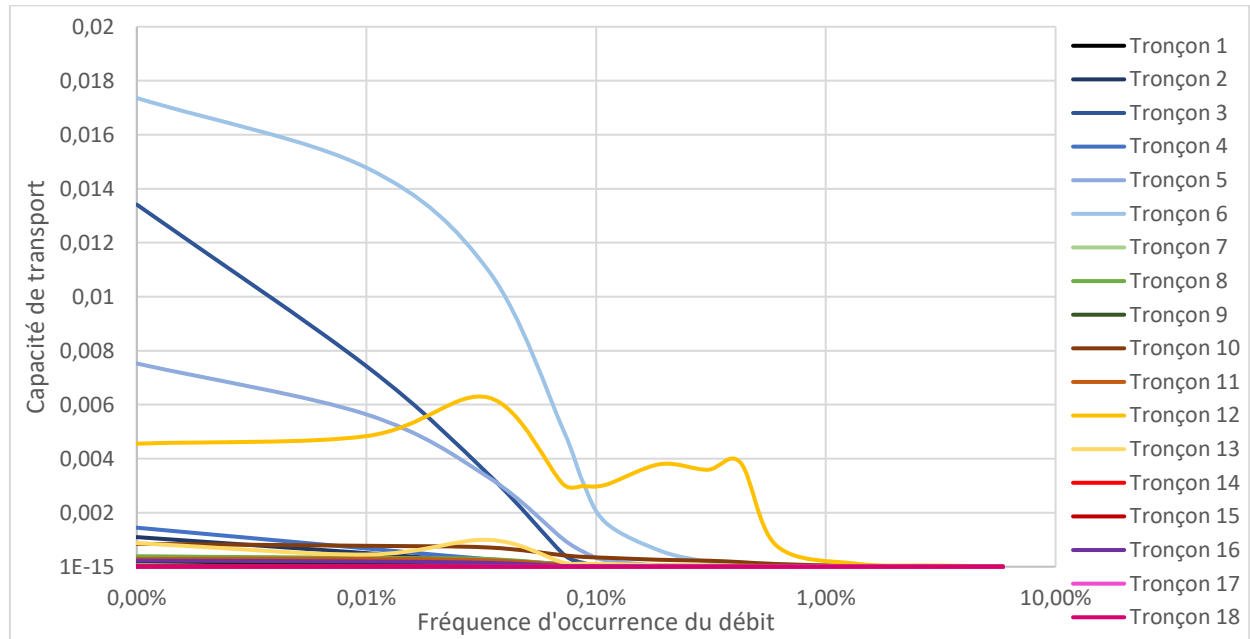


Figure 21: Capacité de transport en fonction du débit (formule de Recking, 2010).

On peut remarquer qu'avec les deux formules, les mêmes tronçons se distinguent au niveau de leur capacité de charriage. La capacité de charriage augmente lorsque les fréquences d'occurrence de débit diminuent, sauf pour les tronçons 12 et 13. Cela peut s'expliquer par le fait que les berges sont raides au niveau de ces tronçons, et que la hauteur d'eau augmente plus vite que la vitesse. Le nombre réduit de profils en travers dans ces secteurs renforce cet effet. Les tronçons avec une forte capacité de charriage atteignent des valeurs plus élevées avec la formule de Recking (2010). De manière générale, la dynamique de charriage est plus importante sur l'Arc que sur l'Isère. Le transport des sédiments grossiers et en conséquence des fins s'effectue à partir du débit d'occurrence 0,10 %.

Les stocks potentiellement remobilisables correspondent, contrairement aux stocks bruts, aux stocks présents sous la ligne d'eau et compris dans une épaisseur d'érosion potentielle. Afin de calculer cette épaisseur, un calcul de contraintes au niveau des bancs de graviers est nécessaire, soit à partir des résultats du modèle hydraulique sur le lit moyen.

Pugh & Wilson (1999) ont établi une relation entre l'épaisseur d'érosion et le D_{90} , et θ . Cette relation permettra de déduire l'épaisseur d'érosion.

$$\delta_b = 10\theta D_{90} \quad (18)$$

Afin de comparer les résultats, une autre formule de calcul d'épaisseur d'érosion a été utilisée, la formule de Haschenburger (1999).

$$\delta_b = -\ln 0,5/\beta \quad \text{avec} \quad \beta = 3,33e^{-1,52\frac{\theta}{\theta_{cr}}} \quad (19)$$

Afin d'obtenir finalement un stock potentiellement remobilisables S_r pour chaque transect du modèle hydraulique, il convient, pour les dépôts en subsurface, de faire :

$$S_r = \delta_b l_M S_{tb} \quad (20)$$

avec l_M la largeur du lit moyen et S_{tb} les stocks de sédiments en subsurface déterminés préalablement (cf. Partie 2.3). Une moyenne sera ensuite calculée par tronçon homogène et intégrée à la longueur de ce tronçon.

Le graphique Figure 22 montre l'évolution des stocks potentiellement remobilisables calculés à partir de la formule de Pugh & Wilson (1999), en fonction de l'occurrence du débit pour les 18 tronçons homogènes définis précédemment.

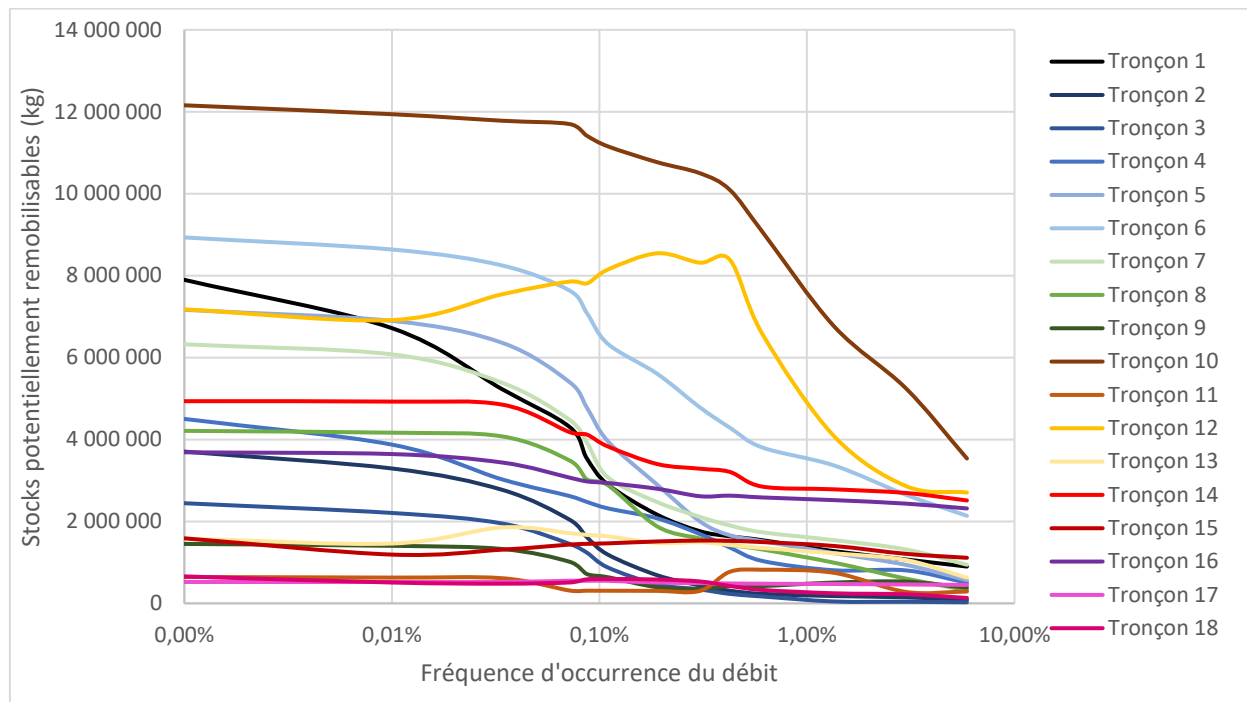


Figure 22: Stocks potentiellement remobilisables en fonction du débit pour les 18 tronçons homogènes (formule de Pugh & Wilson, 1999).

Les stocks potentiellement remobilisables augmentent lorsque la fréquence d'occurrence du débit diminue. On observe le même comportement qu'expliqué précédemment pour les tronçons 12 et 13. Pour rappel, les stocks totaux potentiellement remobilisables comprennent 88 % de sables et 12 % de limons/argiles. Pour le débit de plus forte occurrence, le stock total sur l'ensemble du système est de $2,0 \cdot 10^7$ kg, ce qui correspond à 0,7 % du flux annuel transitant à Grenoble, et pour le débit de plus faible occurrence le stock est de $8,0 \cdot 10^7$ kg, soit 2,7 % du flux annuel à Grenoble.

Afin de comparer les résultats d'épaisseur d'érosion provenant de la formule de Pugh & Wilson (1999) et de Haschenburger (1999) un graphique Figure 23 a été réalisé.

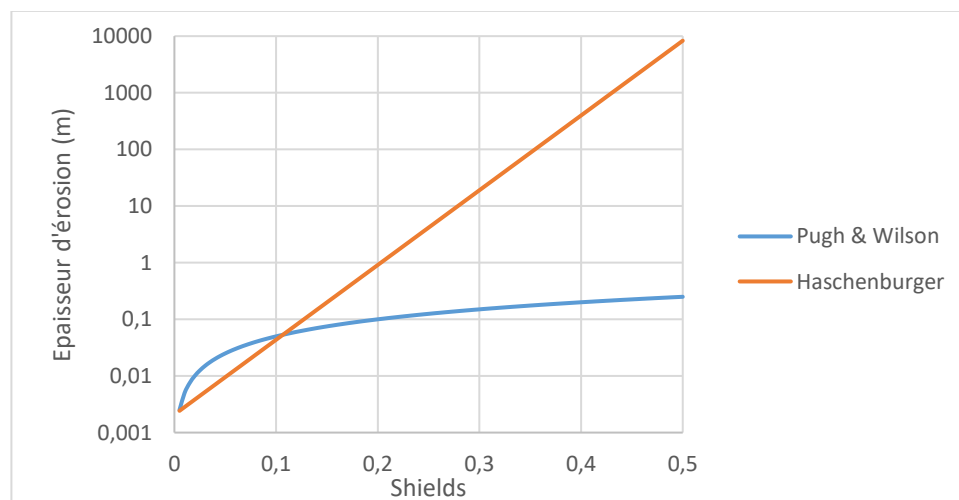


Figure 23: Représentation de l'épaisseur d'érosion en fonction du paramètre de Shields pour les formules de Pugh & Wilson (1999) et Haschenburger (1999).

Avec la formule de Haschenburger (1999), l'épaisseur d'érosion atteint des valeurs bien trop élevées. En effet, cette formule donne des résultats aberrants pour de fortes valeurs de contraintes. Elle est inapplicable dans notre cas car moins adaptée au régime permanent, et prend en compte la respiration du lit. Misset (2021) avait d'ailleurs proposé une valeur seuil de θ à partir de laquelle il n'était plus possible d'utiliser cette formule. La formule proposée par Pugh & Wilson (1999) est plus simple et donne des résultats satisfaisants.

5. Conclusion

La gestion vis-à-vis des sédiments fins est particulièrement importante dans les rivières alpines de l'Arc et de l'Isère, ces derniers pouvant à la fois augmenter le risque d'inondation, et également réduire la capacité de stockage des usines hydroélectriques. Dans le but de mieux comprendre la dynamique des sédiments fins sur l'Arc et l'Isère, ce stage a permis d'effectuer une estimation des stocks de sédiments fins disponibles sur les bancs mais également potentiellement remobilisables selon le débit, à partir d'une nouvelle méthode trouvée et mise en pratique au cours du stage.

La méthodologie proposée pour estimer ces stocks consiste en une combinaison entre modélisation hydraulique unidimensionnelle et traitement SIG (Système d'Information Géographique). En effet, il convient tout d'abord de calculer les lignes d'eau pour différents débits en lançant le modèle hydraulique en régime permanent, après avoir au préalable défini les caractéristiques du modèle dont les apports. Puis, il est possible de créer un plan à partir de la ligne d'eau. Il est enfin nécessaire de croiser ce plan avec le Modèle Numérique de Terrain, ce qui permet de connaître les surfaces exondées. Par la suite les lignes de berges sont tracées afin de créer un secteur où les berges seront exclues du calcul des volumes exondés. Finalement un outil de calcul du volume exondé est utilisé et ces volumes en sortie peuvent être multipliés par les stocks moyens trouvés sur les bancs, ce qui donne une valeur des stocks dans le système.

Les résultats permettent notamment de connaître l'occurrence de débit à laquelle les bancs de graviers sont submergés, soit à une occurrence plus faible (0,049 %) dans le cas de l'Isère que dans le cas de l'Arc (0,079 %). Concernant les stocks, en conclusion, les stocks bruts estimés s'avèrent être du même ordre de grandeur que les flux moyens annuels de sédiments fins mesurés, tandis que les stocks potentiellement remobilisables sont d'un ordre de grandeur plus faible mais non négligeable pour les événements rares.

Comme dans toute méthodologie, il reste des perspectives d'amélioration. Tout d'abord, le modèle hydraulique peut être amélioré, notamment au niveau de l'amont de l'Arc. Il est également dommage de ne pas disposer de données LiDAR sur un tronçon de 5 km, ce qui sous-estime légèrement les stocks bruts et potentiellement remobilisables calculés. De plus, la précision des limites de berges tracées manuellement pourrait certainement être encore améliorée. De nouvelles mesures de granulométrie et de relevés GPS ont été réalisées au cours de l'été 2021, ce qui apporte de nouvelles données. Ainsi, d'après les premiers résultats, la granulométrie choisie pour les différents calculs a pu être légèrement sous-estimée. Finalement, pour aller plus loin, il serait potentiellement intéressant de différencier les résultats de stocks selon différents faciès, ou encore de s'intéresser aux stocks en surface cette fois-ci.

Bibliographie

- Antoine, G., Camenen, B., Jodeau, M., Némery, J., & Esteves, M. (2020). Downstream erosion and deposition dynamics of fine suspended sediments due to dam flushing. *Journal of Hydrology*, 585, 124763.
- 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* (Doctoral dissertation, Thèse, Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Université Grenoble).
- Caillaud R. (2013). Modélisation hydrosédimentaire de la dynamique des matières en suspension dans l'Arc et l'Isère. Stage fin étude ingénieur, Centrale Lyon.
- Camenen, B., Perret, E., Herrero, A., Berni, C., Thollet, F., Buffet, A., ... & Lagouy, M. (2016, July). Estimation of the volume of a fine sediment deposit over a gravel bar during a flushing event. In *River Flow conference* (p. 8).
- Faure, J.-B. (2019). MAGE. Résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D en réseaux complexes. Documentation théorique et notice d'emploi. Version de MAGE : 7.2.x. irstea.
- Haschenburger, J. K. (1999). A probability model of scour and fill depths in gravel-bed channels. *Water Resources Research*, 35(9), 2857-2869.
- Jaballah, M. (2013). *Morphodynamique des bancs alternés d'une rivière de montagne aménagée* (Doctoral dissertation, Doctorat Mécanique des Fluides, Université Lyon I).
- 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* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes (ComUE)).
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. In *IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2*. IAHR.
- Misset, C., Recking, A., Legout, C., Viana-Bandeira, B., & Poirel, A. (2021). Assessment of fine sediment river bed stocks in seven Alpine catchments. *CATENA*, 196, 104916.
- Misset, C. (2019). *The role of riverbed on suspended sediment transport dynamics in Alpine catchments* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes (ComUE)).
- Navratil, O., Legout, C., Gateuille, D., Esteves, M., & Liebault, F. (2010). Assessment of intermediate fine sediment storage in a braided river reach (southern French Prealps). *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(10), 1318-1332.
- Pugh, F. J. and Wilson, K. C. (1999), 'Velocity and concentration distributions in sheet flow above plane beds', *Journal of Hydraulic Engineering* 125(2), 117–125.
- Recking, A. (2010). A comparison between flume and field bed load transport data and consequences for surface-based bed load transport prediction. *Water Resources Research*, 46(3).

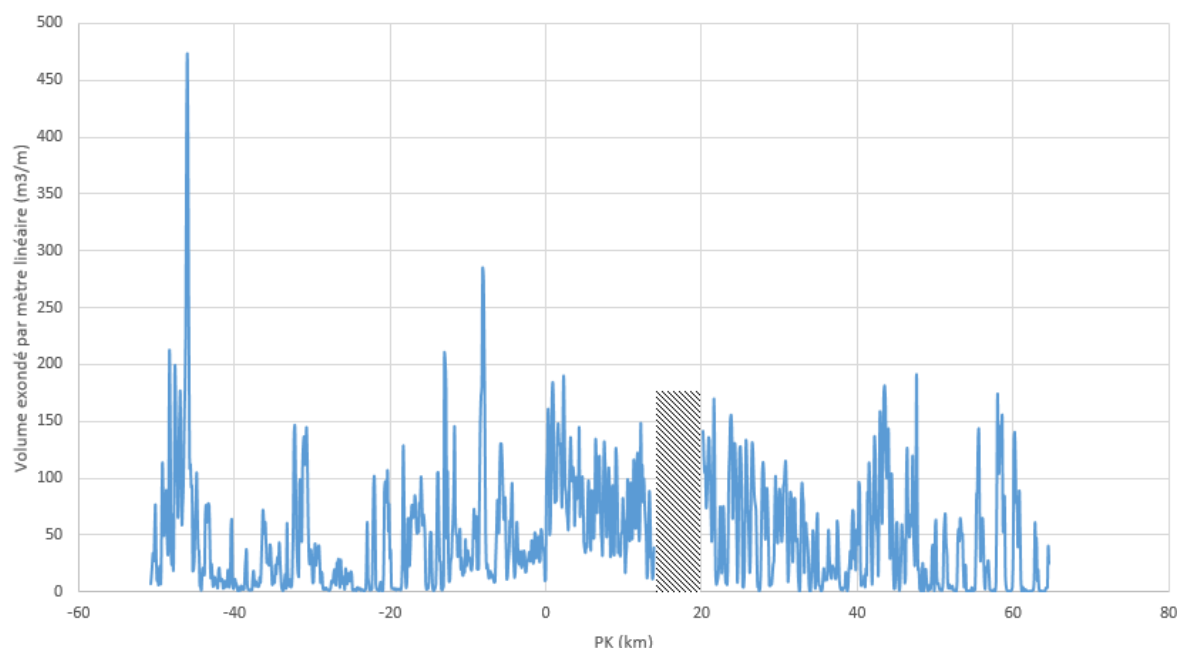
ANNEXES

Annexe 1 : Description des tronçons homogènes

Tronçon	PK début ; fin	Rivière	Limite	Pente (%)	Largeur moy (m)	Description
1	-50,7 ; -43	Arc	Confluence Arvan	1,61	70	Modèle mal calé à ce niveau (ligne d'eau inférieure au MNT)
2	-43 ; -38,5	Arc	Rupture de pente	0,99	50	Légèrement sinueux ; Forte pente ; Bacs non végétalisés
3	-38,5 ; -36,5	Arc	Rupture de pente	1,03	45	Légèrement sinueux (présence d'un méandre) ; Bacs non ou peu végétalisés
4	-36,5 ; -31,5	Arc	Virage	0,59	60	Quasiment rectiligne ; Nombreux bacs non végétalisés de taille importante
5	-31,5 ; -24,1	Arc	Virage	0,56	45	Quasiment rectiligne ; Longs bacs non végétalisés
6	-24,1 ; -17,7	Arc	Virage	0,59	55	Légèrement sinueux ; Relativement peu de bacs mis à part très large banc à Epierre
7	-17,7 ; -10,4	Arc	Apport Randens	0,48	55	Quasiment rectiligne ; Végétation plus présente ; Présence d'un seuil
8	-10,4 ; -4,1	Arc	Virage	0,31	55	Sinueux ; Peu de bacs mis à part banc et anse d'érosion à Randens ; Végétation plus présente ; Présence d'un seuil
9	-4,1 ; 0	Arc	Confluence Arc/Isère	0,27	60	Quasiment rectiligne ; Bacs alternés de façon nette ; Végétation plus présente
10	0 ; 13,8	Isère	MNT manquant	0,18	120	Quasiment rectiligne ; Elargissement du lit mineur ; Nombreux et larges bacs en partie végétalisés
11	20,1 ; 21,8	Isère	Confluence Breda	0,08	120	Quasiment rectiligne ; Rétrécissement lit mineur ; Diminution nombre de bacs ; Bacs végétalisés
12	21,8 ; 28,1	Isère	Rupture de pente	0,11	100	Quasiment rectiligne ; Très peu de bacs ; Bacs fins et non végétalisés
13	28,1 ; 30,2	Isère	Apport Cheylas	0,11	100	Quasiment rectiligne ; Pratiquement pas de bacs
14	30,2 ; 41,5	Isère	Virage	0,11	100	Quasiment rectiligne ; Quelques bacs végétalisés en amont puis bacs non végétalisés
15	41,5 ; 44,6	Isère	Virage	0,1	100	Sinueux ; Bacs entièrement végétalisés
16	44,6 ; 50,4	Isère	Virage	0,09	110	Sinueux ; Bacs entièrement végétalisés
17	50,4 ; 55,4	Isère	Virage	0,07	85	Quasiment rectiligne ; Pratiquement pas de bacs
18	55,4 ; 64,6	Isère	Fin du modèle	0,06	80	Méandriforme ; Bacs végétalisés à l'intrados des méandres et quelques bacs épars non végétalisés

Annexe 2 : Explication de la méthode de tracé des lignes de berges

Ci-dessous le graphique représentant le volume exondé par mètre linéaire (m^3/m) sur la base de la ligne d'eau du Lidar et donc d'un étiage sévère, en fonction du point kilométrique (PK), avant modification du tracé des lignes de berges.



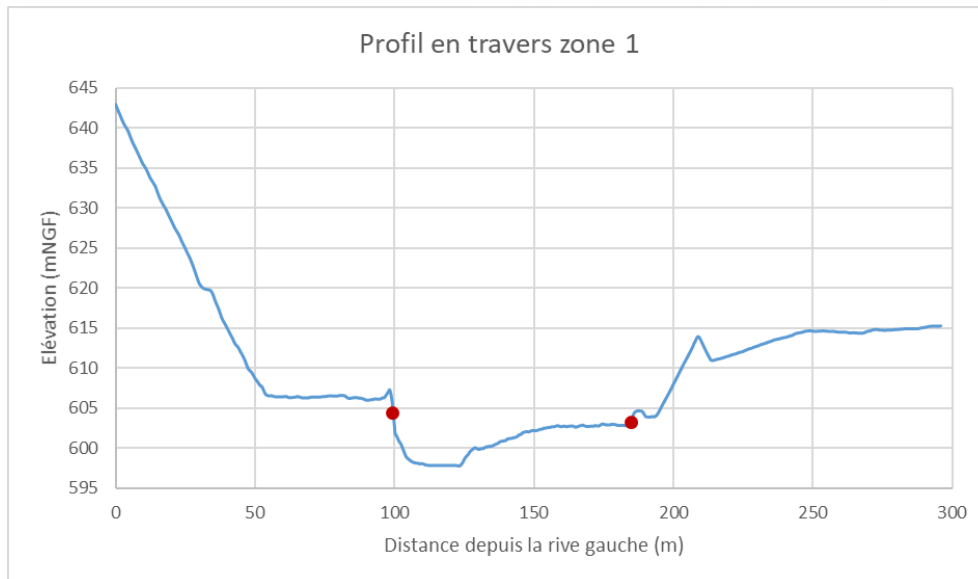
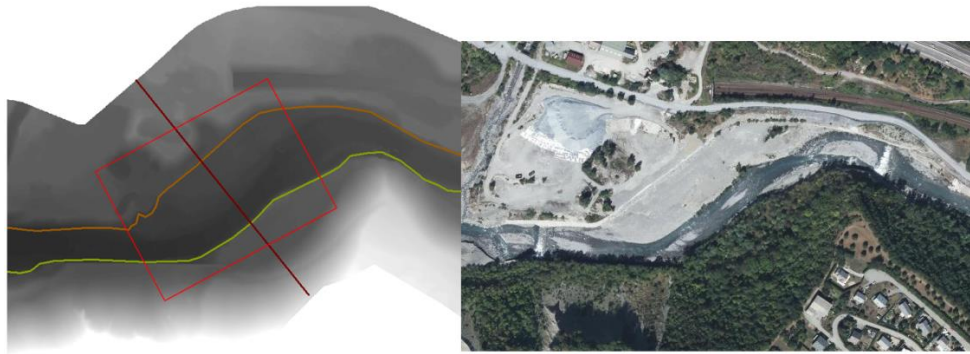
Les PK présentant des valeurs supérieures à $200 \text{ m}^3/\text{m}$ correspondant aux pics sur le graphique ont été analysés : il y avait 4 zones regroupant 11 unités de valeur de volume étonnamment élevée.

Zone	Secteur	Segments	PK (km)	Volume (m^3/m)
1	Début Arc	176	-48,3	210
2	Début Arc	151 à 155	-46	Moy 343, Max 474
3	Pontamafrey-Randens	88 et 89	-13	210 et 203
4	Pontamafrey-Randens	38 à 40	-8	Moy 262, Max 285

Ci-dessous chaque zone peut être visualisée. Avec à gauche : MNT sur la carte ArcMap ; à droite : le secteur correspondant vu sur Géoportail (ne correspondent pas à la même date).

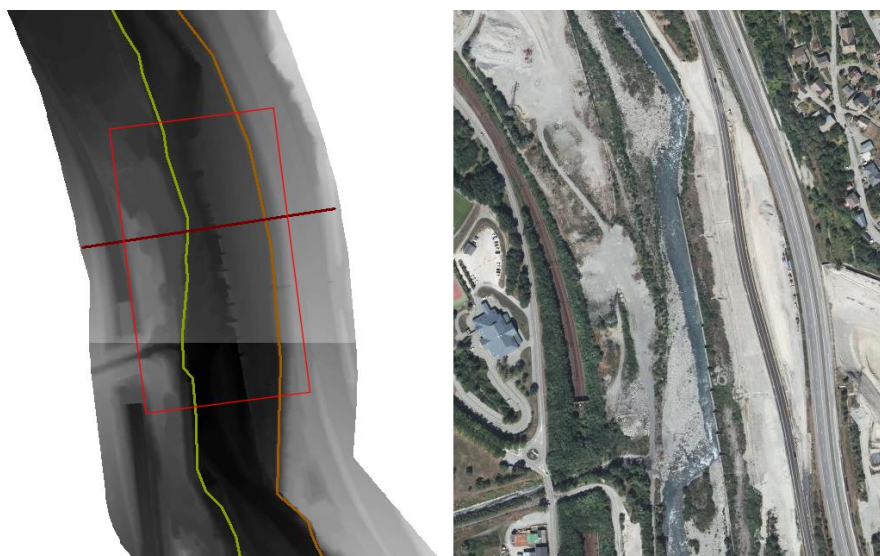
Les unités de 100 m possédant un volume exondé très élevé sont situées dans les cadres rouges. La rive gauche est représentée en jaune/vert et la rive droite en orange. Le profil en travers présent sur le graphe en dessous correspond au trait rouge foncé. Les limites des berges tracées sont représentées par des points rouges sur le graphique.

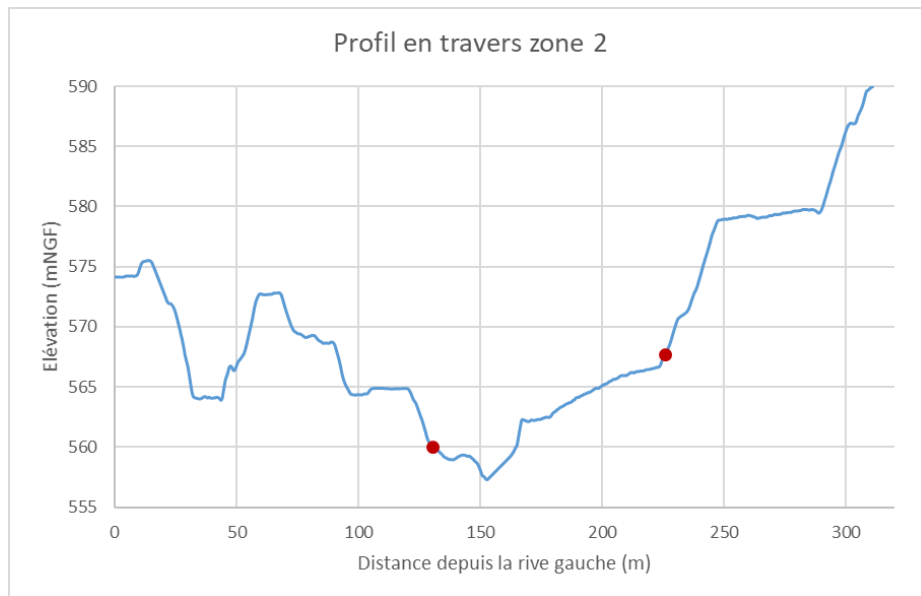
- *Zone 1*



➔ Semble correspondre à un banc mais l'altitude de cette zone atteint jusqu'à 5 m de plus que la ligne d'eau du Lidar. Mais pas incohérent vis-à-vis du profil en travers. **Pas de correction.**

- *Zone 2*

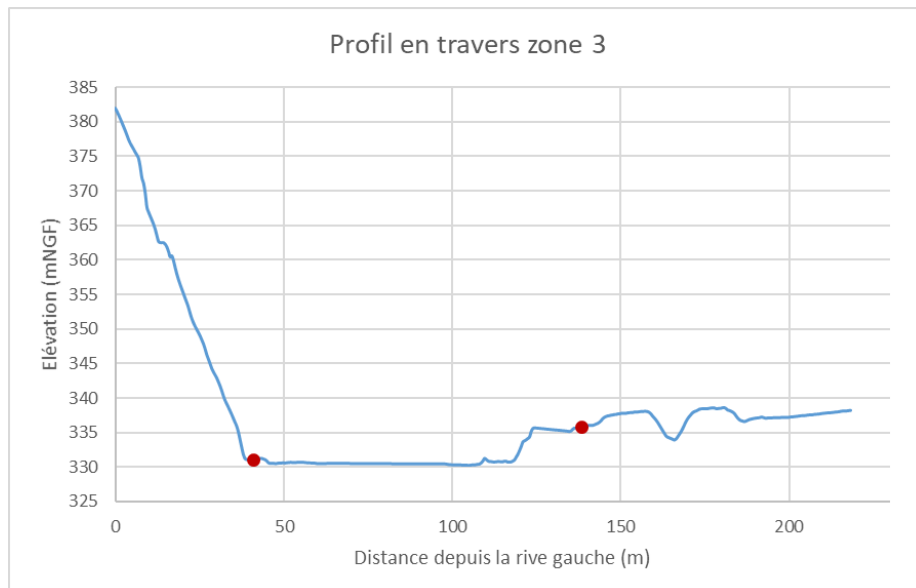




➔ Ici, il y a un problème au niveau de la ligne en rive droite, qui n'est pas placée au bon endroit. Elle doit être décalée vers la gauche d'un peu plus de 50 m. **Correction du tracé.**

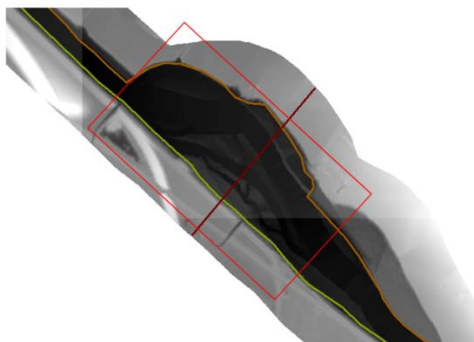
- *Zone 3*





➔ Problème au niveau du barrage en lui-même qui crée un volume exondé trop important, puis en aval (tranchée ci-dessus) prise en compte de la retenue en rive droite et surtout du talus qui les sépare. Décaler vers la gauche la ligne rive droite pour ne pas prendre cette partie en compte. **Correction du tracé.**

- **Zone 4**



➔ Secteur très large, ce qui peut expliquer le grand volume exondé, mais les lignes de berges semblent bien placées. **Pas de correction.**

Une correction des berges (plus précisément la berge en rive droite) a ainsi été effectuée au niveau des zones 2 et 3. Puis, les altitudes du MNT en chaque point de sommet des segments de 100 m (berges) ont été extraites sur ArcGIS, ainsi que l'altitude du MNT à sa partie la plus profonde (ligne d'eau) tous les 100 m également. Cela a permis par le biais d'un fichier Excel de comparer entre elles les altitudes des berges rive gauche et rive droite et de les comparer à la ligne d'eau du LiDAR à un même PK. Les résultats, c'est-à-dire les différences d'altitude, sont visibles dans les tableaux suivants :

Différence d'altitude entre RG et RD							
MNT	Moyenne	NB > 1	NB > 2	NB > 3	NB > 4	NB > 5	NB Tot
SMLP - Randens	1,46	235	123	61	28	15	467
Randens - Confluence	1,28	23	12	2	1	0	44
Confluence - Montmélian	1,46	92	37	8	3	1	143
Montmélian - Grenoble	1,75	257	202	109	36	4	447
Total	1,57	607	374	180	68	20	1101

Différence d'altitude entre les berges (RG-RD) et la ligne d'eau							
MNT	Moyenne	NB > 1	NB > 2	NB > 3	NB > 4	NB > 5	NB Tot
SMLP - Randens	1,22	368	208	115	59	27	934
Randens - Confluence	1,54	58	34	4	1	0	88
Confluence - Montmélian	1,37	165	84	19	5	1	286
Montmélian - Grenoble	1,12	322	251	134	49	4	894
Total	1,21	913	577	272	114	32	2202

Tous les points dépassant une valeur seuil de 3 m de différence ont été vérifiés et possiblement corrigés. Après toutes ces modifications, le calcul du volume des bancs a été réitéré, et afin d'apprécier les différences, les mêmes tableaux ont été établis :

Différence d'altitude entre RG et RD							
MNT	Moyenne	NB > 1	NB > 2	NB > 3	NB > 4	NB > 5	NB Tot
SMLP - Randens	1,17	216	85	28	5	2	467
Randens - Confluence	1,24	23	11	1	1	1	44
Confluence - Montmélian	1,00	67	14	1	0	0	143
Montmélian - Grenoble	1,60	258	183	68	14	0	447
Total	1,32	564	293	98	20	3	1101

Différence d'altitude entre les berges (RG-RD) et la ligne d'eau							
MNT	Moyenne	NB > 1	NB > 2	NB > 3	NB > 4	NB > 5	NB Tot
SMLP - Randens	1,03	355	181	65	11	3	934
Randens - Confluence	1,47	58	35	0	0	0	88
Confluence - Montmélian	1,03	132	45	3	0	0	286
Montmélian - Grenoble	1,14	366	248	94	22	1	894
Total	1,09	911	509	162	33	4	2202

Les différences d'altitude ont ainsi significativement diminué pour chacun des MNTs.



Téa Piednoir

2020-2021

Evaluation du potentiel de reprise des stocks de sédiments fins dans une rivière alpine

Résumé : L'objectif de ce stage était d'estimer les stocks potentiellement remobilisables de sédiments fins au sein de l'Arc et de l'Isère, les dépôts de sédiments fins sur les bancs de graviers pouvant s'avérer problématiques. Grâce à un modèle hydraulique 1D, la ligne d'eau pour plusieurs débits a été récupérée et transférée sous un logiciel de cartographie, dans le but de créer un plan qui sera recoupé par rapport au MNT, afin de connaître le volume exondé des bancs pour chaque débit. Les stocks bruts et les stocks disponibles ont ensuite pu être calculés.

Mots Clés : Sédiments fins – Hydraulique – Stocks – Rivières alpines – Arc – Isère – Cartographie – Débit – Transport solide

INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes :
5 rue de la Doua, CS 20244 69625 VILLEURBANNE France

Tuteurs entreprise :

Junjian Deng / Lionel Pénard / Benoît Camenen

Doctorant/Chercheur/HDR Directeur Equipe Chercheur

Tuteur académique :

Stéphane Rodrigues