



École Polytechnique Fédérale de Lausanne



Laboratoire de constructions hydrauliques

Projet de master

Potentiel de colmatage et interactions entre la nappe et le Rhône dans l'élargissement du coude du Rhône à Martigny



Amandine Vallotton

Janvier 2021

Encadrants : Romain Dubuis (PL-LCH, EPFL)
Khalid Essyad (BG Ingénieurs)
Superviseur : Giovanni De Cesare (PL-LCH, EPFL)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Giovanni De Cesare, Khalid Essyad et Romain Dubuis pour m'avoir suivie et conseillée durant mon projet de master. Je veux aussi remercier Ueli Schälchli pour avoir pris le temps de répondre à mes questions sur le colmatage, Romain Sonnay du CREALP pour m'avoir transmis des données et de m'avoir donné des renseignements sur la région de Martigny, Olivier Masser pour avoir répondu à mes questions, Najila Schaller pour sa patience et son aide, Diane Liberatore, Anna Bertidea et ma sœur pour avoir relu l'entier ou une partie de rapport.

Je tiens particulièrement à remercier ma mère qui s'est battue contre la maladie pour rester à mes côtés. Malgré son courage et sa détermination à me soutenir jusqu'à la fin de mes études, la maladie l'a emporté avant de pouvoir me voir finir mon master. Sans son appui, je ne serais pas là où j'en suis aujourd'hui.

Table des matières

1. Introduction.....	1
1.1. Bases théoriques	2
1.2. État des connaissances.....	3
1.3. Objectifs.....	5
2. Méthodologie	7
2.1 Site de Martigny	7
2.2 Données.....	9
2.3 Paramètres et processus déterminants	11
2.4 Méthode d'analyse de la conductance du Rhône	11
2.5 Modélisation.....	12
2.5.1 Infiltration.....	12
2.5.2 Décolmatage.....	14
3. Résultats	16
3.1 Colmatage actuel.....	16
3.2 Modélisation.....	16
3.2.1 Infiltration.....	16
3.2.3 Application à la zone de Martigny.....	22
4. Discussion	29
5. Conclusion	31
6. Références.....	33
7. Références des figures	37
8. Annexes	38

Table des Figures

Figure 1: Schéma des processus du colmatage physique	2
Figure 2 : Forces agissant sur une particule en suspension	3
Figure 3 : Carte des aménagements du coude de Martigny dans le cadre du projet de la troisième correction du Rhône.....	7
Figure 4: Carte des profils du Rhône avec leur kilométrage sur lesquels la modélisation est appliquée	8
Figure 5 : A gauche la courbe des débits et à droite celle des niveaux d'eau du Rhône à la station de la Brandson	9
Figure 6: A gauche, la courbe des températures et à droite, celle des concentrations de la matière en suspension à la station de la Porte du Secx.....	10
Figure 7 : A gauche la courbe des niveaux piézométriques 07103 et à droite celle des différences entre la hauteur d'eau de la nappe et piézométrique.....	10
Figure 8 : Moyenne et écart-types des itérations des paramètres pour tester la sensibilité des paramètre L, d_m , d_w , d_{60} , d_{10}	17
Figure 9: Comparaison de la conductivité calculée grâce à la modélisation (droite) avec celle du km 25.8 du Rhin (gauche).....	19
Figure 10 : Courbe de débit et sa simplification qui a permis de déterminer le début, le point maximum et le débit de pointe de la crue	19
Figure 11 : Effet de la variation de la valeur de Q_{max} entre 430 et 980 m^3/s sur la conductivité hydraulique	20
Figure 12 : Conductivité hydraulique avec et sans colmatage.....	21
Figure 13 : Effet de la variation de la valeur de β entre 12 et 20 sur la conductivité hydraulique.....	21
Figure 14 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.844 au km 38.593 à la 1ère et à la 3ème années	23
Figure 15 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.844 au km 38.593 à la 5ème et 8ème années	24
Figure 16 : Carte de la conductivité hydraulique du km 38.839 au km 39.339 à la 1ère et 3ème années	25
Figure 17 : Carte de la conductivité hydraulique du km 38.839 au km 39.339 à la 5ère et 8ème années	26
Figure 18 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.397 au km 37.647 à la 1ère et 3ème années	27
Figure 19 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.397 au km 37.647 à la 5ère et 8ème années	28
Figure 20 : Volume et masse infiltrés par surface au km 39.339	29
Figure 21 : Volume et masse infiltrés par surface au km 38.119	29

Table des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des données et de leur source d'aquisition	9
Tableau 2 : Gamme de valeurs utilisés pour fa1ire l'analyse de sensibiliter des paramètres	18
Tableau 3 : Surface et débit d'infiltration de la section de section de Martigny à la fin de la huitième année.....	22

Résumé

L'objectif de cette étude est de prédire le colmatage du Rhône après les travaux de la troisième correction du Rhône. En connaissant son évolution, il sera possible de comprendre comment les interactions entre le Rhône et la nappe seront impactées.

La troisième correction du Rhône a pour but de protéger la région de la plaine du Rhône contre les crues et de revitaliser le cours d'eau. Le coude de Martigny est une des zones touchées par ce projet. Les aménagements principaux sont des élargissements et un abaissement du lit ayant pour effet la diminution de la hauteur d'eau.

L'obstruction des pores du lit est un des processus majeur du colmatage dans le Rhône. Une modélisation a été développée se concentrant sur l'infiltration des sédiments dans le lit et sur le décolmatage.

Les résultats de cette recherche ont montré que la conductivité hydraulique devrait augmenter après les travaux. Mais qu'au contraire, le volume d'eau ainsi que la masse infiltrée par surface devraient diminuer. L'abaissement de la ligne d'eau grâce aux futurs aménagements fait décroître la quantité d'eau s'infiltrant dans le lit. Il y a donc moins de sédiments qui sont entraînés dans le lit et qui bouchent les pores. Par conséquent, le colmatage est plus faible. La quantité totale d'eau d'infiltration sur la section d'étude considérée augmente, mais de manière restreinte en comparaison avec l'élévation de la surface d'échange. Il y a donc une augmentation globale du volume total infiltrés mais une réduction locale. Ces résultats donnent une idée de l'évolution du colmatage et des interactions entre le cours d'eau et la nappe après la correction. Ce modèle demande encore d'être développé dans de futures recherches

1. Introduction

Le Rhône est l'un des cours d'eau les plus importants de Suisse. Il prend sa source dans le glacier du Rhône, au sein du massif alpin du Saint-Gothard en Suisse. Il traverse la vallée du Rhône avant de se jeter dans le lac Léman duquel il ressort à Genève. Il continue ensuite sa route en France pour finir sa course dans la mer Méditerranée.

La vallée du Rhône a connu d'importantes inondations submergeant la plaine et provoquant ainsi des pertes de récoltes, des coupures de voies de communication, ainsi que de sérieux dégâts matériels. Ne supportant plus les ravages de la rivière, le gouvernement valaisan dépose une demande de subventionnement en 1860 à la Confédération, afin d'effectuer la correction du Rhône et de ses affluents (Chappex, 1877). Elle est acceptée à hauteur de 2 640 000 CHF, soit un tiers du coût estimé. La mise en place des mesures pour la première correction du Rhône débute en 1863 (Chappex, 1877). Le principal aménagement sur le Rhône est alors l'endiguement. Des digues longitudinales sont construites pour contraindre le cours d'eau et assurer la protection des terrains avoisinants, ainsi que des épis redirigeant l'eau au centre du cours d'eau et permettant de restreindre l'érosion des berges. Le tracé du fleuve est redessiné afin qu'il soit plus droit et qu'il occupe moins d'espace. Les plaines, qui étaient marécageuses à cette époque et restreignaient le développement des villes et l'aménagement des terres arables, sont aussi assainies permettant de développement des voies de chemin de fer (Pasche, 2004). Les travaux de la première correction durent jusqu'en 1894. Au début le bilan semblait positif ; la plaine est en effet sécurisée et de nouvelles terres agricoles peuvent y être exploitées. Cependant, de nouvelles crues importantes se produisent en 1896 et 1897 (Pasche, 2004). Parmi les problèmes répertoriés, on note l'exhaussement du lit dû au manque de capacité de transport du Rhône à charrier tous ces sédiments, des brèches, voire l'effondrement de certaines digues et l'augmentation des débits de crues (Pasche, 2004).

Ces différents problèmes motivent alors la deuxième correction du Rhône qui débutera en 1936 (Pasche, 2004). Les berges sont rehaussées et le fond du lit dragué. Cela n'empêche cependant pas des crues importantes de se produire à la fin du 20^e siècle. Le rapport des objectifs de la troisième correction du Rhône est donc approuvé en septembre 2000 par le Grand Conseil valaisan, mais avec cette fois une envie de redonner de l'espace au Rhône. Un plan d'aménagement (PA-R3) est élaboré, découpant le Rhône en différents secteurs selon leur priorité (Sonnette, 2019). Les principaux aspects de la troisième correction du Rhône sont sécuritaires, environnementaux et socio-économiques. Les objectifs prioritaires de sécurité consistent en la diminution de la ligne d'eau, une gestion des débits robuste et un dimensionnement hydraulique adéquat (Valais, 2008). Les premiers travaux débutent en 2009 dans le secteur prioritaire de Viège (Sonnette, 2019).

L'un de ces secteurs est la commune de Martigny, qui se situe en Valais dans la plaine du Rhône. Le fleuve forme un coude à cet emplacement. Une partie de la commune est en zone de danger élevée, ce qui implique une forte intensité lors d'événements de crue majeure pouvant générer des dégâts matériels élevés et des pertes humaines. Le plan d'aménagement PA-R3 prévoit alors de corriger le Rhône à la hauteur du coude afin de protéger les constructions contre les crues. Pour pouvoir optimiser les solutions envisagées, un modèle physique et un modèle numérique ont été élaborés par la Plateforme de constructions hydrauliques (PL-LCH) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Ces modèles permettent d'étudier le charriage, la morphologie et l'hydraulique des différents scénarios de la correction (De Cesare, 2019).

Toutefois, ces modèles n'étudient pas les interactions entre le Rhône et le cours d'eau ; ces derniers peuvent s'influencer mutuellement. Le Rhône peut nourrir la nappe (infiltration) et vice-versa

(exfiltration) selon le niveau de cette dernière (Glenz, 2013), ce qui peut avoir de nombreuses incidences sur l'environnement adjacent au cours d'eau. Si la nappe monte trop haut, des champs risquent d'être inondés, ou des sites pollués d'être submergés, provoquant en retour la contamination de la nappe. De plus, si les nappes servant de source de captage d'eau potable ne sont plus assez alimentées, un manque de ressource en eau dans une région est alors à prévoir. Dès lors, la compréhension de ces échanges entre le Rhône et le cours d'eau est importante pour prévoir la manière dont la nappe répond aux changements morphologiques et hydrauliques du cours d'eau.

1.1. Bases théoriques

Le cours d'eau et la nappe interagissent entre eux à travers les pores de la zone hyporhéique. Cette dernière est définie comme étant les sédiments connectés hydrologiquement au canal du cours d'eau (Findlay, 1995). Elle sert de connecteur entre le cours d'eau et les écosystèmes aquatiques souterrains (Brunke, 1999), de frayère pour les poissons comme les saumons et les truites (Lisle, 1989) ou encore de lieu de refuge pour des espèces invertébrées (Borchardt & Statzner, 1990).

Le colmatage peut altérer les interactions entre l'eau de surface et l'eau souterraine (Fetzer, Holzner, Plötze, & Furrer, 2017). Il peut provoquer entre autres une diminution de l'apport en oxygène et en nutriment dans la zone hyporhéique, affectant la biodiversité et la biogéochimie du cours d'eau (Fetzer et al., 2017). Dans cette étude, le colmatage est défini comme étant l'obstruction des pores du lit menant à la diminution de la porosité et de la conductivité hydraulique. Cette dernière représente la capacité d'un corps poreux à se laisser traverser par un fluide, et dans notre cas par l'eau. Lors du colmatage, les pores du lit s'obstruent, ce qui restreint les échanges. Selon Przybyłek, Dragon, & Kaczmarek (2017), il existe trois principaux processus de colmatage : le colmatage physique, qui est provoqué par l'accumulation de sédiments dans les pores du lit, le colmatage chimique, qui est dû au changement des conditions hydrogéochimique provoquant la précipitation de composants solubles en éléments insolubles, et le colmatage biologique, causé par la prolifération et la décomposition des bactéries et des algues dans le lit. Dans cette étude, c'est au premier processus de colmatage physique que nous nous intéressons.

Ce dernier peut être découpé en plusieurs processus. On différencie ainsi : le transport des sédiments ; leur déposition ; celui de consolidation ; et enfin le processus de remobilisation. Ces processus dépendent du dynamisme du cours d'eau (Mehta, Hayter, Parker, Krone, & Teeter, 1989). Ils mènent à deux types de colmatages physiques : le colmatage externe qui est la déposition des particules au-dessus de la surface du lit et le colmatage interne, induit par l'infiltration des particules dans le lit venant obstruer ses pores (Du, Fang, Wang, Hou, & Ye, 2014 ; Blaschke, Steiner, Schmalfluss, Gutknecht, & Sengschmitt, 2003).

Une particule en suspension dans un cours d'eau est soumise à plusieurs forces (figure 1). Les principales sont la poussée d'Archimède (F_a), une force proportionnelle au volume d'eau déplacé par la particule, la faisant monter à la surface ; la force gravitationnelle (F_g), qui va dépendre de sa masse, l'attirant vers le lit ; la force de portance (F_p) et la force de traînée (F_t) qui sont, les deux sont influencées par les vitesses d'écoulement (Schleiss,

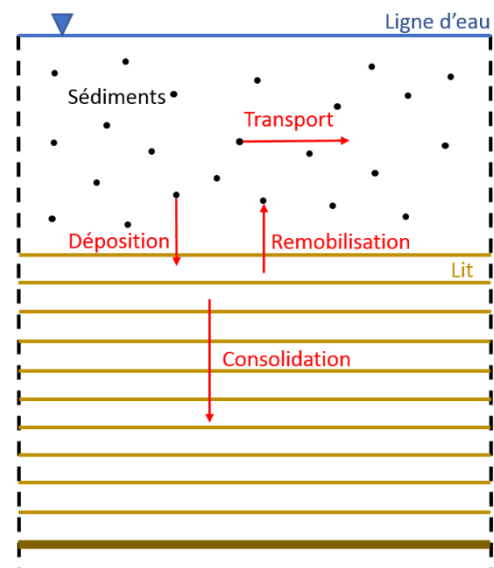


Figure 1: Schéma des processus du colmatage physique

2015). Selon la norme des forces, la particule va descendre dans la colonne d'eau jusqu'au lit ou rester en suspension.

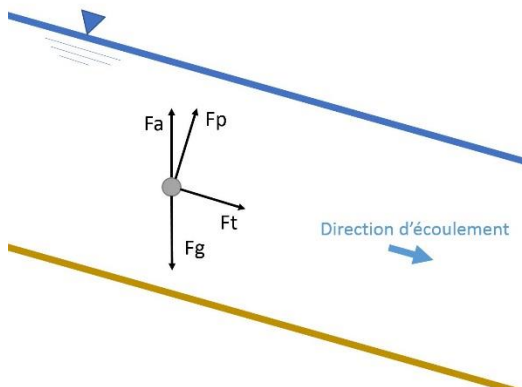


Figure 2 : Forces agissant sur une particule en suspension

Les sédiments qui se sont déposés vont se tasser sous l'effet de leur poids et former une couche consolidée. C'est un phénomène complexe qui dépend de nombreux paramètres tels que le diamètre des particules, la température du milieu aqueux, l'épaisseur du dépôt, la concentration de départ, etc. (Migniot, 1989). Il est à noter que le tassement change d'un environnement à un autre et varie aussi temporellement.

Lorsqu'une particule s'est déposée sur le lit, elle restera immobile à moins que les contraintes de cisaillement augmentent assez pour la faire se mouvoir. Cela se produit avec l'accroissement des vitesses d'écoulement. Les sédiments du lit resuspendus sont charriés, ce qui accroît la perméabilité du lit (Wharton, Mohajeri, & Righetti, 2017). Le lit peut être composé d'une couche de pavage constituée de matériaux plus grossiers que le reste du lit. Cette couche joue alors le rôle de protection des couches inférieures, retardant leur érosion. Il faudra que les débits soient assez importants pour que la couche de pavage soit cassée et que la sous-couche puisse être érodée (Schleiss, 2015).

Le diagramme de Shield (Shields, 1936) peut être employé afin de déterminer à quel moment les particules du lit se mettent en mouvement. Ce diagramme se base sur la contrainte de cisaillement adimensionnelle Θ et le diamètre adimensionnel pour définir quand le charriage débute. La cohésion des particules qui représentent l'attraction entre elles et qui sont chimiquement semblables (Grabowski, Droppo, & Wharton, 2011) influence le démarrage du charriage. Selon la cohésion des particules, la contrainte de cisaillement pour commencer à faire bouger les particules du lit est plus ou moins importante. Cela dépend des matériaux composant le lit. Ainsi, le limon a une nature non cohésive et sera donc plus facilement remobilisé, contrairement à l'argile (Gutiérrez, van Halem, Uijttewaal, del Risco, & Rietveld, 2018).

1.2. État des connaissances

Le colmatage a été étudié par de nombreuses personnes, que ce soit en laboratoire (Han, Kwon, Lee, & Jung, 2020 ; Ueli Schälchli, 1992 ; Wooster et al., 2008) ou sur le terrain (Blaschke et al., 2003 ; Brunke, 1999 ; Pholkern et al., 2015). Il s'agit d'un processus complexe qui dépend de nombreux phénomènes physiques, biologiques et chimiques.

Blaschke et al. (2003) suggèrent que le processus de colmatage est un ensemble de cycles s'étendant sur plusieurs années. Un cycle débiterait par un événement de crue et sa durée s'étalerait sur quelques semaines avant que le lit n'atteigne une certaine stabilité.

Un des effets du colmatage est la diminution de la conductivité hydraulique, k . De nombreuses équations ont été proposées comme celle de Kozeny-Carman, Breyer, Terzaghi ou encore Hazen (Rosas et al., 2014). Elles n'évaluent pas K en fonction du temps ; elles fournissent une valeur pour un état donné. Aucune ne semble donner une approximation globale. Elles ont une gamme d'utilisation restreinte selon la taille des grains du lit et des sédiments. Il faut donc faire attention au choix de l'équation. Ueli Schälchli (1995) propose une équation pour évaluer l'évolution de la conductivité depuis un état donné en fonction du temps. Selon cette formule, le changement de conductivité est influencé par la masse de particules infiltrées qui va venir boucher les pores du lit et donc diminuer l'infiltration. Schälchli ne prend cependant pas en compte dans son équation une augmentation de la conductivité hydraulique induite par le décolmatage.

La profondeur de colmatage représente l'épaisseur de la couche supérieure du lit dont les pores sont obstrués par des sédiments fins. Cette épaisseur semble être relativement peu profonde. Blaschke et al. (2003) ont trouvé une profondeur de colmatage allant jusqu'à 50 cm dans le Danube, Brunke (1999) jusqu'à 45 cm dans la rivière Toss et Fetzer et al. (2017) jusqu'à 13 cm dans la rivière Aua da Tiral. Il y a peu de recherches qui tentent de quantifier cette profondeur à travers une formule mathématique. Ulrich Schälchli (1993) définit la profondeur de colmatage pour un lit de gravier par $D_c = 3D_m + 0.01$ (1) avec D_m la taille moyenne des grains. Cette formule ne permet pas d'étudier l'évolution du lit dans le temps ni la concentration de particules infiltrées dans la profondeur. Wooster et al. (2008) proposent une formule pour déterminer le profil de colmatage. Elle donne la fraction de sables fins en fonction de la profondeur. À nouveau, cela exprime un état final et non une évolution. De plus, de nombreuses itérations doivent être effectuées pour pouvoir déterminer le profil ce qui peut demander du temps à calculer. Le profil de colmatage est un sujet qui demanderait d'être davantage développé dans de futures études.

Pour que les particules puissent s'infiltrer, il faut encore qu'elles puissent entrer dans le lit. Plusieurs études ont mis en avant l'importance du ratio du diamètre moyen du lit sur le diamètre des particules fines pour déterminer la présence du colmatage (Brunke, 1999 ; Fetzer et al., 2017 ; Herzig, Leclerc, & Le Goff, 1970 ; Wooster et al., 2008). En dessous d'un certain ratio, les sédiments ne peuvent pas s'infiltrer dans le lit. En dessus d'une certaine valeur, les particules peuvent entrer dans le lit, mais elles ne restent pas piégées. Selon les études, les résultats obtenus affichent des seuils différents (Gibson, Abraham, Heath, & Schoellhamer, 2009). Il faut donc prendre garde au fait que les valeurs soient applicables. Huston & Fox (2015) proposent une nouvelle manière de calculer ce ratio pour un lit de gravier. Ils rajoutent ainsi l'écart-type géométrique des sédiments du substrat pour le calculer.

D'autres facteurs influencent le colmatage tels que la vitesse (Han et al., 2020), la turbidité (Pholkern et al., 2015), la composition des sédiments du lit (Gutiérrez et al., 2018) ou encore la cohésion des particules (Gutiérrez et al., 2018).

Ueli Schälchli (énumère, dans son étude de 1992, les étapes du décolmatage selon le cisaillement adimensionnel. Il observe que pour $\Theta < 0.056$ le colmatage se forme. Lorsque Θ se situe entre 0.060 et 0.072, les particules du lit commencent à être resuspendues et charriées, augmentant la conductivité hydraulique de la couche supérieure sans que la couche de pavage ne soit endommagée. Entre 0.072 et 0.078, la couche de pavage se détruit. Pour Θ plus grand que 0.0775, les couches inférieures sont érodées et la conductivité hydraulique du lit augmente jusqu'à atteindre son maximum.

L'érosion du lit le creuse alors et, potentiellement, enlève les couches colmatées. Plusieurs formules empiriques sont proposées dans la littérature pour déterminer le taux d'érosion, mais aucune ne semble être acceptée à l'unanimité (Sanford & Maa, 2001). Elles demandent de faire des

expérimentations pour déterminer les constantes propres aux milieux érodés, ce qui peut s'avérer difficile dans certains cas s'il y a un fort courant et des niveaux d'eau élevés. Park & Hunt (2018) proposent une formule plus simple. Ils prennent comme hypothèse que lors d'une crue maximum toute la masse infiltrée est libérée et que la quantité de sédiments resuspendue est proportionnelle au débit de pointe de la crue. Ce qui permet de définir la masse de sédiments relâchés par une crue d'intensité donnée.

Le colmatage du lit peut être étudié de façons variées. Des observations visuelles peuvent être effectuées sur le terrain en observant par exemple le substrat sous la couche de pavage (Hunzinger et al., 2018). Des échantillons peuvent également être récoltés. Une manière de fixer un échantillon pour pouvoir garder la composition des différentes couches de sol est la méthode du *freezing core* (Stocker & Williams, 1972). Cette technique utilise un long tube avec des trous qu'il faut enfoncer dans le sol. De l'azote liquide est versé à l'intérieur et ressort dans le sol. Cela gèle le substrat environnant, ce qui crée un échantillon compact conservant les propriétés physiques du sol. Ces méthodes ne permettent toutefois pas d'avoir une évolution du colmatage dans le temps, sauf si une campagne de mesure est mise en place, ce qui demande du temps et de l'énergie.

Le colmatage peut aussi être évalué de façon indirecte en étudiant les variations d'hauteur d'eau (Gianni, Richon, Perrochet, Vogel, & Brunner, 2016; Masset, 2020), de température (Constantz, Su, & Hatch, 2006) ou de la conductivité entre le cours d'eau et la nappe (Diem, Poppei, & Ammann, 2015). Gianni (2017) et Masset (2020) ont étudié le temps de retard de la réponse de la nappe au changement de niveau du Rhône. Plus le retard est élevé, plus petite est la conductivité hydraulique et donc plus important est le colmatage. L'un des points négatifs de cette méthode est que, bien qu'on ait une variation temporelle, on n'en a pas une spatiale. Les zones colmatées ne peuvent pas être identifiées précisément dans le cours d'eau.

1.3. Objectifs

Les travaux de la troisième correction ont pour but de protéger la commune de Martigny contre de futures crues dévastatrices. Ces aménagements auront des impacts sur le Rhône. Les modèles physiques et numériques conçus par le PL-LCH permettent de mieux comprendre comment l'hydraulique et la morphologie du Rhône seront influencées. En revanche, le changement des interactions entre le Rhône et la nappe reste inconnu. L'un des principaux facteurs ayant un impact sur ces échanges est le colmatage du lit.

Le but de cette étude est de modéliser le colmatage pour prédire les interactions entre le Rhône et la nappe après la troisième correction du Rhône au niveau du coude de Martigny.

Trois questions de recherche ont été développées afin de comprendre comment le colmatage se développe dans le Rhône et de le prévoir après la troisième correction :

Q1 : Comment peut-on caractériser le colmatage du Rhône avec les données que l'on possède ?

Q2 : Dans le contexte du Rhône, quels processus et quels paramètres sont déterminants dans le colmatage du lit ?

Q3 : Comment peut-on modéliser ces processus ?

Des premières hypothèses peuvent être envisagées :

H1 : Des études sur le colmatage ont été effectuées sur le Rhône donnant des renseignements sur l'état actuel. De plus, des données telles que le débit, les niveaux d'eau du Rhône et

piézométriques ou encore la température qui ont été récoltées pendant plusieurs années peuvent servir à comprendre le colmatage du Rhône sur une plus longue période.

H2 : Les processus clés devraient être l'infiltration des particules dans le lit ainsi que le décolmatage. La granulométrie du lit et les vitesses devraient être des paramètres importants.

H3 : Ces processus peuvent être modélisés sur la base de formules provenant d'expériences. Il faut implémenter chaque processus sur une surface restreinte selon l'hydraulique de la rivière qui va changer au cours du temps. Une fois le modèle validé, il sera ensuite possible de l'étendre sur une plus large surface.

Pour répondre à ces questions, cette recherche a été divisée en quatre étapes. Tout d'abord, le colmatage actuel est examiné en se basant sur la littérature et sur les données qui sont à disposition. Cela donnera un aperçu du colmatage ainsi que les études qui ont été effectuées. Une seconde phase détermine les processus et les paramètres déterminants du colmatage du Rhône en interviewant des personnes et en se basant sur des articles. En troisième, les formules décrivant les processus clés sont étudiées dans la littérature. Celles qui semblent les plus appropriées sont appliquées sur un tronçon du Rhône et créer une modélisation sur le programme MATLAB (2019). La dernière étape consiste à appliquer la modélisation du colmatage sur le tronçon de Martigny.

2. Méthodologie

2.1 Site de Martigny

Le site de l'étude est le coude du Rhône dans la commune de Martigny en Valais. Le fleuve doit effectuer un virage pour contourner la montagne se trouvant du côté droite de sa berge. Deux canaux de drainage se trouvent dans cette zone ; le canal du Syndicat et le canal de Fully-Saillon-Leytron. Ils ont été construits dans le but de drainer la nappe pour rendre les terres marécageuses cultivables (Romain Sonnay, communication personnelle, 3 novembre 2020). Actuellement, le Rhône traversant la ville est endigué et sa largeur varie peu. La zone est en niveau de danger élevé. En cas d'inondations par les eaux du Rhône, de gros dégâts matériels voir même des pertes humaines peuvent se produire.

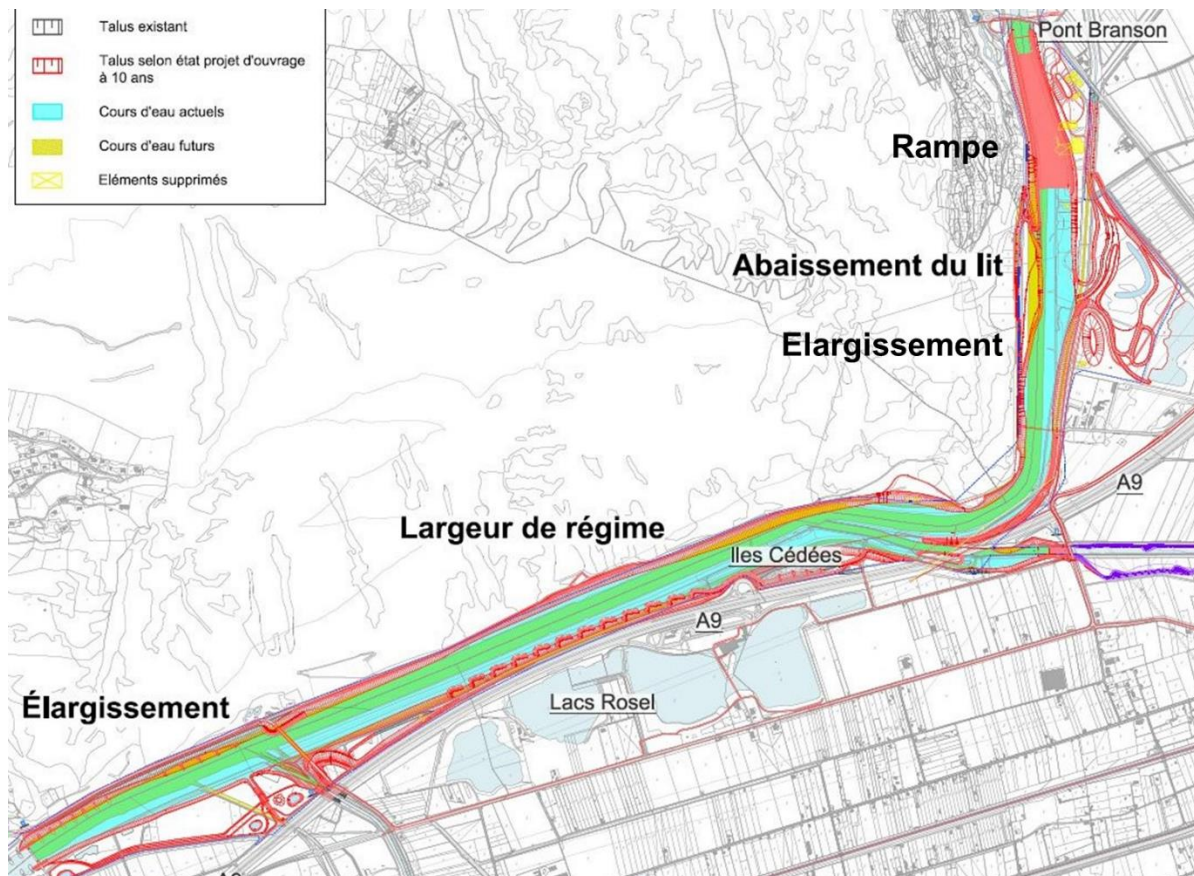


Figure 3 : Carte des aménagements du coude de Martigny dans le cadre du projet de la troisième correction du Rhône

Afin de protéger les constructions contre les crues, les travaux suivants sont prévus (Groupement Coude du Rhône & Groupement STUCKY-BG, 2019) :

- Deux élargissements : un à Verney et un autre à Trient
- Élargissement du coude
- Abaissement du lit à l'amont par une rampe
- Aménagement des confluences : Dranse, le Trient et les canaux
- Déplacement de la RC339 sur la berge gauche

En plus de ces travaux visibles sur la figure 3, les risques résiduels seront absorbés par des zones inondables prédéfinies grâce à des digues submersibles qui laissent passer l'eau à partir d'un certain débit atteint. Des digues de retour sont aussi prévues pour que l'eau retourne dans le Rhône en aval ainsi que des arrière-digues pour éviter que l'eau ne se propage. Le but de ces travaux est de diminuer

la hauteur d'eau de 1.3-1.6 mètres pour les crues centennales (Groupement Coude du Rhône & Groupement STUCKY-BG, 2019).

Notre étude porte sur la section du Rhône allant du kilomètre (km) 37.187 au kilomètre 39.529. Les kilométrages des profils sont présentés sur la figure 4.



Figure 4: Carte des profils du Rhône avec leur kilométrage sur lesquels la modélisation est appliquée

2.2 Données

Aucune donnée n'a été récoltée sur le terrain dans le cadre de la présente étude. Des données existantes ont été récupérées. Un tableau récapitulatif des données et de leur source est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des données et de leur source d'acquisition

Modélisation	Type de données	kilomètre	Source
Coude de Martigny	Profils coude Martigny avant et après travaux	37.187 au 39.529	PL-LCH
	Granulométrie	37.187 au 39.529	PL-LCH
		Station/piézomètre	
	Débits	Station de Grandson	Crealp ¹
	Température	Station de la Porte du Scex	OFEV ²
	Concentration	Station de la Porte du Scex	OFEV
	Hauteurs piézométriques	Piézo-mètre 07103	Crealp

Il faut prendre en considération le fait que les données de concentration et de température utilisées sont celles de la station de la Porte du Scex. La station de Grandson à l'amont de Martigny n'enregistre pas ces paramètres. Dans le cadre de cette étude expérimentale, l'erreur induite par la distance géographique n'est pas prise en compte. Cependant, il serait préférable d'avoir une station plus proche de l'étude.

Les hauteurs d'eau ont été calculées pour chaque profil. Par contre, les mêmes données de température, de hauteurs piézométriques, de débit et de concentration des particules en suspension ont été utilisées pour le coude de Martigny avant et après travaux. Ces paramètres seront certainement impactés par les futurs travaux à Martigny mais également par ceux en son amont et son aval. Comme il est difficile de prévoir leur effet, nous avons fait l'hypothèse qu'il n'y aurait pas de changement majeur.

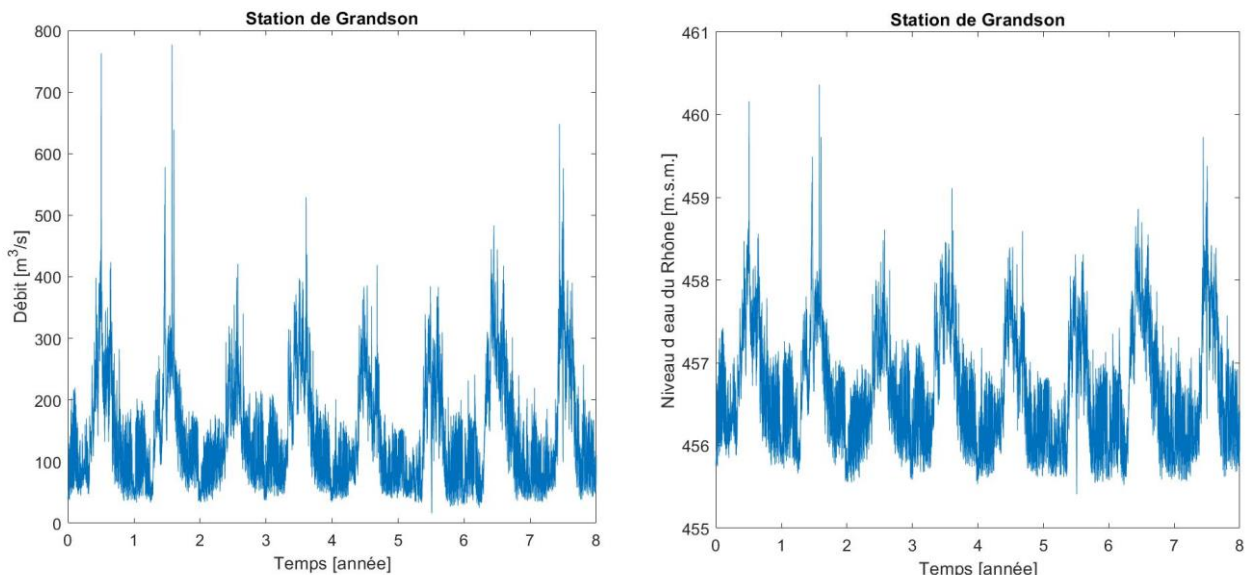


Figure 5 : A gauche la courbe des débits et à droite celle des niveaux d'eau du Rhône à la station de la Brandson

¹ Centre de recherche sur l'environnement alpin (Crealp)

² Office Fédéral de l'Environnement (OFEV)

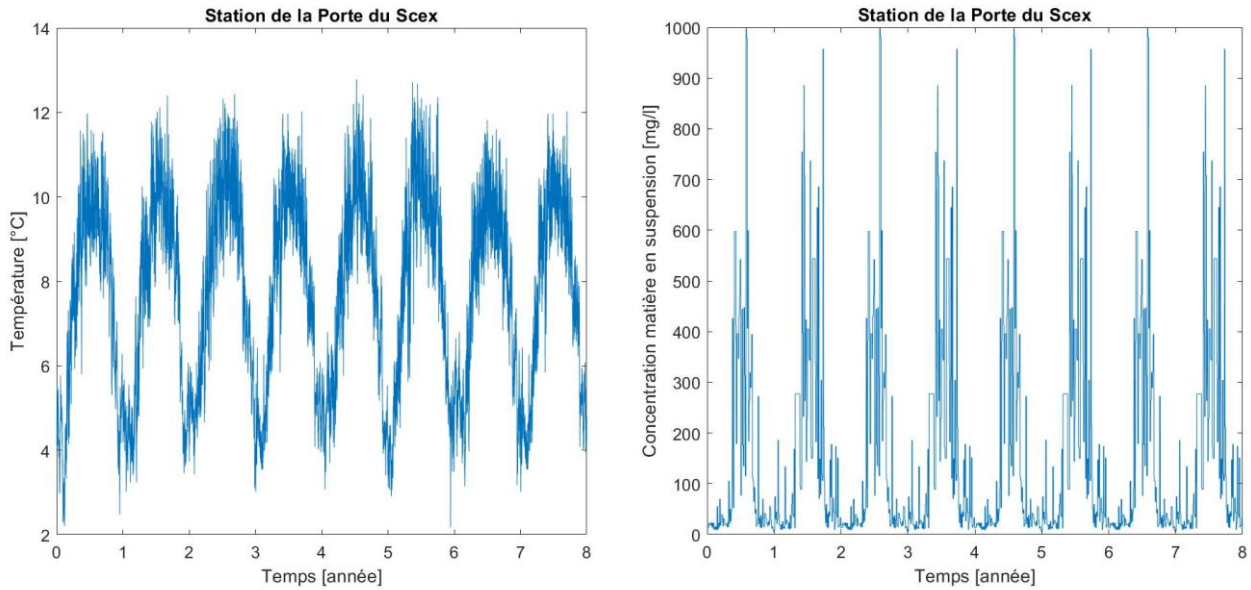


Figure 6 : A gauche, la courbe des températures et à droite, celle des concentrations de la matière en suspension à la station de la Porte du Scex

La granulométrie est un paramètre difficile à calculer. Selon Schälchli (Ueli Schälchli, communication personnelle, 6 octobre 2020, annexe 5), il faut qu'un grand nombre d'échantillons soit récolté pour pouvoir définir précisément la granulométrie. S'il est trop petit, les résultats ne seront pas satisfaisants. Ils peuvent donc être une source d'erreur.

Afin de visualiser les données et comprendre les résultats obtenus pas la modélisation, elles ont été tracées sur un laps de temps de huit années (2010 à 2018) et sont représentées sur les figures 4, 5 et

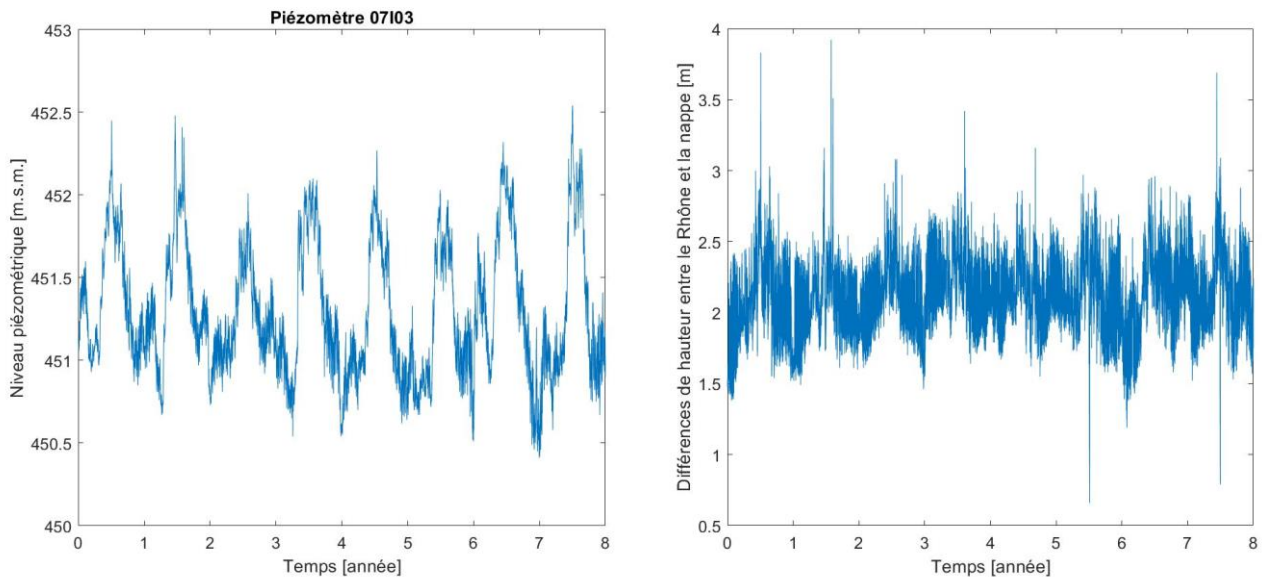


Figure 7 : A gauche la courbe des niveaux piézométriques 07103 et à droite celle des différences entre la hauteur d'eau de la nappe et piézométrique

6.

En complément à ces données, les courbes débit-hauteur d'eau et des vitesses d'eau pour les profils du km 39.339, du km 38.119 et du km 37.397 avant et après travaux ont été représentés dans les annexes 1 et 2.

2.3 Paramètres et processus déterminants

Chaque cours d'eau a des caractéristiques uniques. Les processus impliqués dans le colmatage peuvent donc différer d'un cours d'eau à un autre. Les personnes ayant étudiés le Rhône sont les plus à même de connaître les processus et les paramètres influençant le colmatage du Rhône.

Lors d'une discussion avec Ueli Schälchli (Ueli Schälchli, communication personnelle, 6 octobre 2020, annexe 5), il est ressorti que les processus déterminants selon lui étaient l'infiltration des particules dans le lit, le transport des matériaux ainsi que le décolmatage. Il a aussi relevé que les éclusées de barrage pouvaient potentiellement avoir un effet. Aucune étude ne le prouve. Cela n'est donc pas pris en compte dans notre cas. Un paramètre clé selon Schälchli est le gradient hydraulique entre le niveau d'eau dans le cours d'eau et la hauteur de la nappe. Il a également mis en avant qu'il était important de connaître la granulométrie pour comprendre à quel débit le lit est mobile.

Une réunion portant sur le colmatage du Rhône a eu lieu le 8 mars 2020 à Sion (Bureau d'étude Impact SA, 2020) regroupant les personnes travaillant sur le Rhône ainsi que des spécialistes sur le sujet. Lors de cette séance, en plus des paramètres déjà relevés, la turbidité, la morphologie et la perméabilité du lit ont été abordées.

Au vu des informations récoltées, les processus pris en compte dans cette étude sont l'infiltration des particules en suspension dans le lit, le transport des matériaux et le décolmatage.

En outre et de surcroît, les paramètres clés sont la morphologie, la granulométrie, la perméabilité du lit, le gradient hydraulique (interaction Rhône-nappe), la hauteur d'eau du Rhône et la turbidité

Ces processus clés sont utilisés comme base pour la modélisation. Le transport est indirectement pris en compte ; le colmatage est induit par les particules en suspension transportées par le Rhône et le décolmatage est provoqué par la perte de matière du lit par érosion qui est charriée en aval par le cours d'eau.

2.4 Méthode d'analyse de la conductance du Rhône

La conductance du Rhône renseigne sur la capacité du lit à se laisser traverser par l'eau. Plus la conductance est élevée plus l'eau peut traverser facilement le lit ce qui veut dire que pour une conductivité hydraulique élevée, il y a peu de colmatage. Il est difficile de mesurer cela directement dans le lit. De plus, une campagne de mesure n'est pas envisageable vu le temps restreint à disposition pour cette étude. Il faut ainsi se référer à la littérature ou à d'autres méthodes existantes.

L'une des manières d'étudier la conductance du Rhône est d'analyser la variation du coefficient de retard, a , de la réponse de la nappe par rapport au changement du niveau du cours d'eau. Gianni (2017) a étudié la variation de la nappe, h , dans de la ville de Fully en amont de Martigny entre janvier 2000 et décembre 2003.

La variation de la hauteur piézométrique en fonction de la distance entre le piézomètre et le cours d'eau x au temps t peut être exprimée comme suit :

$$h(x, t) = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \exp\left(\frac{x}{a} + \frac{\alpha t}{a^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{\sqrt{\alpha t}}{a}\right) \quad (2.1)$$

avec $a = \frac{d \cdot K_a}{K}$ le coefficient de retard, $\alpha = \frac{K_a \cdot d_a}{\varphi}$ la diffusivité hydraulique pour une nappe libre où φ représente la porosité efficace de l'aquifère, d_a l'épaisseur saturée de l'aquifère, K_a la conductivité hydraulique de l'aquifère et $\alpha = \frac{K_a}{s_a}$ pour une nappe captive avec S_a le coefficient d'emménagement spécifique de l'aquifère.

Le premier terme de la partie droite de l'équation désigne la réponse de la nappe sans lit colmaté. Le second terme représente l'impact du colmatage sur la réponse de la nappe.

Hall & Moench (1972) proposent de résoudre l'équation (2.1) par la méthode de convolution. Il utilise l'équation (2.1) renommée $P(x,t)$ et la variation de la hauteur du cours d'eau $F'(t)$:

$$h(x, t) = \int_0^t F'(\tau) P(x, t - \tau) d\tau \quad (2.2)$$

Cette équation peut être transformée en fonction discrète de n pas de temps discrets de longueur Δt . En prenant comme hypothèse que la variation est linéaire entre deux pas de temps Δt , l'équation (2.2) peut être réécrite comme suit :

$$h(x, n\Delta t) = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\Delta t}{6} (F'_k P_{n-k} + F'_{k+1} P_{n-k+1} + 2F'_k P_{n-k+1} + 2F'_{k+1} P_{n-k}) \quad (2.3)$$

Cette équation est utilisée pour calculer la variation théorique de la hauteur de la nappe. La valeur théorique, h , est comparée à la véritable variation de la nappe H au temps j . On cherche à avoir la valeur h aussi proche que possible de la véritable donnée H . En minimisant la somme de l'erreur entre ces deux valeurs au carré SEE, il est possible de trouver le coefficient de retard le plus adapté à chaque pas de temps j . La valeur du coefficient a est modifiée durant l'itération afin d'obtenir un SEE le plus petit possible. Pour minimiser la fonction (2.4), (Masset, 2020) utilise la méthode Nelder-mead dans son étude qui est reprise dans notre cas.

$$SSE = \sum_{j=1}^m (H_j - h_j)^2 \quad (2.4)$$

Les données sont découpées en fenêtres d'analyse mobile d'une durée de $n\Delta t$ se recouvrant partiellement. Pour cette étude, une fenêtre d'analyse dure 48 heures avec un Δt égale à 1 heure et 48 pas de temps. La fenêtre avance de 4 heures.

2.5 Modélisation

La modélisation du colmatage du Rhône a été implémentée sur MATLAB (2019). Son but est d'évaluer l'évolution du colmatage au cours du temps.

La modélisation se base sur les profils en travers du coude de Martigny actuel et ceux après travaux. Les profils ont été redécoupés en portion d'environ un mètre.

2.5.1 Infiltration

Les sédiments infiltrés et piégés dans les pores du lit diminuent la conductivité hydraulique du lit et par conséquent les interactions entre la nappe et le Rhône.

La formule qui a été retenue pour décrire l'infiltration est celle de Schälchli (1995). Elle détermine le changement de la conductivité hydraulique par rapport à l'évolution de la résistance du sol à l'infiltration de l'eau. Cette dernière change principalement en fonction du volume de sédiments infiltré. Pour connaître cette quantité, il calcule d'abord le volume d'eau infiltré dV , pendant une durée de temps dt :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A_F \cdot \Delta p}{\eta \cdot \left(\frac{r \cdot V \cdot C}{A_F} + \beta \right)} \quad (2.5)$$

Avec C la concentration de particules en suspension, V le volume d'eau infiltré, A_F la surface d'infiltration, η la viscosité dynamique, r la résistance spécifique d'infiltration, β la résistance du lit sans colmatage et Δp la différence de pression induisant l'infiltration.

La résistance totale du lit est donnée par $r \cdot \frac{V \cdot C}{A_F} + \beta = r \cdot m_s + \beta$. La seconde partie de l'équation $r \cdot V \cdot C$ représente la résistance d'infiltration générée par m_s la masse de sédiments déposée par unité de surface dans le lit. Elle peut être réécrite comme $r \cdot m_s$. On peut introduire cette dernière relation dans la formule (2.5).

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A_F \cdot \Delta p}{\eta \cdot (r \cdot m_s + \beta)} \quad (2.6)$$

La seconde partie de la résistance β est définie comme :

$$\beta = \frac{L \cdot g}{k_0 \cdot \nu} \quad (2.7)$$

Avec ν la viscosité dynamique, L la longueur d'infiltration, g la gravité et k_0 la conductivité hydraulique du lit non colmaté. Cette dernière est déterminée par :

$$k_0 = \frac{1}{r_c} \cdot 0.0405 \cdot \frac{\varepsilon^3}{1+\varepsilon} d_w^2 \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{d_w} = \int_0^1 \frac{1}{d_{mj}} \Delta P_j \quad (2.9)$$

Où $r_c=1.5$ indique le coefficient de rugosité, $\varepsilon = n/(1-n)$ le ratio de vide donné en fonction de, n la porosité, d_w le diamètre effectif en mm, d_{mj} le diamètre moyen et ΔP_j le pourcentage du poids de la fraction j.

La porosité, n, est définie selon le diamètre d_{60} qui signifie que 60% des grains composant le lit ont une taille d'un diamètre d_{60} ou moins et le diamètre d_{10} que 10% ont un diamètre égal ou plus petit que d_{10} .

$$n = 0.486 \cdot \left(\frac{d_{60}}{d_{10}} \right)^{-0.20} \quad (2.10)$$

La résistance spécifique d'infiltration r est donnée par :

$$r = \frac{1.2 \cdot 10^{12} \cdot \Theta^{0.5}}{(d_{10}/d_m)^{3.5} R^{1.5} i^{0.67}} \quad (2.11)$$

avec d_m le diamètre moyen, de R le nombre de Reynolds calculé avec équation (2.13), de Θ la contrainte adimensionnelle de cisaillement, de i le gradient hydraulique obtenu avec la formule (2.12). Cette dernière dépend de Δh_w la perte de charge et de la longueur d'infiltration.

$$i = \Delta h_w / L \quad (2.12)$$

$$R = \frac{\sqrt{g(s-1)d_m} \cdot d_m}{\nu} \quad (2.13)$$

avec s de la gravité spécifique des sédiments. La contrainte adimensionnelle de cisaillement se calcule selon l'équation (2.14).

$$\Theta = \frac{h \cdot J}{(s-1) \cdot d_m} \quad (2.14)$$

Où J représente la pente de friction et h la hauteur d'eau du Rhône. Afin de déterminer la formule de la conductivité hydraulique, la formule (2.6) est intégrée avec un temps et un volume d'eau infiltré initiaux égaux à zéro.

$$\eta \int_0^{V_A} \left(\frac{r \cdot V \cdot C}{A_F} + \beta \right) dV = \int_0^{t_A} (A_F \cdot \Delta p) dt \quad (2.15)$$

$$\eta \left(\frac{r \cdot V_A^2 \cdot C}{2 \cdot A_F} + \beta \cdot V_A \right) = A_F \cdot \Delta p \cdot t_A \quad (2.16)$$

$$\eta \cdot r \cdot C \cdot V_A^2 + 2 \cdot \eta \cdot \beta \cdot A_F \cdot V_A - 2 \cdot V_A^2 \cdot \Delta p \cdot t_A = 0 \quad (2.17)$$

La solution positive à l'équation (2.17) est donnée par :

$$V_A = A_F \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 + 2 \cdot r \cdot \Delta p \cdot \frac{1}{\eta} \cdot t_A}}{r \cdot C} \quad (2.18)$$

La conductivité hydraulique peut être calculée grâce à la formule (2.19)

$$k = \frac{dV_A}{dt} \cdot \frac{1}{A_F} \cdot \frac{1}{i} \quad (2.19)$$

En remplaçant β par la formule (2.7) et en intégrant l'équation (2.5) dans (2.19), la formule de la conductivité hydraulique vaut :

$$k = \frac{g \cdot L}{v(r \cdot ms + \beta)} \quad (2.20)$$

Toutes les formules présentées ci-dessus vont servir à la modélisation de l'infiltration des particules dans le lit. Elle se fait par itération j . Le volume d'eau infiltré, la masse infiltrée ainsi que la conductivité hydraulique sont calculés à chaque pas de temps j pour pouvoir étudier leur évolution.

L'équation (2.6) est utilisée pour calculer la variation du volume d'eau infiltré pendant un temps de $\Delta t = 3'600$ secondes. La résistance à l'infiltration est due en partie à la masse de sédiments infiltrée, ms , qui est calculée par rapport au volume d'eau infiltré et à la concentration de matière en suspension. Elle est déterminée grâce à l'équation (2.22). Cette masse est un volume de sédiments présent dans le lit qui a été mesuré au pas de temps $j-1$ et qui influence l'infiltration au pas de temps j . La température T influence la masse volumique de l'eau ainsi que les viscosités dynamiques et cinétiques. Les paramètres calculés avec ces dernières sont donc dépendants de la température qui varie dans le temps.

$$\frac{dV_j}{dt} = \frac{A_F \cdot \Delta p_{j,h}}{\eta_{j,T} (r_{j,t} \cdot ms_{j-1} + \beta_{j,T})} \quad (2.21)$$

$$ms_j = \frac{C_j \cdot \Delta V_j \cdot \Delta t}{A_F} + ms_{j-1} \quad (2.22)$$

La conductivité hydraulique varie selon la formule 2.18.

$$k_j = \frac{g \cdot L}{v_{j,T} (r_{j,T} \cdot ms_j + \beta_{j,T})} \quad (2.23)$$

On prend comme hypothèse que la masse infiltrée est égale aux conditions initiales.

2.5.2 Décolmatage

Selon Zhu et al. (2008), il existe de nombreuses formules empiriques pour calculer le taux d'érosion, mais aucune n'est universelle. Malheureusement, aucune donnée sur le décolmatage du Rhône n'est

disponible pour pouvoir les appliquer. Par conséquent, cette étude ne peut pas s'appuyer sur ces formules pour déterminer le taux d'érosion.

Pour évaluer la perte de masse due à l'érosion du lit, Park & Hunt (2018) propose une formule s'appuyant sur des événements de débit maximum Q_{max} durant lesquels la masse maximum de sédiments infiltrée dans le lit M_{max} est complètement resuspendue. La masse de sédiments qui est prélevée du lit M_{decol} pour un événement de débit Q est calculée selon l'équation suivante :

$$M_{decol} = M_{max} \cdot \exp \left[-\beta \cdot \left(1 - \frac{Q(t_j)}{Q_{max}} \right) \right] \quad (2.24)$$

où Q indique le débit maximum durant la crue j et β le paramètre d'affouillement sans dimension compris entre 2 et 20. Pour un petit β , la masse libérée est importante même pour des crues de faible intensité. Alors que pour un grand β , il faut des événements de crue beaucoup plus importants pour qu'il ait de l'érosion.

L'équation 2.24 prend en compte la totalité de la masse libérée par la section du lit considérée, contrairement à notre modèle qui regarde les échanges de masse par surface du lit. M_{decol} est en unité de masse [M] dans la formule 2.24. Pour intégrer cette formule au modèle, l'unité de la masse maximum resuspendue est modifiée par une masse selon une surface [M/L²].

La fonction 2.24 n'est pas donnée en fonction du temps, alors que notre pas de temps est en heure. On divise donc l'équation par, m_c , le nombre de pas de temps que dure la crue c . Cela permet de distribuer l'érosion sur la durée totale de l'événement. C'est pour ne pas avoir de pic soudain. En réalité, l'érosion doit certainement être répartie de façon non uniforme pendant le temps de la crue.

De plus, la perte de masse n'est pas la même selon la profondeur. La contrainte de cisaillement est une contrainte mécanique qui agit parallèlement à la surface et qui est induite par le mouvement de l'eau. Elle est définie selon Meyer-Peter/Müller comme (Schleiss, 2015) :

$$\tau_R = \rho \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{K}{K_r} \right)^{3/2} \cdot J \quad (2.25)$$

Avec K la rugosité du lit selon Strickler et K_r la rugosité des matériaux du lit. Plus la profondeur h est grande, plus la contrainte de cisaillement est élevée. Ce paramètre influence donc l'érosion du lit. La perte de masse sera considérée selon h . L'équation 2.24 est réécrite :

$$M_{decol} = \frac{h(x, t_c)}{h_{max}(t_c)} \cdot \frac{M_{max}}{m_j} \cdot \exp \left[-\beta \cdot \left(1 - \frac{Q(t_c)}{Q_{max}} \right) \right] \quad (2.26)$$

Avec $h_{max}(t_c)$ la profondeur maximum, $h(t_c)$ la hauteur selon la distance x sur la largeur du tronçon au débit le plus élevé $Q(t_c)$ durant la crue c .

La courbe de débit varie énormément. Il est difficile de calculer le début de la crue et son apogée. Elle a donc été simplifiée en fonction polynomiale de degrés 15 pour suivre les tendances des débits. Le début de décolmatage se base sur un débit Q_0 pour lequel le colmatage commence.

Pour connaître la masse maximum infiltrée, la modélisation sans décolmatage est utilisée. Après un certain temps, la masse infiltrée devient stable et c'est la valeur au plateau qui est utilisée comme valeur pour M_{max} .

Lors de la régression de la crue, il y a nouveau de l'infiltration de sédiments dans le lit (Zhu et al., 2008). Les vitesses diminuent ainsi que les forces de portances et de traînée. Les particules en suspension commencent à se redéposer et à s'infiltrer. Les équations de Schälchli (1995) sont à nouveau utilisées dans cette phase descendante.

3. Résultats

3.1 Colmatage actuel

Il est difficile de définir avec exactitude le colmatage du Rhône, car peu d'études s'y sont intéressées. Elles proviennent principalement de recherches effectuées par le centre d'hydrogéologie et de géothermie (CHYN) de l'université de Neuchâtel (Gianni, 2017; Glenz, 2013; Masset, 2020).

La méthode utilisée par Gianni (2017) dans sa thèse a été implémentée dans le cadre de Martigny pour les piézomètres 07D07 et 07I03, mais aucun résultat probant n'en est sorti. Cela peut être dû au fait que cette approche n'est pas adaptée à la région de Martigny. Les piézomètres utilisés par Gianni (2016) étaient à des distances entre 2.2 et 40 mètres du Rhône. Alors que vers Martigny, les piézomètres prenant des mesures horaires sont à une distance plus grande que 70 mètres et juste à côté des canaux de drainage. Ces derniers ont peut-être une influence trop importante sur le niveau de la nappe. Ils sont certainement trop éloignés pour pouvoir déterminer le coefficient de retard a . Il faudrait avoir des piézomètres plus proches du Rhône.

Bien que l'application de cette méthode ne semble pas possible, la zone étudiée par Gianni (2017) est géographiquement proche de la nôtre. Elle se trouve en amont de Martigny. Son étude a fait ressortir deux événements majeurs de décolmatage; une en 2000 et une seconde en 2003. Dus à la proximité démographique des deux lieux, ces événements de décolmatage doivent certainement aussi avoir eu lieu dans la zone de Martigny.

Glenz (2013) a étudié durant sa thèse l'état du Rhône avant et après la troisième correction du km 30 au km 80 environ en se basant sur un modèle numérique d'écoulement permanent. La connectivité hydraulique des aquifères près du Rhône varie entre 10^{-2} et $10^{-3.5}$ selon Glenz (2013). Le site de Crealp répertorie les forages effectués en Valais. Malheureusement, des tests de pompages permettant de déterminer la conductivité hydraulique de la nappe ont rarement été effectués. La conductivité hydraulique du sondage puits n° 2 de DUS ($x=571126.00$, $y=107791.00$) est de $2 \cdot 10^{-3}$ [m/s] ce qui est dans la gamme de valeur (Tissères SA, s. d.).

Dépendant des zones du Rhône, l'eau peut s'exfiltrer ou s'infiltrer. Présentement, l'étude de Glenz (2013) montre que dans la zone de Martigny le niveau piézométrique est plus bas que celui du cours d'eau. Le Rhône nourrit la nappe.

Glenz (2013) a déterminé que la conductivité hydraulique du lit varie entre 10^{-4} et 10^{-8} m/s dans la section de Martigny. Cette zone comprend de plus fortes variations que dans d'autres sections du fleuve.

Aucune information précise sur les zones colmatées dans la zone de Martigny ne peut être déterminée. En appliquant une modélisation plus locale, notre étude espère pouvoir déterminer des zones colmatées plus précisément.

3.2 Modélisation

3.2.1 Infiltration

Les formules de Schälchli (1995) contiennent de nombreux paramètres dont certains sont difficiles à déterminer. Une erreur sur ces derniers aura un impact plus ou moins conséquent sur le résultat final. La sensibilité des paramètres doit être étudiée pour déterminer lesquels pourraient induire de fausses

conclusions. La granulométrie est ardue à connaître précisément et la longueur d'infiltration est un paramètre qui doit être estimé. Pour d_{10} , d_{60} , d_m , d_w et L . Une étude de sensibilité a été effectuée.

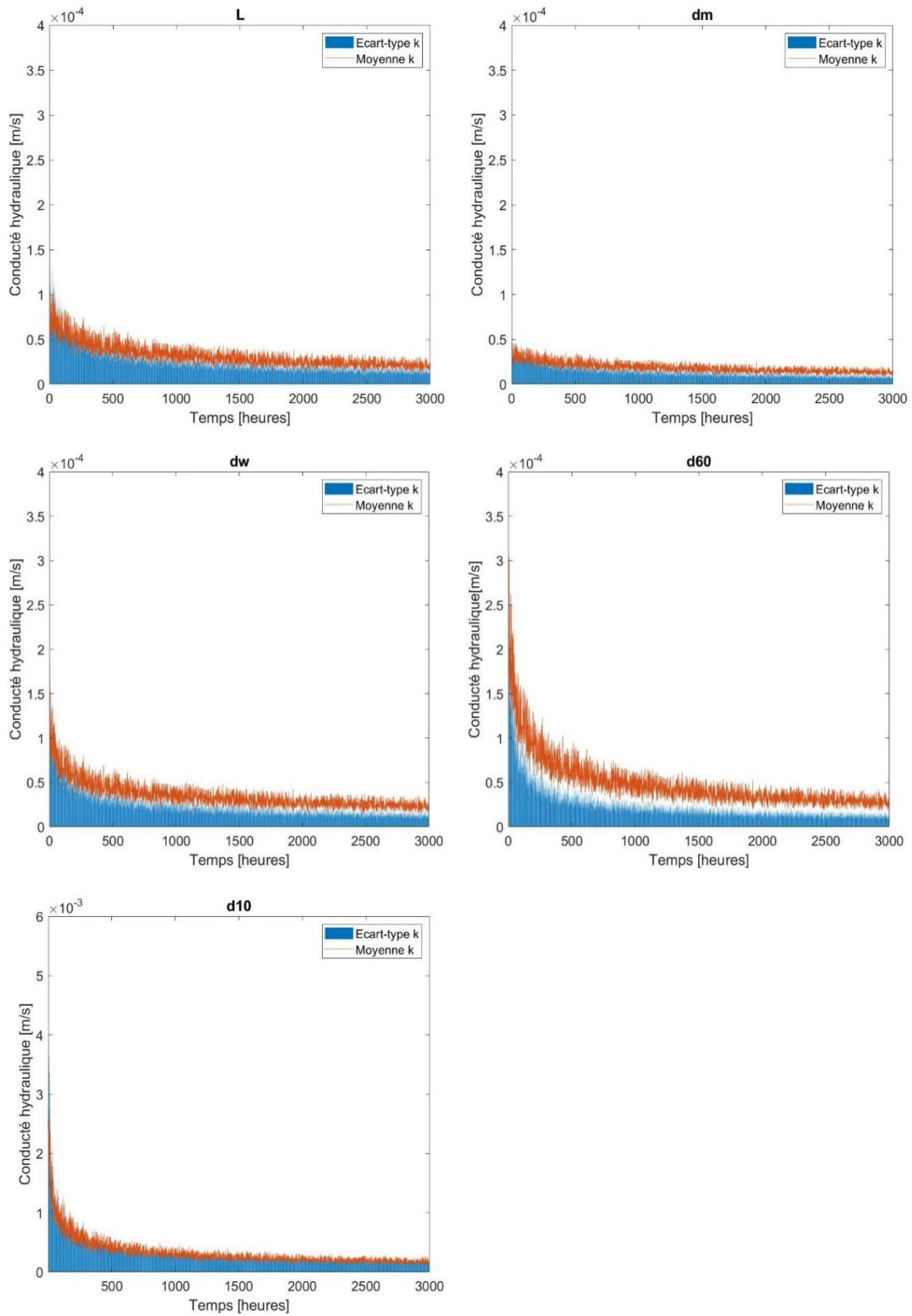


Figure 8 : Moyenne et écart-types des itérations des paramètres pour tester la sensibilité des paramètre L , d_m , d_w , d_{60} , d_{10}

Pour chaque paramètre potentiellement problématique, des itérations de 3000 heures ont été faites en gardant le paramètre étudié fixe et en changeant aléatoirement à chaque pas de temps les valeurs de la hauteur d'eau, de la température, de la hauteur piézométrique et de concentration de particule en suspension. À la fin des itérations, le paramètre incertain change et une nouvelle série d'itérations est effectuée, et cela plusieurs fois. La moyenne et l'écart-type ont ensuite été calculés pour voir l'impact du paramètre sur la valeur de la conductivité hydraulique. Ils sont représentés sur les graphiques de la figure 8. Il faut prendre garde que d_{10} n'est pas à la même échelle pour une question de lisibilité des résultats. Le tableau 2 présente les gammes de valeurs utilisées.

Tableau 2 : Gamme de valeurs utilisés pour faire l'analyse de sensibilité des paramètres

Paramètre	Valeurs
d_{10} [m]	0.001 à 0.01
d_{60} [m]	0.05 à 1
d_m [m]	0.05 à 1
d_w [mm]	5 à 35
L [m]	1 à 20
Concentration [kg/m^3]	0.1 à 1
Température [$^{\circ}\text{C}$]	2 à 8
Hauteur piézométrique [m.s.m]	446 à 448
Hauteur d'eau du Rhône [m.s.m]	450 à 454

Il en ressort que pour tous les paramètres les écarts-types diminuent avec le temps. Une erreur sur un paramètre a un impact plus important en début de simulation et il s'amoinde avec le temps. Leurs écarts-types sont aussi élevés que leur moyenne ce qui démontre une grande variabilité de la valeur calculée. Le paramètre d_{10} est le plus problématique. Sa moyenne est beaucoup plus importante que pour les autres. C'est donc un paramètre particulièrement sensible.

La valeur de k_0 calculée avec l'équation 2.8 est égal à $2.93 \cdot 10^{-2}$ m/s ce qui semble trop faible. En testant les équations de Schälchli (1995) avec des valeurs de k_0 entre 10^{-2} à 10^{-5} m/s (annexe 3), un k_0 de l'ordre de 10^{-3} m/s semble plus raisonnable. En effet, les conductivités hydrauliques obtenues sont similaires sauf pour $k_0 = 10^{-5}$ m/s pour lequel les premières valeurs de la modélisation sont nettement inférieures aux autres. La valeur de k_0 utilisé dans la modélisation est égal à $2.93 \cdot 10^{-3}$ m/.

Aucune donnée sur le colmatage du Rhône n'est disponible. Il est pourtant essentiel de pouvoir vérifier que l'approche proposée soit cohérente et que les équations soient bien implémentées dans MATLAB.

Ueli Schälchli, Abegg, & Hunziger (2001) ont également utilisé dans leur étude du Rhin en Suisse les équations de Schälchli (1995) pour calculer la conductivité hydraulique. Les résultats obtenus avec la modélisation sont comparés à la conductivité hydraulique qu'ils ont calculé au km 25,8 du Rhin à la hauteur de Bad Ragaz (Figure 9). Les courbes ont une tendance similaire avec un décolmatage abrupt au début et une descente plus douce après. Les valeurs obtenues semblent donc cohérentes.

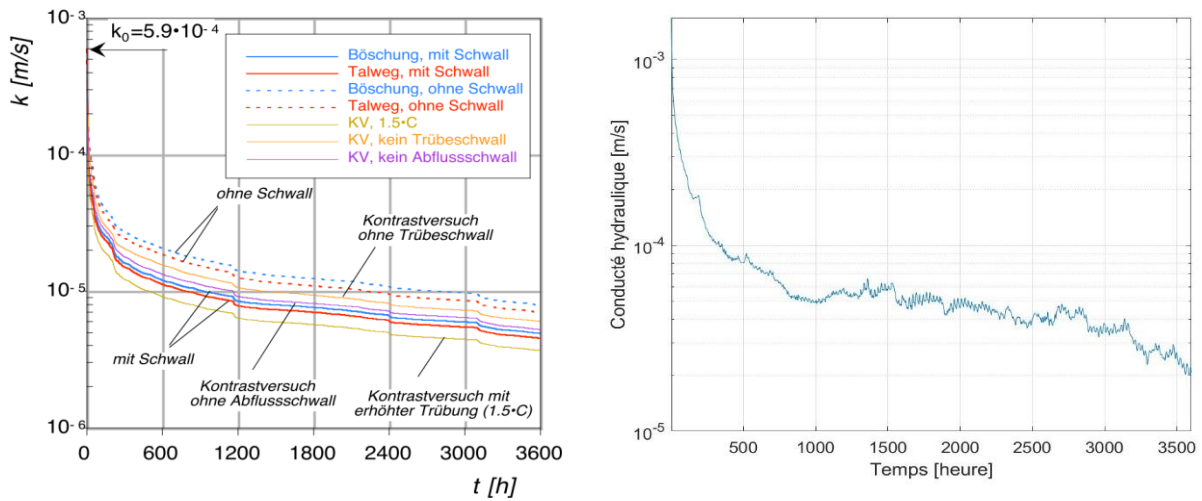


Figure 9: Comparaison de la conductivité calculée grâce à la modélisation (droite) avec celle du km 25.8 du Rhin (gauche)

3.2.2 Décolmatage

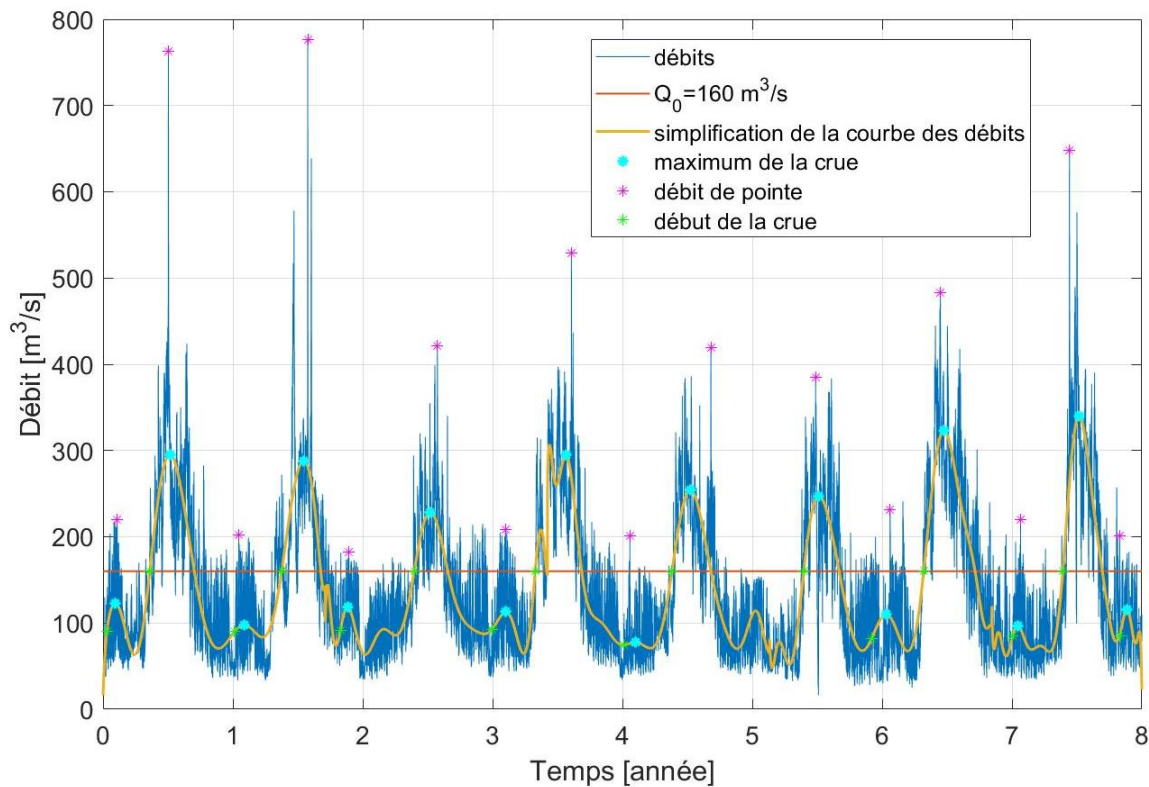


Figure 10 : Courbe de débit et sa simplification qui a permis de déterminer le débit, le point maximum et le débit de pointe de la crue

Dans un second temps, le décolmatage a été rajouté à la modélisation. Comme décrit au chapitre 2.4.2, la courbe des débits a été simplifiée pour déterminer le début des crues et les débits de pointe. Le commencement de la crue s’amorce dès le début du charriage pour notre modèle. Le procès-verbal de la séance colmatage OCCR3 (Bureau d’étude Impact SA, 2020) mentionne les débits marquant le début

du transport pour divers tronçons du Rhône. Celui de Martigny a une valeur de $Q_0=160 \text{ m}^3/\text{s}$ qui est utilisé dans la présente étude pour marquer le début du colmatage. Le résultat de cette manipulation est représenté par la figure 10.

La quantité de sédiments infiltrée dans le lit sans colmatage permet de définir la masse maximum libérée lors d'un évènement Q_{max} . Pour la modélisation, M_{max} est égal à $450 \text{ kg}/\text{m}^2$.

Aucune donnée n'est disponible sur le débit maximum pour lequel le lit est complètement décolmaté. Gianni (2017) dans son étude met en évidence deux événements de décolmatage comme mentionné au chapitre 3.1. Le coefficient de retard a baissé abruptement deux fois, en 2000 et en 2003. Les débits de pointe lors de ces événements de décolmatage à la station de Grandson sont de $Q_{\text{max}}(2000)=978 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_{\text{max}}(2003)=437 \text{ m}^3/\text{s}$ (Office fédéral de l'environnement OFEV, 2000, 2003). Les conductivités hydrauliques pour des Q_{max} entre 537 et $978 \text{ m}^3/\text{s}$ ont été calculées et elles sont représentées sur la figure 11. $Q_{\text{max}}=950 \text{ m}^3/\text{s}$ semble être un choix raisonnable. En effet, il n'y a pas plusieurs décolmatages complets consécutifs contrairement à des Q_{max} plus petits. Pour $980 \text{ m}^3/\text{s}$, il n'y a presque pas de colmatage pour des crues avec des débits de pointe d'environ $750 \text{ m}^3/\text{s}$.

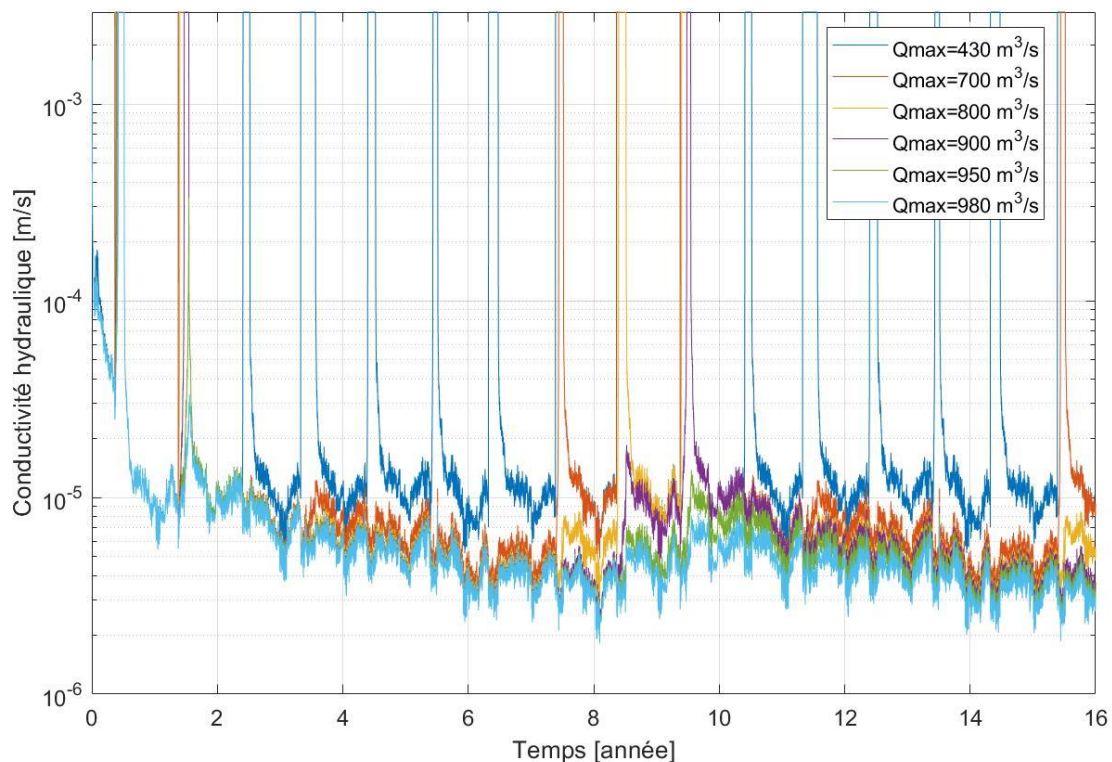


Figure 11 : Effet de la variation de la valeur de Q_{max} entre 430 et $980 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la conductivité hydraulique

Le coefficient β est compris entre 2 et 20. Le décolmatage a été implémenté pour différentes valeurs de β . Les résultats sont représentés sur la figure 12. Pour les β en dessous de 12, les décolmatages sont trop élevés. Un β de 13 est utilisé pour la modélisation.

La figure 13 représente la conductivité hydraulique avec et sans décolmatage. Afin de voir l'impact de ce dernier sur une plus longue durée de temps, l'itération a été doublée. Après un événement de crue, la conductivité hydraulique diminue plus vite et tend à se rapprocher de la courbe sans décolmatage.

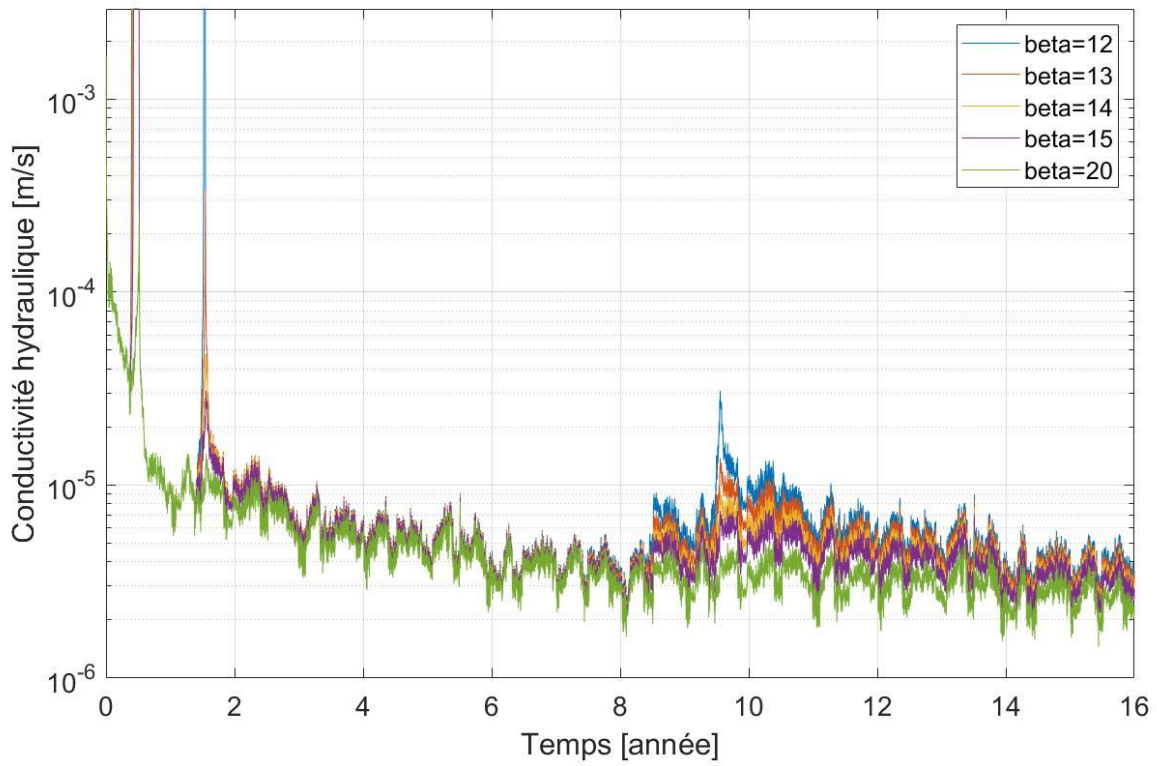


Figure 13 : Effet de la variation de la valeur de β entre 12 et 20 sur la conductivité hydraulique

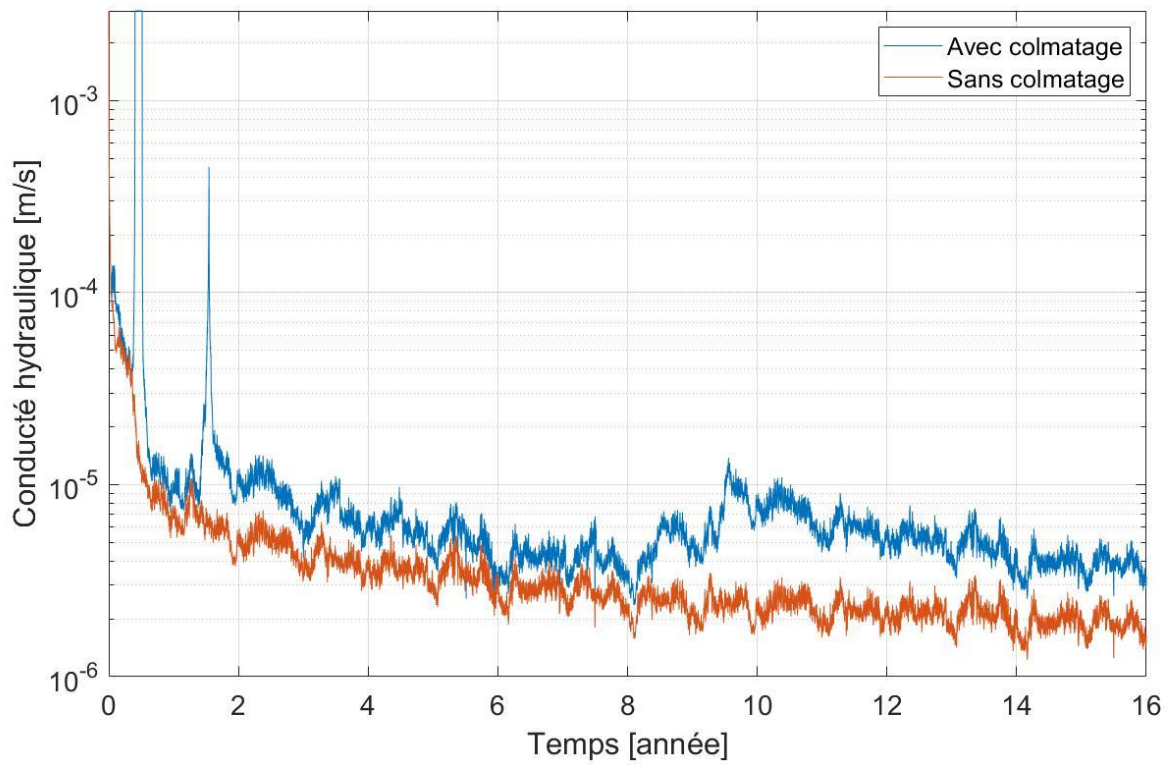


Figure 12 : Conductivité hydraulique avec et sans colmatage

3.2.3 Application à la zone de Martigny

La modélisation a été appliquée selon des profils en travers du km 37.187 au km 39.529 du Rhône au niveau de Martigny avant et après travaux.

La conductivité hydraulique représente la capacité du lit à se laisser traverser par un fluide. Sa variation donne des informations sur le colmatage du lit. Afin de comprendre son évolution au cours du temps, elle est illustrée sur les cartes des figures 14 à 19 après la première année, cinquième année et huitième année.

Elle est majoritairement plus petite avant les travaux sauf vers la rampe prévue dans le projet de correction. Bien qu'il ait des changements, la conductivité hydraulique reste dans les mêmes ordres de grandeur entre les deux scénarios.

Comme vu au chapitre 3.1, le Rhône nourrit la nappe dans cette zone. Pour comprendre comment ces échanges diffèrent avec les nouveaux aménagements, le volume d'eau ainsi que la masse de sédiments infiltrés par surface sont tracés sur les graphiques de la figure 20 et 21 pour les km 39.339 et 38.119 respectivement, et à l'annexe 5 pour le km 37.397. Leur conductivité hydraulique peut être trouvée dans l'annexe 4. Le point de mesure du profil représenté est toujours celui du lit le plus profond. On peut remarquer que le volume de sédiments dans le lit diminue au cours du temps. La modification de la morphologie a réduit l'infiltration de l'eau dans le sol. Cette réduction est plus grande au niveau de la rampe au km 39.339.

Pour avoir une vue d'ensemble du volume d'eau qui traverse la zone hyporhéique, la quantité d'eau infiltrée sur toute la section étudiée est évaluée. Le calcul est effectué selon l'hypothèse que le volume infiltré est le même avant et après la valeur mesurée sur une distance permettant de couvrir tout le linéaire entre chaque profil de mesures. Cela donne des surfaces du lit pour chaque point de calcul. Leur air est multiplié par le volume infiltré. La surface et le débit d'infiltration à la fin de la huitième année pour un débit de 79 m³/s sont reportés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Surface et débit d'infiltration de la section de section de Martigny à la fin de la huitième année

	Avant travaux	Après travaux
Surface d'infiltration [m ²]	1.1*10 ⁵	2.1*10 ⁵
Débit d'infiltration [l/s]	241	260

Le débit d'infiltration après travaux sur l'ensemble du secteur d'étude est plus grand que celle avant. Cette augmentation est de 8%. Les modifications apportées à la morphologie du Rhône font doubler les surfaces d'échange avec la nappe.

Le volume d'eau pénétrant dans le fond du lit est plus élevé dans les premières années comme le colmatage est moins important. À la fin de la première année, l'infiltration pour le cours d'eau revitalisé est égale à 346 l/s pour un débit de 50 m³/s.

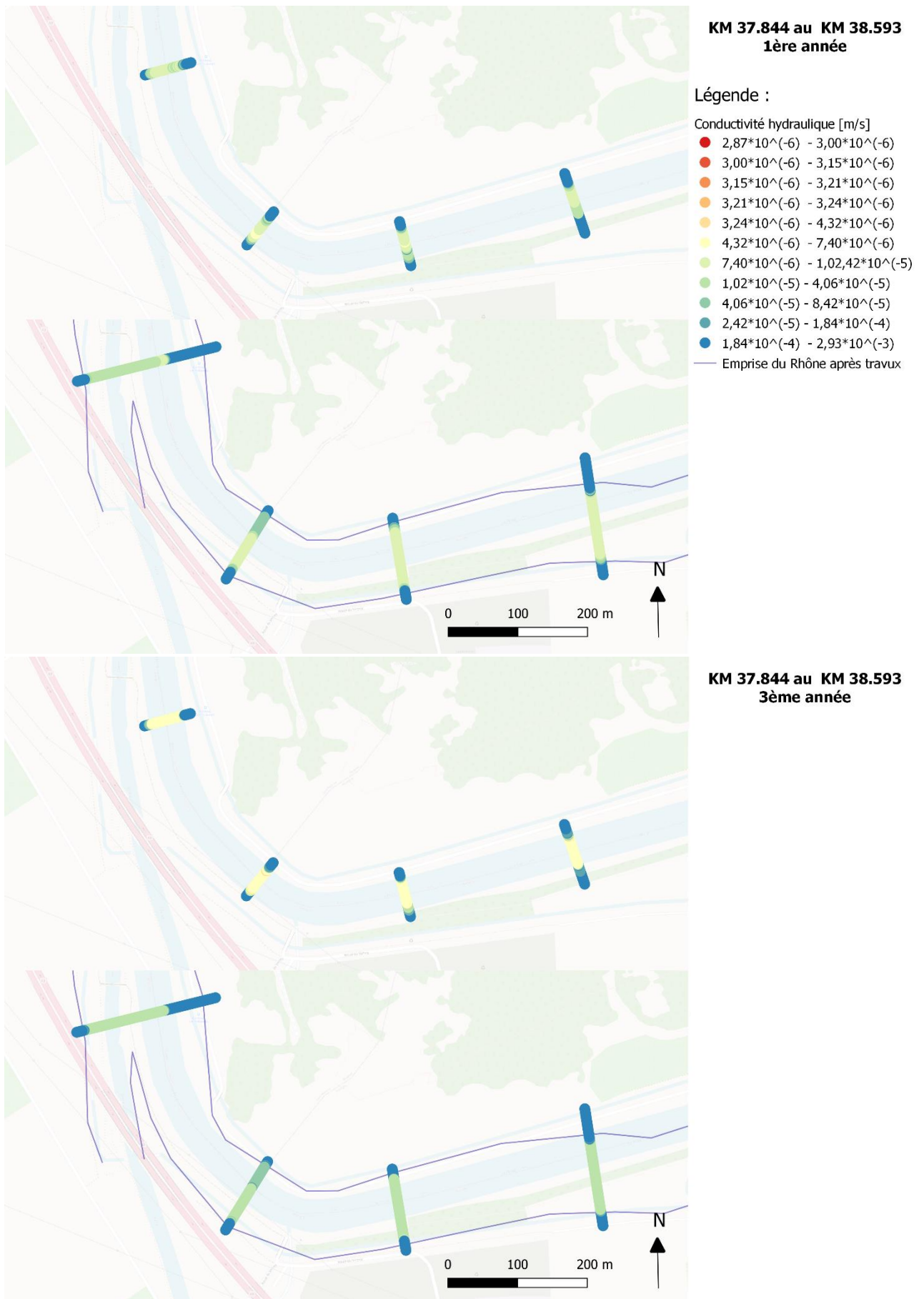


Figure 14 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.844 au km 38.593 à la 1ère et à la 3ème années

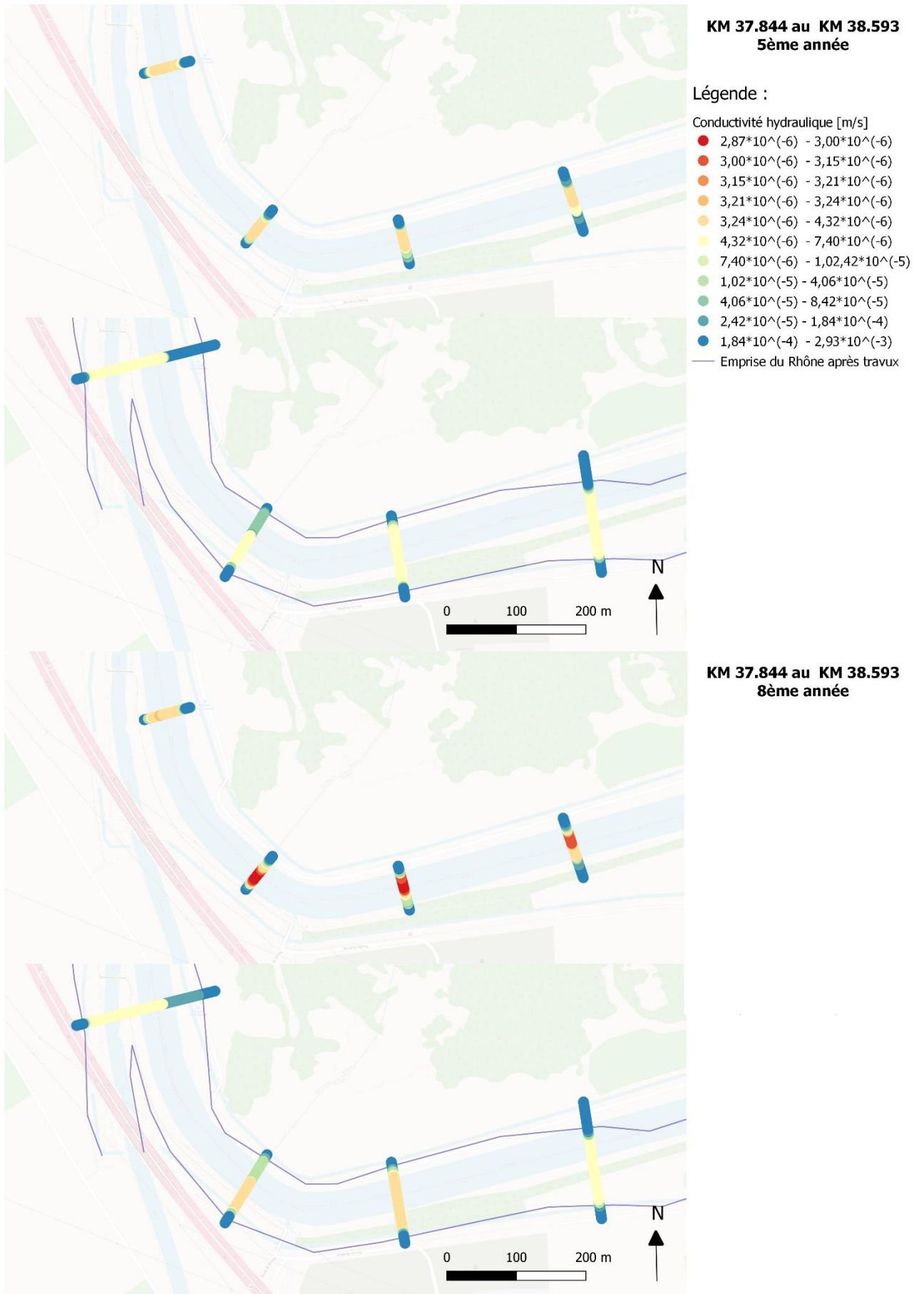


Figure 15 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.844 au km 38.593 à la 5ème et 8ème années

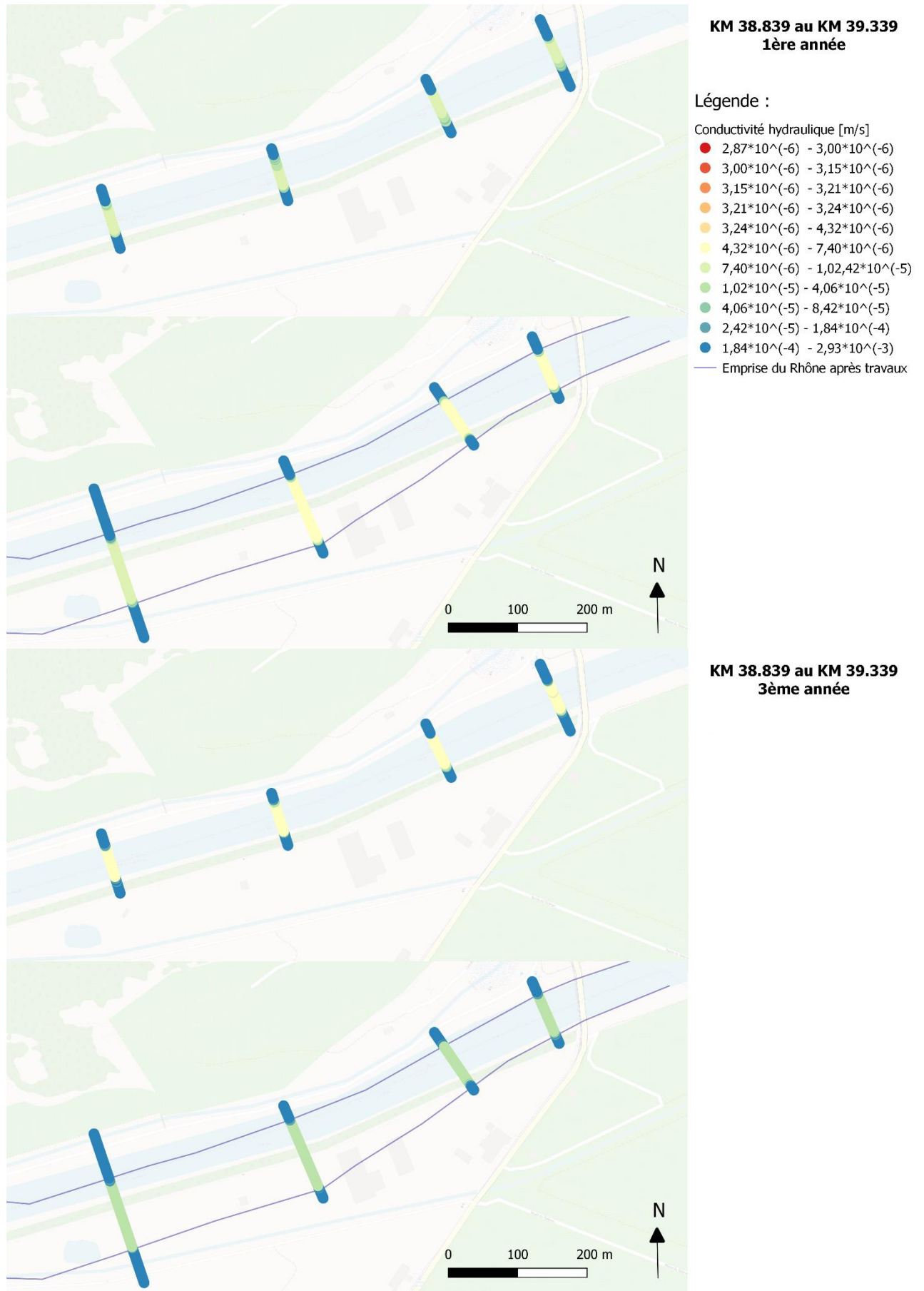


Figure 16 : Carte de la conductivité hydraulique du km 38.839 au km 39.339 à la 1ère et 3ème années

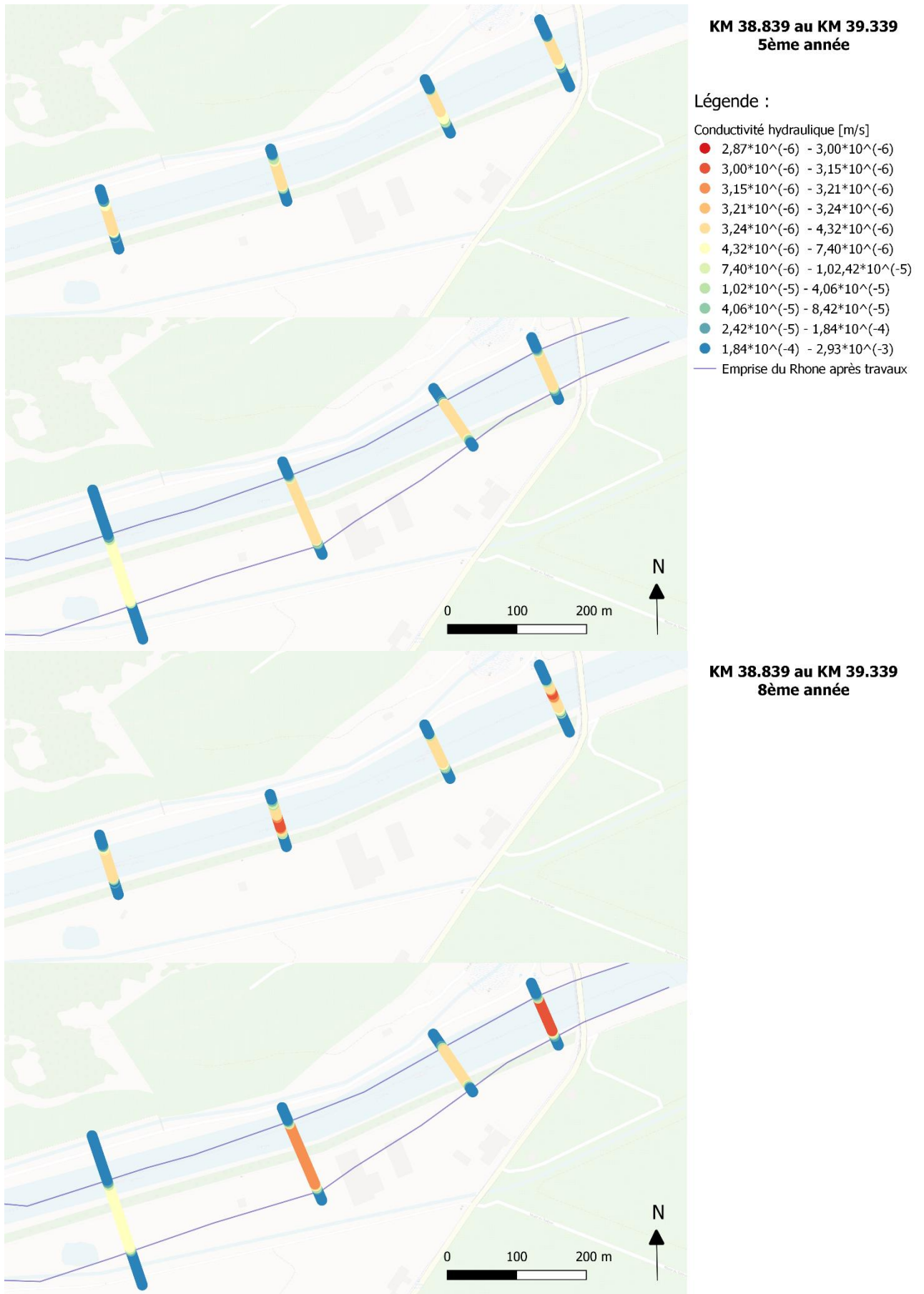


Figure 17 : Carte de la conductivité hydraulique du km 38.839 au km 39.339 à la 5ème et 8ème années

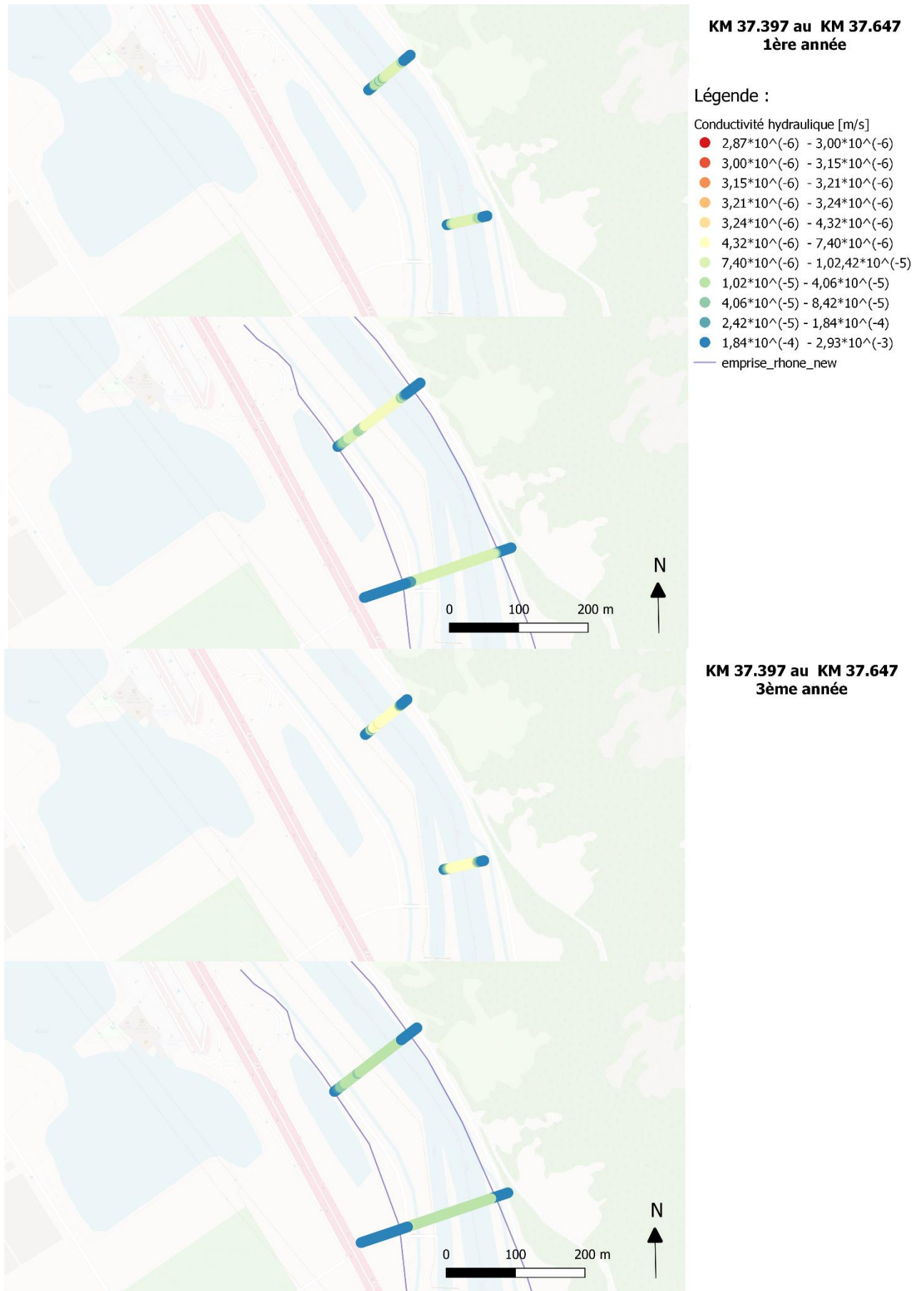


Figure 18 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.397 au km 37.647 à la 1ère et 3ème années

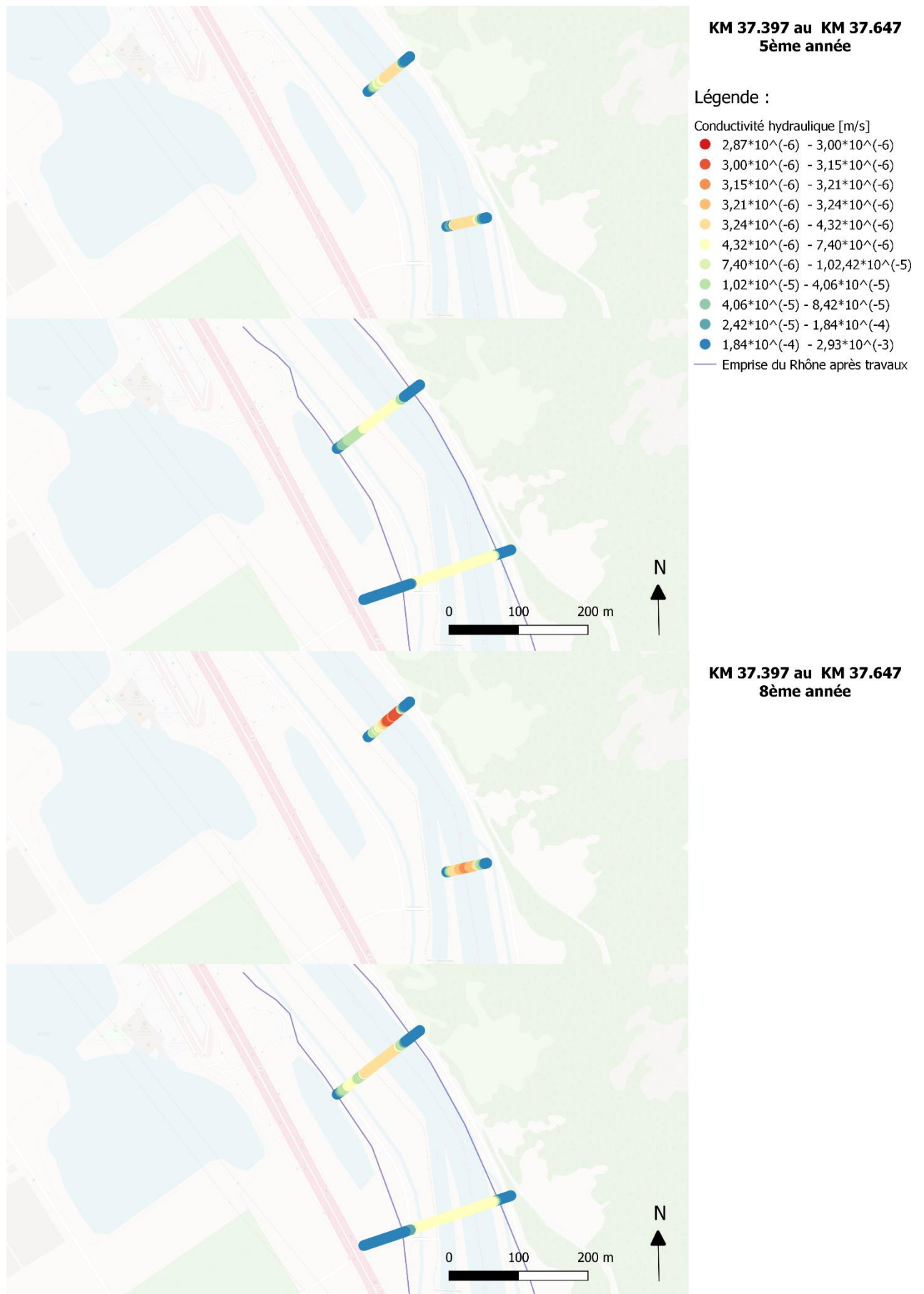


Figure 19 : Carte de la conductivité hydraulique du km 37.397 au km 37.647 à la 5ème et 8ème années

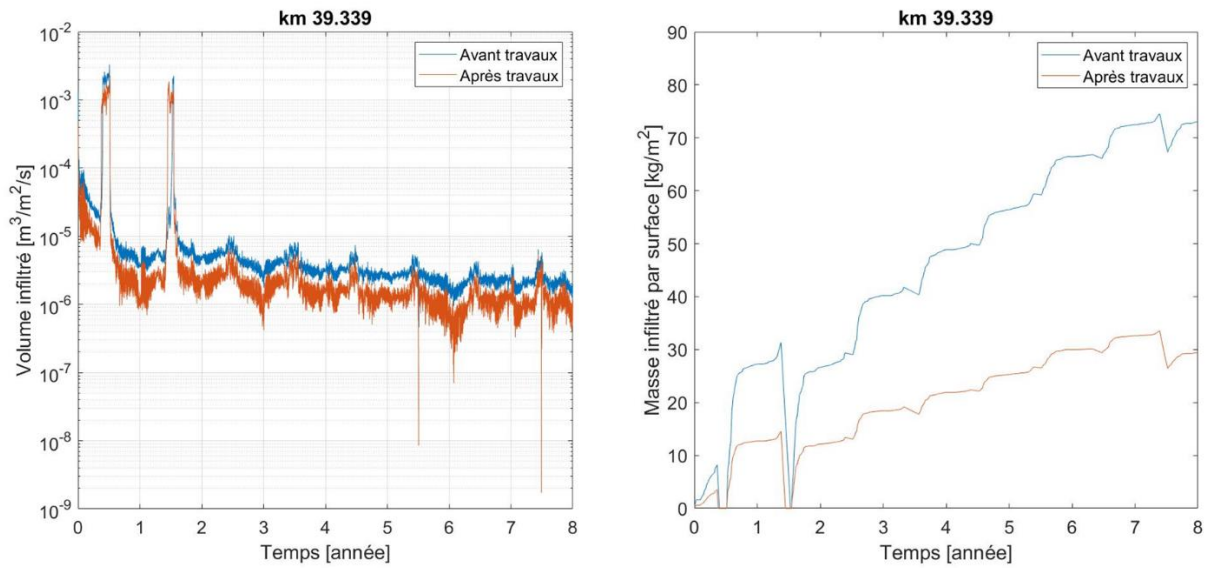


Figure 20 : Volume et masse infiltrés par surface au km 39.339

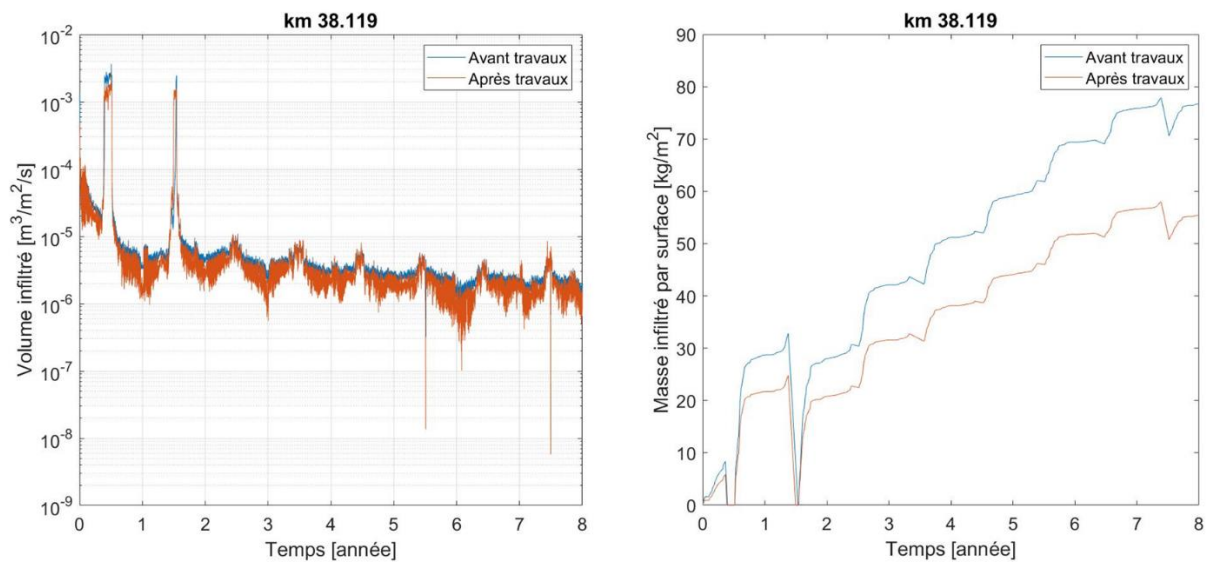


Figure 21 : Volume et masse infiltrés par surface au km 38.119

4. Discussion

Après les travaux de correction, la masse de sédiments infiltrée dans le lit est plus petite ce qui veut dire qu'il y a moins de pores obstrués par des grains. Il y a donc moins de résistance au passage de l'eau. Cela se confirme par l'augmentation de la conductivité hydraulique après les travaux. Il y a donc une réduction du colmatage. La conductivité reste dans un ordre de grandeur similaire ; il n'y a pas d'augmentation d'un facteur dix ou plus. Malgré un accroissement de la conductivité hydraulique, le volume infiltré par surface est plus petit. L'un des facteurs influençant cette diminution du colmatage est certainement l'abaissement de la ligne d'eau. Bien qu'il ait une plus grande conductivité hydraulique, la hauteur d'eau étant moins élevée, la différence de pression induisant l'infiltration l'est aussi.

La conductance est parfois plus importante au niveau de la rampe après la construction de cette dernière. Cette pente étant plus raide, les vitesses d'eau sont plus grandes. On peut le voir en

comparant les vitesses d'eau entre le profil du km 39.339 et celui du km 38.119 à l'annexe 2. On a une plus grande diminution des sédiments infiltrés par rapport à d'autres profils en aval. La vitesse semble donc impacter l'infiltration.

La conductance a une tendance descendante sauf en cas d'événement de crue. Sans décolmatage, la conductivité hydraulique diminuée d'un facteur 1000 en environ cinq ans. Ce processus peut demander plus de temps en cas de resuspension des sédiments. Le colmatage se forme sur une longue période.

Blaschke et al. (2003) suggère que le colmatage est un enchaînement de cycle débutant par une crue suivie par une stabilisation atteinte après quelques semaines. Ce cycle peut aussi être remarqué dans la figure 13. Selon nos résultats, après les deux premières crues, il faut moins d'une année pour que la conductivité hydraulique retourne à une valeur proche de celle avant l'événement. Alors que pour la crue se produisant la dixième année, il lui faut plusieurs années. Ces cycles mis en évidence par Blaschke et al. (2003) doivent avoir une durée différente selon l'intensité de la crue et la valeur de la conductivité hydraulique. Il est donc difficile d'estimer combien de temps il faut pour qu'un colmatage se mette en place.

Le volume total d'eau s'infiltrant sur l'entier du secteur de Martigny est plus grand après la troisième correction. Il y a par conséquent plus d'eau qui rejoint la nappe comme on peut le voir dans le tableau 3. Cependant, cette augmentation est faible par rapport à l'agrandissement de la surface d'échange. Cette dernière double, alors que le volume infiltré ne s'accroît que de 8%.

Le volume d'eau infiltré décroît avec l'augmentation de l'obstruction des pores du lit. À la fin des travaux quand le colmatage sera au plus bas, l'infiltration sera à son paroxysme. Après une année, le volume d'infiltration sur la section d'étude est de 345 l/s. Si on prend comme référence la valeur avant travaux à la fin de la huitième année, la quantité d'eau s'échappant à travers la nappe est plus grande. Il est difficile de définir si ce volume aura un impact majeur sur le niveau de la nappe. Il est majoritairement dû à une surface d'infiltration plus importante.

Glenz (2013) trouve dans son étude que le niveau de la nappe diminuera aux km 35-38.5. Il explique cela par le fait de l'abaissement du niveau du Rhône. Si ces prédictions sont justes, le surplus d'eau n'aura pas d'effet sur la hauteur de la nappe. L'augmentation du volume d'infiltration local paraît avoir plus d'impact qu'un accroissement global. Des aspects hydrogéologiques peuvent avoir un effet sur la répartition et sur le déplacement de l'eau dans le sol.

De nombreux processus interagissent dans le Rhône et ne sont pas étudiés dans la présente étude. Le résultat de cette étude met en évidence le colmatage induit par l'obstruction des pores par les sédiments. Le changement de la morphologie est un autre aspect omis. La déposition de sédiments et l'érosion du lit peuvent créer des bancs ou de l'affouillement qui provoquent des variations de vitesse d'eau sur la largeur et la longueur du cours d'eau (Hodge, Sear, & Leyland, 2013). De plus, à Martigny, la montagne se trouvant sur la rive droite du Rhône l'oblige à sinuer pour continuer sa route. Cette morphologie particulière engendre des vitesses différentes sur la largeur du cours d'eau. L'eau accélère sur l'extérieur du virage menant à une érosion plus importante et elle ralentit à l'intérieur tournant provoquant des zones de déposition plus importantes. Cela a possiblement un impact considérable. C'est peut-être la raison pour laquelle les résultats de Glenz (2013) indiquent de grandes variations de la conductivité dans le tronçon du coude de Martigny. C'est un point qu'il faudrait considérer dans de prochaines études.

Des erreurs dans les données ne sont pas à exclure. Même si les sources sont fiables, il est difficile de remarquer des erreurs si l'on n'a pas soi-même participé à la récolte de ces données. Les diamètres

des sédiments sont des paramètres essentiels dans les équations de Schälchli (1995). Cependant, s'ils sont mal déterminés, ils peuvent être source d'erreur. Le paramètre d_{10} requiert particulièrement une valeur fiable due à sa sensibilité. Cependant, cela nécessite de nombreux relevés de terrains pour définir précisément la granulométrie du lit. Il faudrait prendre des échantillons pas seulement sur les bancs, mais également au centre du lit et sur quelques dizaines de centimètres de profondeur.

Le fait de garder les mêmes données pour la température, les débits et la concentration des particules en suspension permet de voir l'impact de la morphologie sur la conductance du Rhône. Cependant, ces paramètres devraient changer lorsque le projet de la troisième correction sera achevé.

Les équations de décolmatage de Zhu et al. (2008) donnent des ordres de grandeur des masses de sédiments exfiltrées. C'est une estimation du décolmatage. De plus, les paramètres choisis n'ont pas pu être vérifiés dû aux manques de connaissances sur ce processus dans le Rhône. Le décolmatage est potentiel une source d'erreur dans la modélisation.

Les formules de Schälchli (1995) ont été développées en laboratoire. Il faudrait éventuellement les modifier en s'appuyant sur des relevés de terrain pour qu'elles s'adaptent mieux à l'environnement du Rhône. Cela demanderait une étude plus approfondie sur le terrain durant plusieurs années.

Cette modélisation du colmatage requiert encore d'être développée par de futures recherches. Elle donne cependant une idée de l'évolution du colmatage physique qui est un des processus clé dans le Rhône. Contrairement à l'approche utilisée par Gianni (2017) qui fait ressortir la tendance générale de colmatage d'une zone, les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence des différences le long du cours d'eau et de façon plus précise. Si un modèle hydrodynamique existant intégrait le colmatage dans sa modélisation, les zones du lit colmatées pourraient être définies précisément. Les modifications des interactions entre le cours d'eau et la nappe pourraient ainsi être connues.

5. Conclusion

La troisième correction du Rhône a pour but de protéger la plaine du Rhône contre les crues tout en revitalisant le fleuve. À Martigny, les changements majeurs apportés par ce projet sont la modification de la morphologie du lit par des élargissements et un approfondissement de lit. Ces modifications vont avoir un effet sur les échanges entre le Rhône et la nappe. Si le niveau des eaux souterraines augmentait trop, cela pourrait inonder des terrains ou des zones polluées. Un processus important influençant leur interaction est le colmatage. C'est un phénomène complexe qu'il est difficile à quantifier, mais essentiel pour mesurer l'exfiltration ou l'infiltration de l'eau. C'est pour cela que cette étude s'est plongé sur cette problématique.

Les résultats de la présente étude ont montré que le volume d'eau s'infiltrant dans le lit après les travaux devrait globalement augmenter, mais localement diminuer. Les élargissements du cours d'eau accroissent la surface d'échange. Malgré une conductivité hydraulique plus élevée, la quantité d'eau par surface rejoignant la nappe diminue. Cela est dû à l'abaissement de la hauteur d'eau.

Le colmatage est encore un domaine qui requière de la recherche. Cette modélisation est un point de départ sur la réflexion de l'intégration du colmatage dans des programmes de modélisation hydrodynamique. La nappe et le cours eau ont une interaction mutuelle. Il est donc essentiel que ces échanges et leur modification au cours du temps soient intégrés dans l'étude hydraulique et morphologique d'un cours d'eau.

Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus dans cette étude avec de futurs relevés du colmatage après travaux au coude du Rhône. Cela permettrait de valider les résultats ainsi que de

comprendre les faiblesses de cette approche. Une amélioration pourrait être envisagée en se basant sur des études effectuées après la troisième correction du Rhône.

6. Références

- Blaschke, A. P., Steiner, K. H., Schmalfuss, R., Gutknecht, D., & Sengschmitt, D. (2003). Clogging processes in hyporheic interstices of an impounded river, the Danube at Vienna, Austria. *International Review of Hydrobiology*, 88(3-4), 397-413. <https://doi.org/10.1002/iroh.200390034>
- Borchardt, D., & Statzner, B. (1990). Ecological impact of urban stormwater runoff studied in experimental flumes: Population loss by drift and availability of refugial space. *Aquatic Sciences*, 52(4), 299-314. <https://doi.org/10.1007/BF00879759>
- Brunke, M. (1999). Colmation and depth filtration within streambeds: Retention of particles in hyporheic interstices. *International Review of Hydrobiology*, 84(2), 99-117. <https://doi.org/10.1002/iroh.199900014>
- Bureau d'étude Impact SA. (2020). Procès-verbal de la séance sur le colmatage OCCR3. *Séance du 8 mars 2020*. Sion.
- Chappex, J. (1877). *Notice sur la correction du Rhone, 1864-1877*.
- Constantz, J., Su, G. W., & Hatch, C. (2006). Heat as a Ground-Water Tracer at the Russian River RBF Facility, Sonoma County, California. In *Riverbank filtration hydrology* (p. 243-258). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3938-6_11
- De Cesare, G. (2019). Présentation du modèle physique. *Cours : Hydraulique des cours d'eau*. PL-LCH, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- Diem, S., Poppei, J., & Ammann, L. (2015). Charakterisierung der flussinfiltration. *Aqua & gas*, 4, 42-52.
- Du, X., Fang, Y., Wang, Z., Hou, J., & Ye, X. (2014). The prediction methods for potential suspended solids clogging types during managed aquifer recharge. *Water (Switzerland)*, 6(4), 961-975. <https://doi.org/10.3390/w6040961>
- Fetzer, J., Holzner, M., Plötze, M., & Furrer, G. (2017). Clogging of an Alpine streambed by silt-sized particles – Insights from laboratory and field experiments. *Water Research*, 126, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.015>
- Findlay, S. (1995). Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystems: The hyporheic zone. *Limnology and Oceanography*, 40(1), 159-164. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.1.0159>
- Gianni, G. (2017). *Numerical simulations and uncertainty analysis for assessing spatial and temporal dynamics in alluvial river-aquifer systems : An application in the context of the 3 rd Rhône River Correction*.
- Gianni, G., Richon, J., Perrochet, P., Vogel, A., & Brunner, P. (2016). Rapid identification of transience in streambed conductance by inversion of floodwave responses. *Water Resources Research*, (52), 2647-2658. <https://doi.org/10.1002/2015WR017154>.Received
- Gibson, S., Abraham, D., Heath, R., & Schoellhamer, D. (2009). Vertical gradational variability of fines deposited in a gravel framework. *Sedimentology*, 56(3), 661-676. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00991.x>
- Glenz, D. (2013). *Inverse modelling of groundwater flow in the Rhone Alluvial Aquifer - Impact of the third Rhone correction*.
- Grabowski, R. C., Droppo, I. G., & Wharton, G. (2011). Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 101-120.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.008>

- Groupement Coude du Rhône, & Groupement STUCKY-BG. (2019). *Mp coude de martigny, 16 octobre 2019*.
- Gutiérrez, J. P., van Halem, D., Uijtewaal, W. S. J., del Risco, E., & Rietveld, L. C. (2018). Natural recovery of infiltration capacity in simulated bank filtration of highly turbid waters. *Water Research*, *147*, 299-310. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.009>
- Hall, F. R., & Moench, A. F. (1972). Application of the convolution equation to stream-aquifer relationships. *Water Resources Research*, *8*(2), 487-493. <https://doi.org/10.1029/WR008i002p00487>
- Han, G., Kwon, T. H., Lee, J. Y., & Jung, J. (2020). Fines migration and pore clogging induced by single- and two-phase fluid flows in porous media: From the perspectives of particle detachment and particle-level forces. *Geomechanics for Energy and the Environment*, *23*. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100131>
- Herzig, J. P., Leclerc, D. M., & Le Goff, P. L. (1970). Flow of Suspensions through Porous Media—Application to Deep Filtratio. *Industrial and Engineering Chemistry*, *62*(5), 8-35. <https://doi.org/10.1021/ie50725a003>
- Hodge, R. A., Sear, D. A., & Leyland, J. (2013). Spatial variations in surface sediment structure in riffle-pool sequences: A preliminary test of the Differential Sediment Entrainment Hypothesis (DSEH). *Earth Surface Processes and Landforms*, *38*(5), 449-465. <https://doi.org/10.1002/esp.3290>
- Hunzinger, L., Schälchli, U., Nitsche, M., Kirchhofer, A., Pfaundler, M., Rüesch, T., & Roulier, C. (2018). Régime de charriage – Mesures. In Département fédéral de l'environnement de l'énergie et de la communication DETEC (Éd.), *Office fédéral de l'environnement OFEV*.
- Huston, D. L., & Fox, J. F. (2015). Clogging of fine sediment within gravel substrates: Dimensional analysis and macroanalysis of experiments in hydraulic flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, *141*(8), 1-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001015](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001015)
- Lisle, T. E. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research*, *25*(10), 1303-1319. <https://doi.org/10.1029/WR025i010p02285>
- Masset, O. (2020). Etude des chroniques piézométriques des environs de Viège. *Université de Neuchâtel*.
- MATLAB. (2019). Version 9.7.0 (R2019b). *Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc*.
- Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, W. R., Krone, R. B., & Teeter, A. M. (1989). COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT. I: PROCESS DESCRIPTION. *Journal Hydraulic Engineer*, *115*(8), 1076-1093. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Migniot, C. (1989). Tassement et rhéologie des vases. Deuxième partie. *La Houille Blanche*, (2), 95-112. <https://doi.org/10.1051/lhb/1989006>
- Office fédéral de l'environnement OFEV. (2000). Données annuelle des débits pour l'année 2000. *Rhône - Brandson 2024*.
- Office fédéral de l'environnement OFEV. (2003). Données annuelle des débits pour l'année 2003. *Rhône - Brandson 2024*.
- Park, J., & Hunt, J. R. (2018). Modeling fine particle dynamics in gravel-bedded streams: Storage and re-suspension of fine particles. *Science of the Total Environment*, *634*, 1042-1053.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.034>

- Pasche, L. (2004). Travaux de correction des cours d'eau en Valais et dans la région de Conthey (1860-1900). *Vallesia*, 59, 225-246.
- Pholkern, K., Srisuk, K., Grischek, T., Soares, M., Schäfer, S., Archwichai, L., ... Wirojanagud, W. (2015). Riverbed clogging experiments at potential river bank filtration sites along the Ping River, Chiang Mai, Thailand. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 7699-7709. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4160-x>
- Przybytek, J., Dragon, K., & Kaczmarek, P. M. J. (2017). Hydrogeological investigations of river bed clogging at a river bank filtration site along the River Warta, Poland. *Geologos*, 23(3), 201-214. <https://doi.org/10.1515/logos-2017-0021>
- Rosas, J., Lopez, O., Missimer, T. M., Coulibaly, K. M., Dehwah, A. H. A., Sesler, K., ... Mantilla, D. (2014). Determination of hydraulic conductivity from grain-size distribution for different depositional environments. *Groundwater*, 52(3), 399-413. <https://doi.org/10.1111/gwat.12078>
- Sanford, L. P., & Maa, J. P. Y. (2001). A unified erosion formulation for fine sediments. *Marine Geology*, 179(1-2), 9-23. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00201-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00201-8)
- Schälchli, Ueli. (1992). The clogging of coarse gravel river beds by fine sediment. *Hydrobiologia*, 235-236(1), 189-197. <https://doi.org/10.1007/BF00026211>
- Schälchli, Ueli. (1995). Basic equations for siltation of riverbeds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 274-287. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:3\(274\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(274))
- Schälchli, Ueli, Abegg, J., & Hunziger, L. (2001). Fachbericht Trübung, Strömung, Geschiebetrieb und Kolmation. *Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer und Fischökologie: Trübung und Schwall Alpenrhein.*, p. 1-101. Consulté à l'adresse <https://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2024.html>
- Schälchli, Ulrich. (1993). Die Kolmatation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen. *Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.*
- Schleiss, A. (2015). Aménagements hydrauliques. *PL-LCH - Laboratoire de constructions hydrauliques. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.*
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *California Institute of Technology, Pasadena (Translate from German).*
- Sonnette, S. (2019). Corriger les correction. *Tracés*, 16-17(8), 12-13.
- Stocker, Z. S. J., & Williams, D. D. (1972). A freezing core method for describing the vertical distribution of sediments in a streambed. *Limonology and oceanography*, 17, 136-138.
- Tissères SA. (s. d.). *Notice hydrologique pour la mise en service de deux puits d'irrigation. Parcelles n°4303 et 4318-Ferme Saudan-Martigny (p. 3).* p. 3. Consulté à l'adresse <https://geocadast.crealp.ch/index.php?lang=FR&view=sondage&mode=rappor&id=18569>
- Valais, C. (2008). 4. Description générale du projet : la 3ème correction du Rhône. *Rapport de synthèse du plan d'aménagement.*
- Wharton, G., Mohajeri, S. H., & Righetti, M. (2017). The pernicious problem of streambed colmation: a multi-disciplinary reflection on the mechanisms, causes, impacts, and management challenges. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(5). <https://doi.org/10.1002/wat2.1231>

- Wooster, J. K., Dusterhoff, S. R., Cui, Y., Sklar, L. S., Dietrich, W. E., & Malko, M. (2008). Sediment supply and relative size distribution effects on fine sediment infiltration into immobile gravels. *Water Resources Research*, 44(3), 1-18. <https://doi.org/10.1029/2006WR005815>
- Zhu, Y. H., Lu, J. Y., Liao, H. Z., Wang, J. S., Fan, B. L., & Yao, S. M. (2008). Research on cohesive sediment erosion by flow: An overview. *Science in China, Series E: Technological Sciences*, 51(11), 2001-2012. <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0232-4>

7. Références des figures

Page de garde : Confédération Suisse. (26.11.2029). *Map.geoadmin*. <https://map.geo.admin.ch>

Figure 3 : BG Ingénieurs. (11.01.2021). *Communication personnelle par courrier électronique*

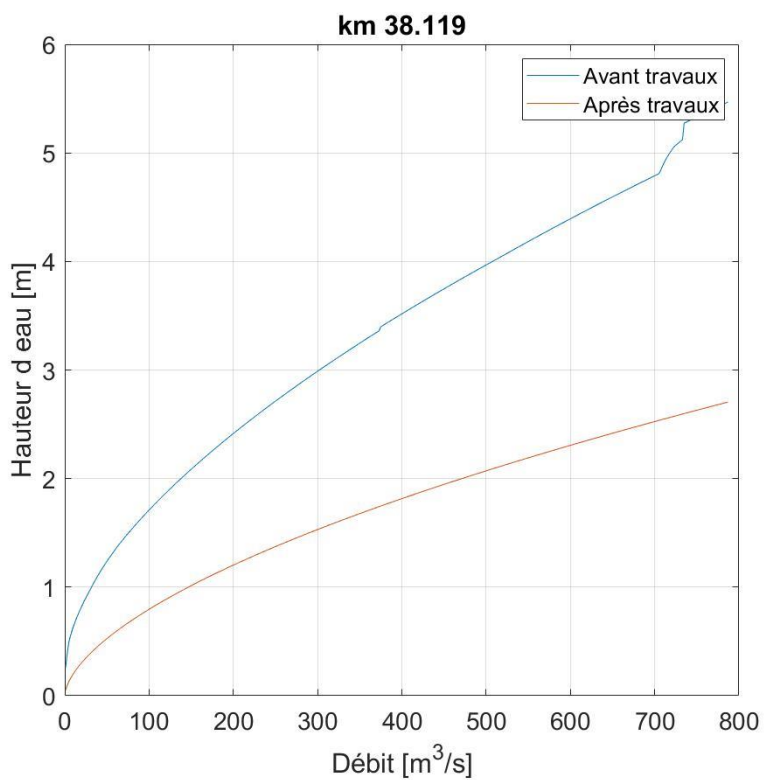
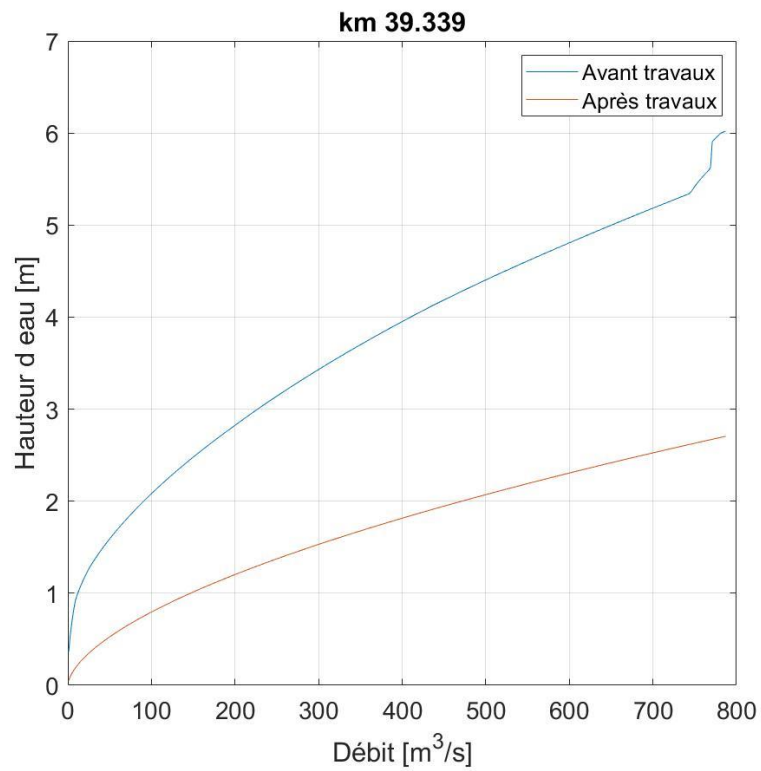
Figure 10 : Schälchli, Ueli, Abegg, J., & Hunziger, L. (2001). Fachbericht Trübung, Strömung, Geschiebetrieb und Kolmation. *Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer und Fischökologie: Trübung und Schwall Alpenrhein.*, p. 89. Consulté à l'adresse <https://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2024.htm>

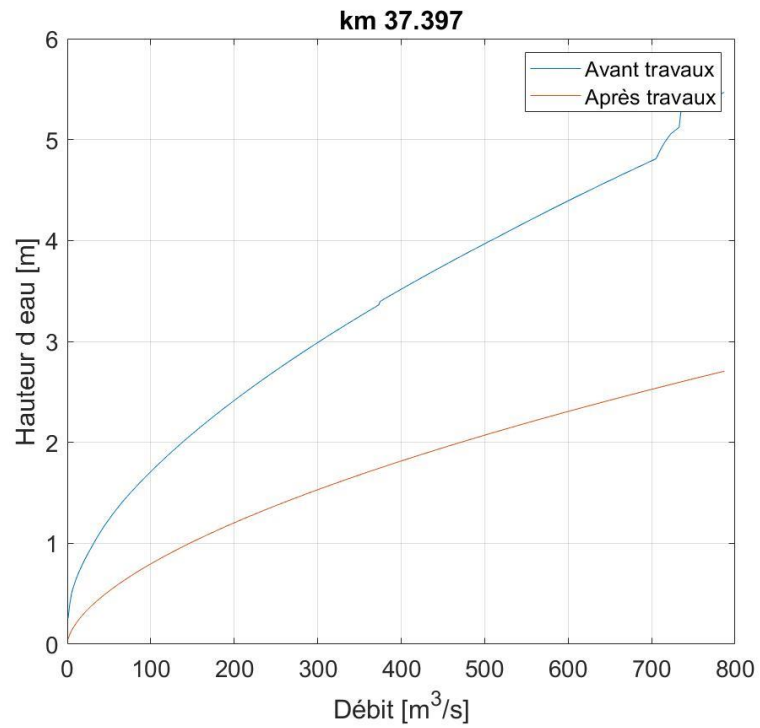
Réalisation des graphiques : MATLAB. (2019). Version 9.7.0 (R2019b). *Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc*

Réalisation des cartes : QGIS Development Team. (2018). *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. <http://qgis.osgeo.org3.4.11>

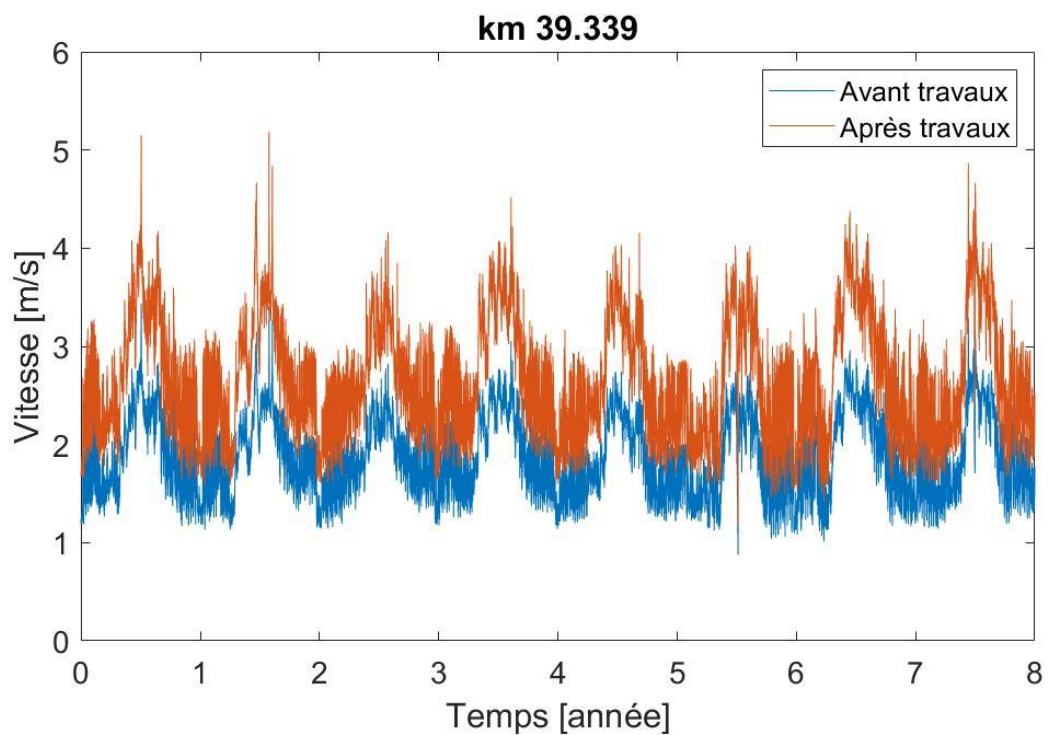
8. Annexes

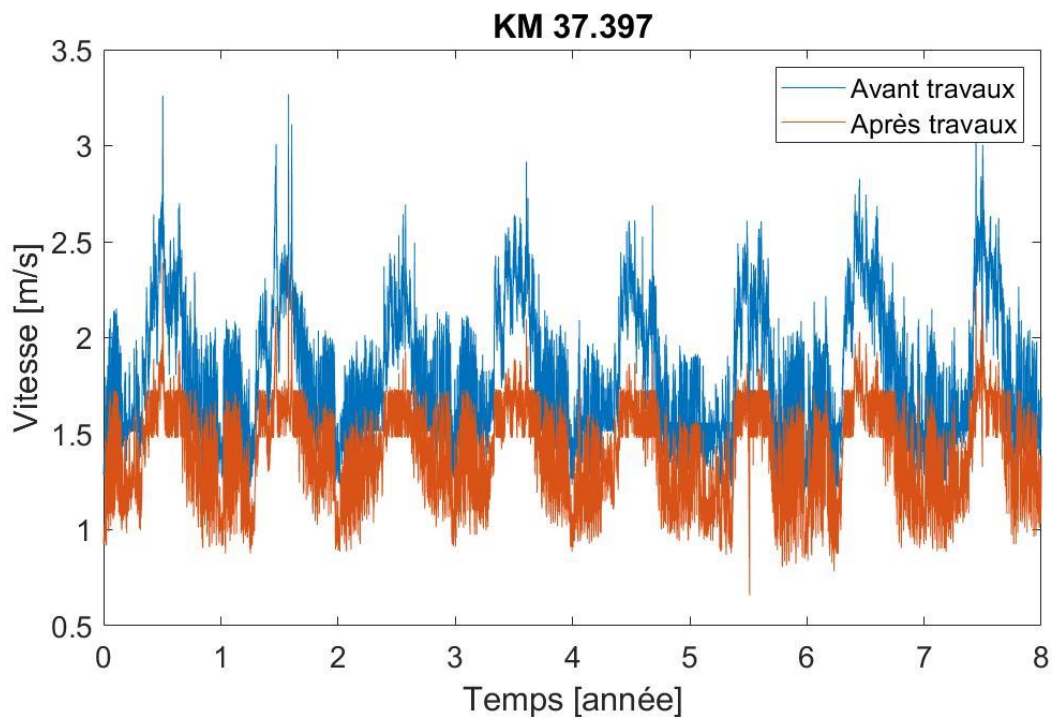
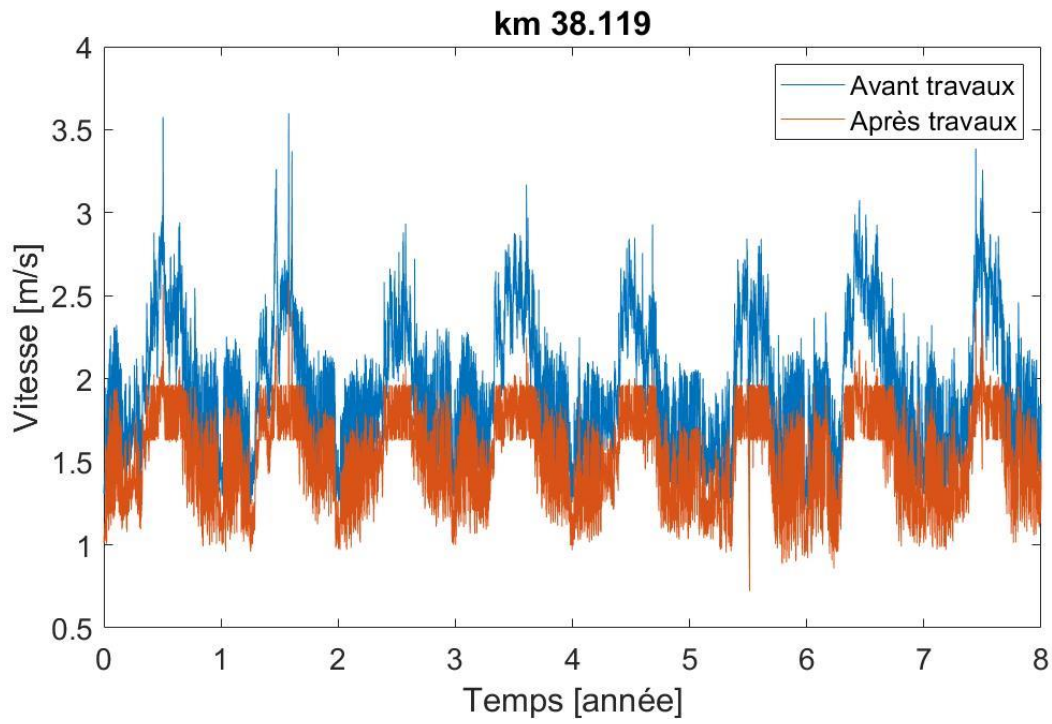
Annexe 1 : Courbe hauteur-débit pour les profils du km 39.339, du km 38.119 et du km 37.397 avant et après travaux



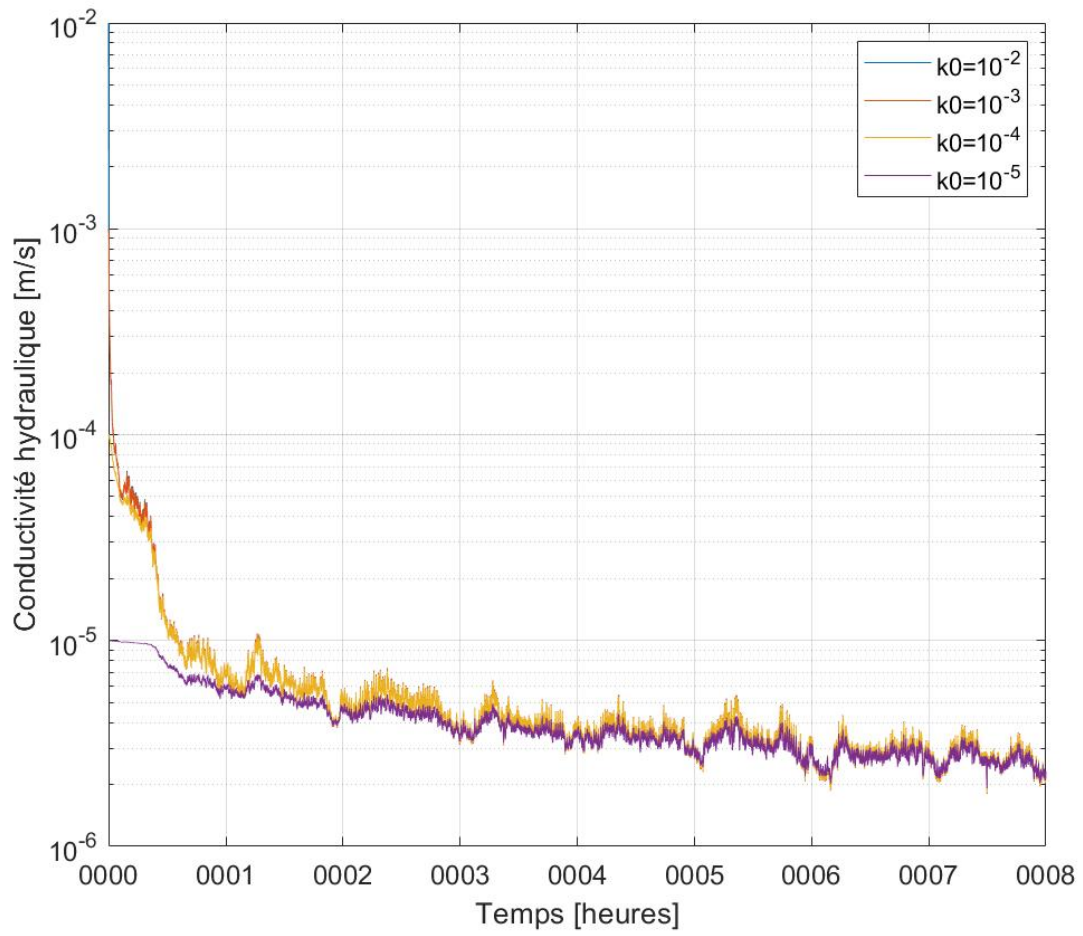


Annexe 2 : Courbe des vitesses d'eau pour les profils du km 39.339, du km 38.119 et du km 37.397 avant et après travaux

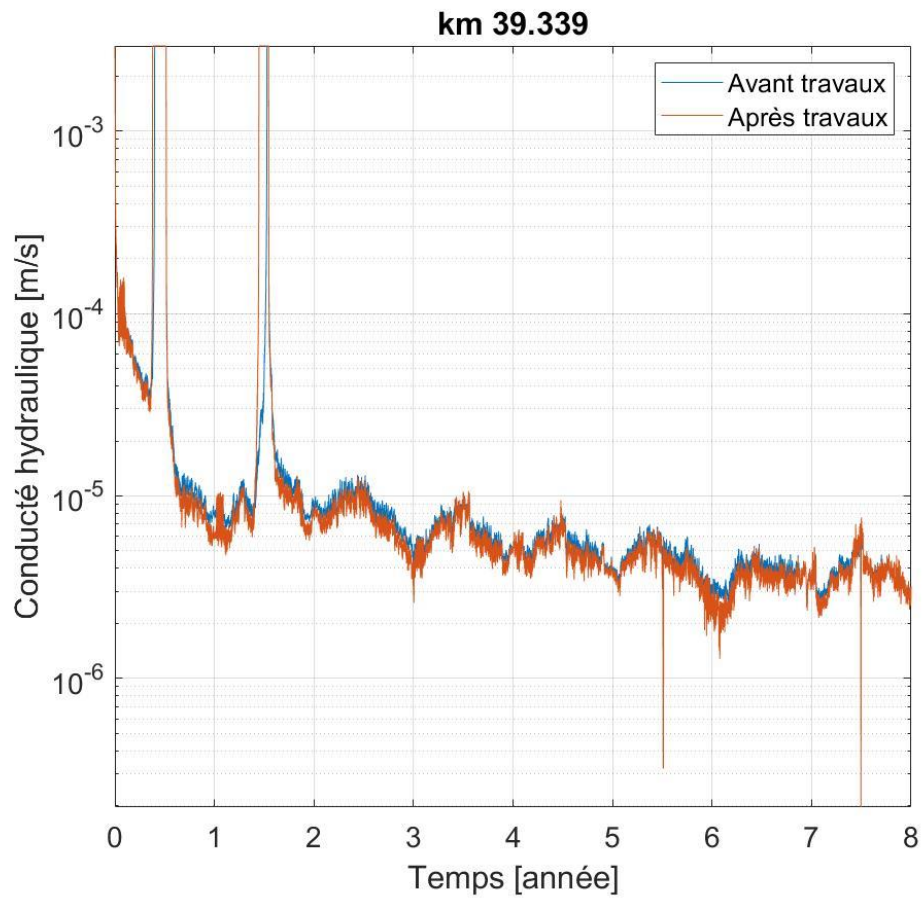


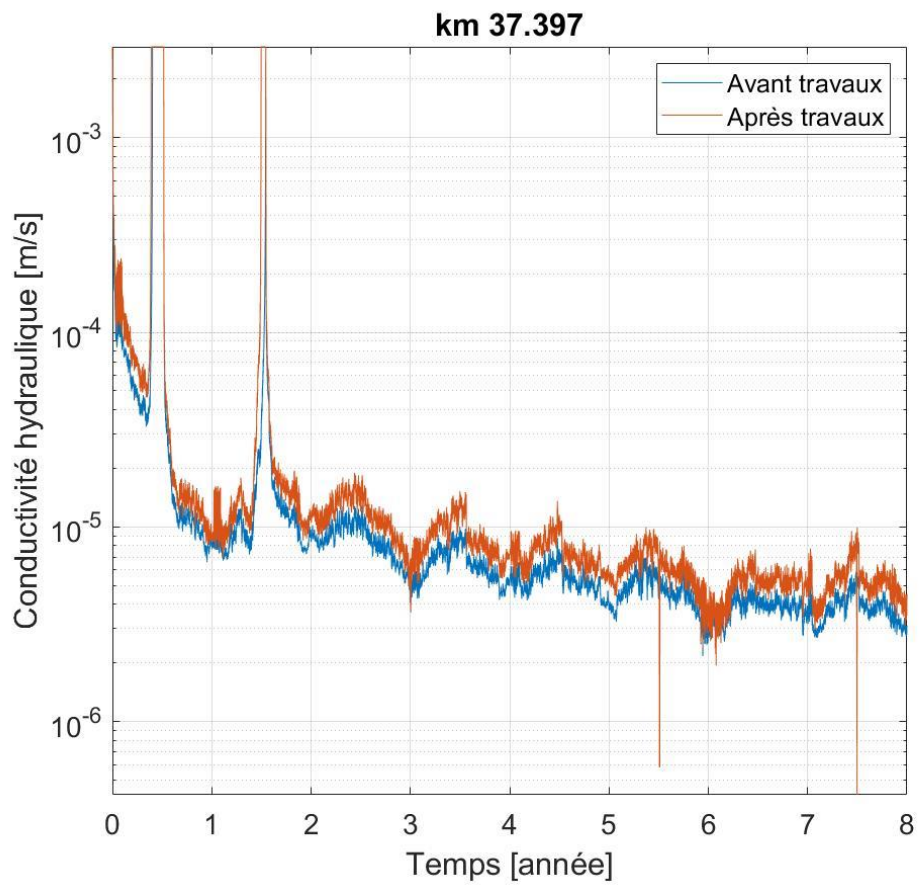
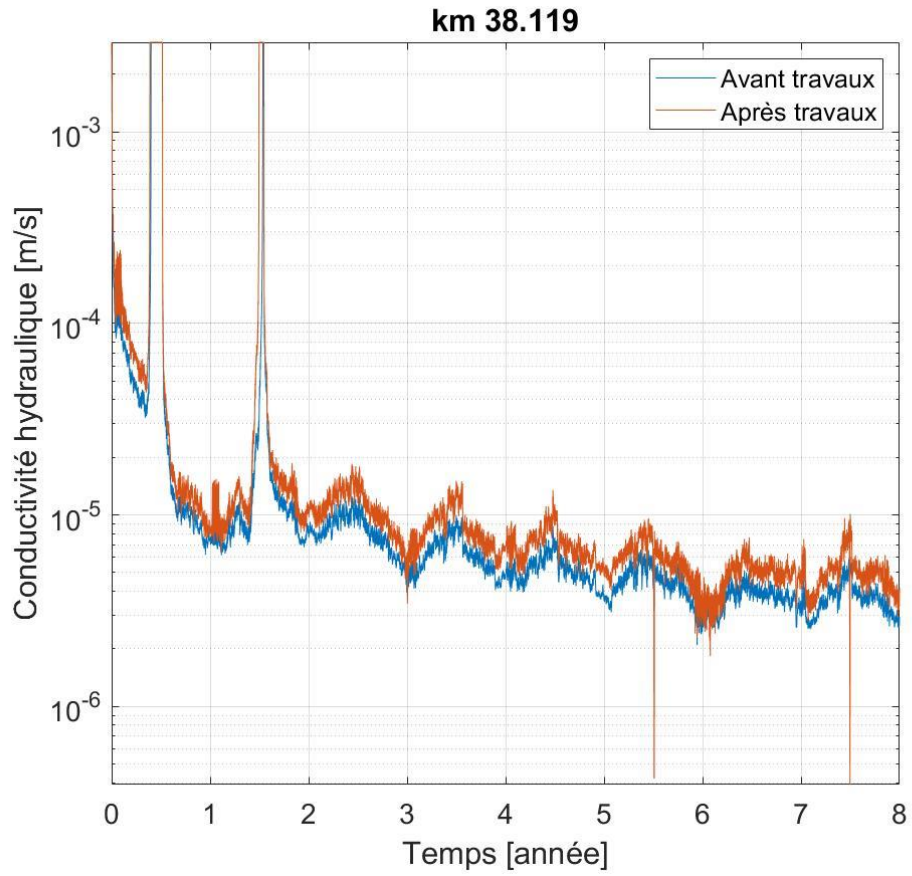


Annexe 3 : Impact de la variation de k_0 entre 10^{-3} et 10^{-5} m/s sur la conductivité hydraulique hydraulique

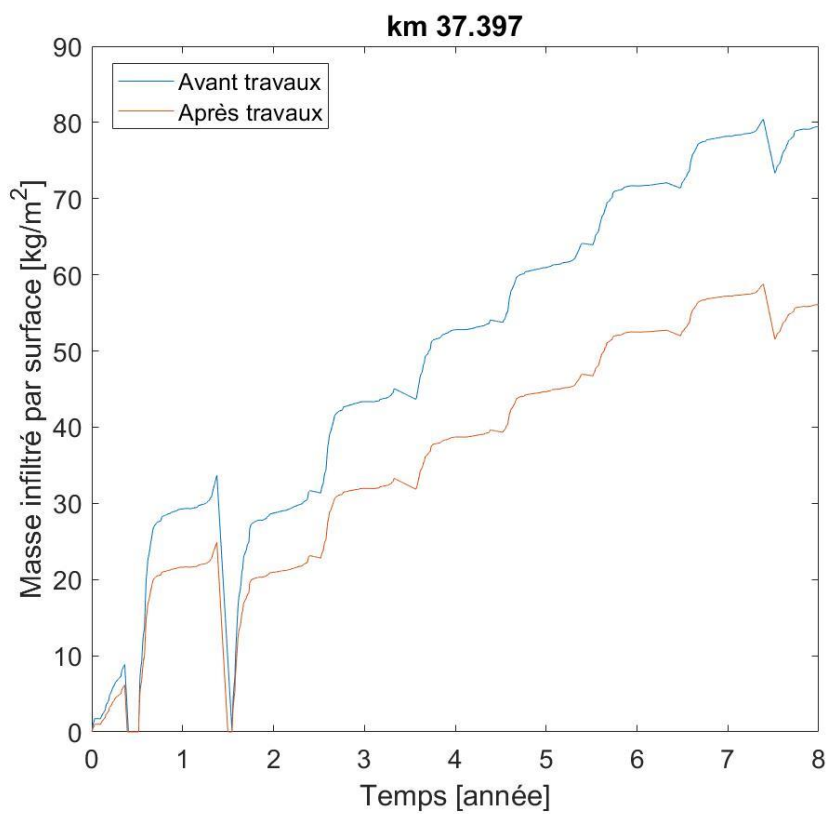
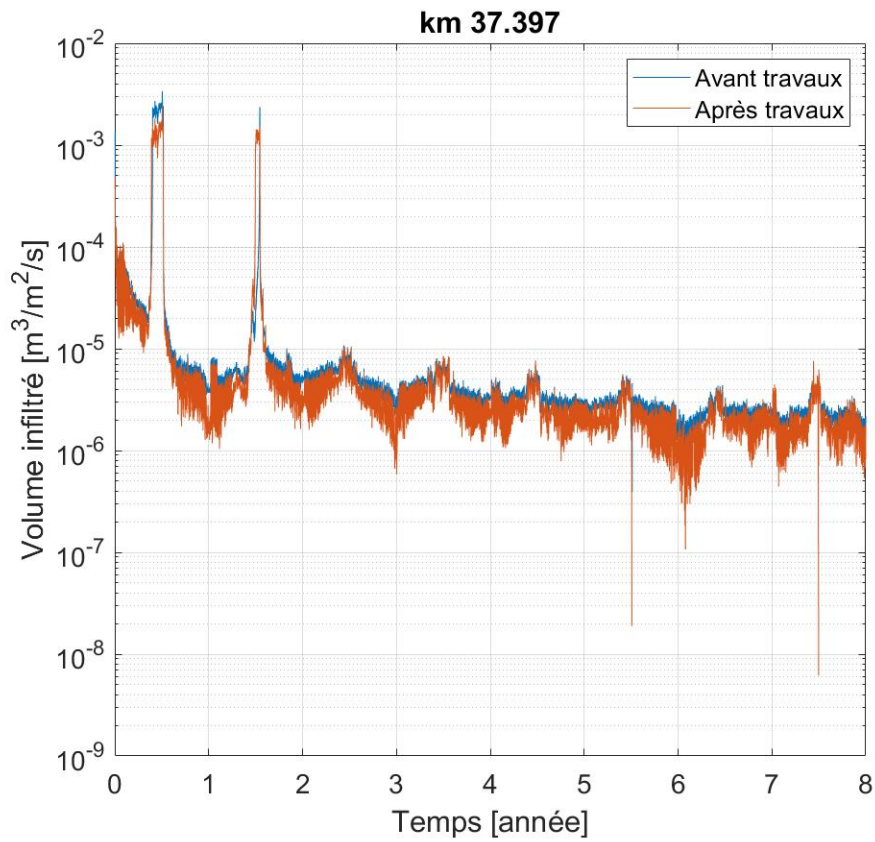


Annexe 4 : Conductivité hydraulique à la coordonnées la plus profonde du profil au km 39.339, au km 38.119 et au km 37.397 avant et après travaux





Annexe 5 : Volume d'eau et masse de sédiments infiltrés par surface au km 37.397 avant et après travaux



Annexe 6: Interview de Schälchli le 6 octobre par zoom

Amandine : What are the main clogging processes which have a major impact on Rhone river?

Schälchli : the main processes are the transport of fine sediments into the layers of the riverbed, the power stations which bring much water and much turbidity and the gravel transport of the river itself. He also mentioned that the actual state of the riverbed is important to know. From his point of view, the riverbed is quiet mobile and there may be several buried clogged layers. The riverbed composition should be known to calculate at which discharge the riverbed is mobile. The Valais canton may have information about the riverbed composition. Otherwise, samples can be taken from a boat or from a bridge which may not be possible due to the short period of my study. The samples must be big because otherwise the samples are too small and the results are not good. So the processes are on the mobilization of the riverbed and the transport of the gravel. This gives us information at which discharge the decolmation begins.

Amandine : Does a consolidated clogged bed need an higher shear stress to deolmate?

Schälchli : The clogging of the riverbed itself does not really rise the shear stress needed to mobilize. The main process is that the big stones lay down in a certain manner so they do not move fast. He suggested to look at old measurements of riverbed. It would inform if the level of the riverbed had varied and how much. We can know how it was before they built the power stations and it may give information about the presence of buried clogged layers. If there is a decolmatation , it would be at the top and the deeped down layers would still be clogged.

Amandine : As the concentration of fine particles is very high all the year, is the turbidity still a big impact in Rhone river?

Schälchli : That the turbidity is low in Winter without power station. The turbidity is high in Winter with power stations. When you go, in Winter, on Sunday, when the power stations are shut down, the water is more or less clear. If they are producing energy, there is an high turbidity from Monday till Friday.

Amandine : What are the other main parameters in the Rhone river?

Schälchli : an other very important parameter is the hydraulic gradient between the water level of the river and the water level of the groundwater. Of course, clogging can only happens when the water level of the river is higher that the water level of the groundwater. When you have infiltration from river to the groundwater, clogging can happen. And in the contrary, when the groundwater level is higher than the water level of the river, then there is exfiltration of groundwater; there is no clogging process.

Amandine: What are the main parameters which influence the interaction between the river and the groundwater?

It depends of the morphology. When there are sedimentation on the riverbed, we call it outer clogging. It's more located at only certain parts of the riverbed like at downstream or end of riverbed. When we have outer clogging then we have to look if it is only sand which is still quiet permeable or if it includes also finer materials, cohesive particles like silt or clay then we have very low permeability. During higher floods usually this deposit/outer clogging is flushed away again and it starts again afterwards. When the discharge goes down, it starts again. He thinks that the main process for the connection between river water and groundwater is the inner clogging and usually not the outer clogging.

Amandine : Is it possible to have a natural decolmatation?

Schälchli : It is another thing: What was the natural state? 3rd correction is not a natural state. A natural state may be even wider or more graded, and there are no power stations. And maybe there is an other gravel transport as now because a lot gravels is taking out of river Rhone, maybe also with 3rd correction. So the natural state is an other state to look at. When there are high floods usually the riverbed is mobilized. That not means that the permeability rises very high up because there are maybe these buried layers deeper down which we do not know. When there are banks, pools and riffles then usually they move during high floods. The banks are moving and the pools are getting deeper or less deeper depends on the wide and the discharge. And then this is quiet important how deep these pools can get. You can calculate how deep these pools get. And at the riverine, it depends on the width, they get 3 to 6-7 meters deep. So when we estimate, we have a scaver of 6 meters then we can be quiet sure than deeper clogging layers are flushed away. So when there is this high pronounce morphology with pools and banks and ripples then it is quiet sure that the permeability rises much compare with actual state because these deeper clogging layers are flushed away. We have a pool which moved early or which moved during high discharges during floods and we have high permeability. And other parts like ripples which maybe are stable for a few years or banks which are stable, we have a lower permeability. So with Rhone 3, you have not similar permeability on the all riverbed but you have patches or mosaic of different permeabilities. It's very different from the actual state.

Amandine : So the internal clogging does not have less impact than the external one?

Schälchli : External has low influence because now there is almost not external clogging because velocity is too high; the shear stress is too high. So the influence of outer clogging is not so big. The main influence is the inner clogging. But we never know the process of clogging happens in the top part of the riverbed maybe 30 cm and not deeper down usually. Deeper down you have maybe buried inner colmatation layers or not. That always the questions. If we have 3rd Rhone correction, he thinks there are almost no buried inner clogged layers anymore but now in the actual state, where there are no pools, no scars and those buried inner clogged layers.

He sent me his article : Schälchli, (199.) Basic equations for siltation of riverbeds. Journal of hydraulic engineering.

Annexe 7: Code MATLAB de la modélisation

```

%cordonnee des points, x depuis le bord [m], z [msm]
corr_x_z;
%hauteur max/min du profil
min_max_prof_h;
%dans la matrice ci-dessus les valeurs sont à la suite, cette matrice aide
%à trouver le début et la fin d'un profil
debut_fin_x
%% Debis [m3/s]
debit;

%température en °C [jour.mois annee temp]
csv_T_w;

%matrice du temps
time=linspace(0, 8, length(debit));

%temps total de la simulation
it_t=length(debit); %[h]

%% difference entre le niveau de la nappe et le Rhone
delta_hw=x_rhone-x_piez; %[m]

% La concentration [kg/m3]
C_m;

% masse volumique eau, conductivité dynamiques et cinétiques déjà calculé
% selon la température pour toute l itération
rhow_vdyn_vcin;

%gravitation
g=9.81; %m/s2

%prodondeur de colmatage
d10=0.001; %[m]
d60=0.12; %[m]
d50=0.0876; %[m]
dm=0.0997; %[m]
dw=10.519; %[mm] diamètre effectif
s=2.65; %[]

Af=1; % [m2] surface d infiltration
S; % la pente

n=0.486.*(d60./d10).^(-0.2); %[-] porosité
E=n./(1-n); %[-] ratio de vide

```

```

&k0
k0=0.0405/1.5.*E.^3.*dw.^2./(1+E)*10^(-1); %

%longueur d'infiltration de base pour calculer celle en fonction de la
%hauteur du point
L1=3;
%paramètre i
i=@(L,delta_hw) delta_hw/L; %[-]
%resistance
r=@(cis_ad,d10,dm,i, R) 1.2*10^12.*cis_ad.^0.5./((d10./dm).^3.5.*R.^1.5.*i.^0.67);

%Hauteur piézométrique [msm]
piez_H_R;
%hauteur du Rhône [msm]
niv_Rhone;

%% décolmatage
Q0=160;
%débit pour un décolmatage maximum
Qmax=950;

%indexe pour trouver la valeur des max et pic
min_pic_max_ind=load('min_pic_max_ind.txt');
%valeur des pics et des max
min_pic_max=load('min_pic_max.txt');
beta_dec=13; % compris entre 2 et 20
%masse infiltrée max
M_max=450; %[kg/m2/h]

%création de place fixe dans la mémoire
dv_dt=zeros(length(x_z(:,1)),it_t);
m_s=zeros(length(x_z(:,1)),it_t);
k_t=k0.*ones(length(x_z(:,1)),it_t);

%% itération (nombre de pas d'itération)
for it=2:it_t %[h]

%paramètres dépendant de la température de l'eau
%conductivité hydraulique
k=@(L,beta,r,m_s) g.*L./((rhow_vdyn_vcin(it,3)).*(r.*m_s+beta));
R=@(dm) sqrt(g*(s-1).*dm).*dm./rhow_vdyn_vcin(it,3); %[-] nombre de Raynolds
%volume d'eau infiltré par surface et par temps
V=@(r,m_s, beta) Af.*delta_P./((rhow_vdyn_vcin(it,2)).*(r.*m_s+beta)); %[m3/m2/s]

%localisation sur les profils du lit
for it_x=1:length(x_z)

```

```

%calcule la hauteur d'eau
h=x_rhone(it_x,it)-x_z(it_x); %[m]
%calcule delta hw (la différence entre la hauteur de la nappe et le Rhône)
delta_hw=x_rhone(it_x,it)-x_piez(it_x,it);
%calcule delta P
delta_P=delta_hw*g*rhow_vdyn_vcin(1,1);

%L est proportionnelle la hauteur du point par rapport au point le plus bas dans
%le profil
L=L1/(min_max_prof_h(it_x,2)-min_max_prof_h(it_x,1))*(min_max_prof_h(it_x,2)-x_z(it_x))+0.4;

%beta
beta=L*g/(k0*rhow_vdyn_vcin(it,3));

%concentration particules en suspension [kg/m3]
C=C_m(it)

%cusaillement adimensionnel
cis_ad=@(dm) h*S(it_x)/((s-1)*dm);

if x_rhone(it_x,it)>=x_z(it_x) && x_rhone(it_x,it)>x_piez(it_x,it) %regarde si le lit est immergée en ce
point

    % regarde s il a du décolmatage
    if min_pic_max_ind(it,1)==0 || min_pic_max_ind(it,1)==2

%delta_v
V=@(r,m_s, beta) Af.*delta_P./(rhow_vdyn_vcin(1,2).*(r.*m_s+beta)); %[m3/m2/s]
%dV/dT
dv_dt(it_x,it)=V(r(cis_ad(dm),d10,dm,i(L,delta_hw), R(dm)),m_s(it_x,it-1),beta);
%masse infiltré
m_s(it_x,it)=m_s(it_x,it-1)+dv_dt(it_x,it)*C/Af*3600;
%conductivité électrique
k_t(it_x,it)=k(L,beta,r(cis_ad(dm),d10,dm,i(L,delta_hw), R(dm)),m_s(it_x,it));

% décolmatage
elseif min_pic_max_ind(it,1)==1

m_max(it_x,it)=(x_rhone(it_x,min_pic_max(min_pic_max_ind(it,2),4))-
x_z(it_x))/(x_rhone(it_x,min_pic_max(min_pic_max_ind(it,2),4))-
min_max_prof_h(it_x,1))*M_max/(min_pic_max(min_pic_max_ind(it,2),2)-
min_pic_max(min_pic_max_ind(it,2),1))*exp(-beta_dec*(1-
debit(min_pic_max(min_pic_max_ind(it,2),4))/Qmax));
m_s(it_x,it)=m_s(it_x,it-1)-m_max(it_x,it);

%pour ne pas avoir de masse négative
if m_s(it_x,it)<0

```



```
    m_s(it_x,it)=0;
end

    dv_dt(it_x,it)=V(r(cis_ad(dm),d10,dm,i(L,delta_hw), R(dm)),m_s(it_x,it-1),beta);
    k_t(it_x,it)=k(L,beta,r(cis_ad(dm),d10,dm,i(L,delta_hw), R(dm)),m_s(it_x,it));

end
else

% si lit n'est pas immergé
    k_t(it_x,it)=k_t(it_x,it-1);
    m_s(it_x,it)=m_s(it_x,it-1);
end
end
end
```