



HAL
open science

Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon

Alyssa Serlet, Michal Tal

► **To cite this version:**

Alyssa Serlet, Michal Tal. Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon. [Rapport de recherche] Aix-Marseille Université. 2021. hal-03293550v1

HAL Id: hal-03293550

<https://hal.science/hal-03293550v1>

Submitted on 21 Jul 2021 (v1), last revised 12 Aug 2022 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
Sédiments
du Rhône

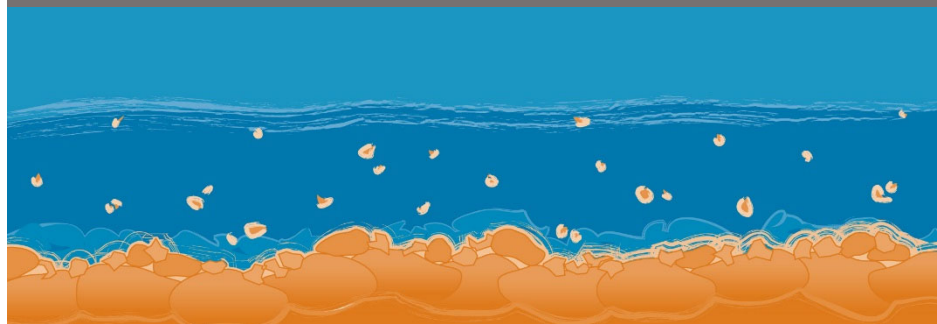
Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon

OSR5 2018-2020

Rapport final



Plan ~
Rhône



Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon

Rapport final – Version du 15 juin 2021

Axe A	Redynamisation des marges alluviales : faisabilité, risques, opportunités
Action A.2	Charge de fond et redynamisation du chenal
Sous-Action A.2.3	Estimation du volume et de la granulométrie des sédiments grossiers transportés pour différents débits – approche fine au sein des RCC en voie de redynamisation
Axe C	Approfondissement des connaissances pour établir le diagnostic de l'état fonctionnel du Rhône
Action C4	Morphodynamique du chenal
Sous-Action C4.2	Modélisation de l'évolution morphodynamique du lit

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Alyssa SERLET Michal TAL	Aix-Marseille Université - CEREGE UMR 7330

Pour citer ce document :

Serlet A., Tal M. (2021). *Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon*. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions, 56 p.

Résumé

Le lit actuel du Rhône est le résultat des effets cumulés de multiples phases de modifications anthropiques depuis la fin du 19^e siècle : chenalisation, barrages de dérivation pour l'hydroélectricité et extractions des sédiments. Des réinjections de sédiments sont actuellement en cours sur plusieurs tronçons afin de restaurer la biodiversité de ce système fortement modifié. Le but de cette étude était de construire et de valider un modèle morphodynamique 1D d'un tronçon du Rhône. Nos objectifs étaient doubles : 1. mener une étude quantitative de l'évolution morphologique du Rhône en réponse à son histoire de gestion, et 2. obtenir un modèle robuste qui reproduit la morphodynamique actuelle du canal et peut être utilisé pour simuler des scénarios de restauration. Nous avons utilisé le logiciel Basement (<https://basement.ethz.ch/>) pour construire notre modèle 1D.

Notre étude s'est concentrée sur le tronçon du Péage de Roussillon (PDR) situé à environ 50 km en aval de Lyon. Ce tronçon est compris entre le barrage de Saint-Pierre-de-Boeuf en amont (en service depuis

1977) et le barrage d'Arras en aval (en service depuis 1971). Le tronçon a une longueur de 30 km subdivisée en 12 km de Rhône court-circuité (RCC) et 18 km de Rhône total (RT). Un seuil a été installé dans le RCC (PK 60.5) entre 1978-1979 afin de maintenir un niveau d'eau fixe pour les résidents locaux. Dans le tronçon PDR, il n'y a pas eu d'exploitation significative des sédiments, mais un dragage important a été effectué en aval de la confluence pour augmenter la chute verticale de l'eau afin d'améliorer la production d'énergie hydroélectrique dans le canal ("dragage énergétique").

Nous avons construit et validé le modèle à l'aide d'un vaste ensemble de données disponibles dans l'OSR, qui comprend la bathymétrie historique et actuelle, les distributions granulométriques (GSD), les courbes de durée d'écoulement, les sorties du modèle hydraulique 1D d'un modèle existant (Mage) développé par l'INRAE, ainsi que les emplacements et les volumes de dragage (rapport CNR). Nos simulations étaient basées sur des sections transversales rectangulaires, des largeurs moyennes et une pente constante. Afin de simuler le tronçon depuis le début des travaux de gestion à la fin du 19e siècle, nous avons utilisé une approche combinée de méthodes analytiques et de modélisation pour estimer les données historiques manquantes sur la composition du lit, l'apport de sédiments et le flux de sédiments. Les périodes post-endiguement, post-barrage et actuelle ont été simulées séparément. Chaque période a été validée avec toutes les données disponibles pour cette période et les périodes suivantes ont été simulées sur la base des résultats de la période qui la précède.

Nos résultats pour le tronçon PDR n'ont montré aucune modification de la pente en réponse au rétrécissement associé aux endiguements et aucun changement dans les distributions granulométriques de surface ou de subsurface. Un rapport de pavage estimé à 1,7 à la fin de la période post-endiguement est en bon accord avec les rapports de pavage mobiles des rivières à lit de gravier naturel. Les résultats n'ont pas montré de changements significatifs dans l'élévation du lit ou dans la distribution granulométrique de surface ou de subsurface en réponse à la régulation du débit et au dragage dans la période post-barrage. Les simulations du chenal actuel montrent que le lit est stable avec des taux de transport de la charge de fond extrêmement faibles qui sont conditionnés par les structures hydrauliques et le dragage.

Nous avons réalisé une série de simulations afin d'étudier l'évolution et les impacts des réinjections de sédiments dans le tronçon de PDR 50 ans après la réinjection. Les résultats montrent un déplacement lent des sédiments dans les deux premiers kilomètres en aval du point de réinjection et un léger affinement du GSD de surface. Ils mettent également en évidence la sensibilité de la réponse au volume de réinjection, à l'apport de sédiments et à la GSD des matériaux réinjectés. Les déplacements mesurés par la surveillance RFID étaient du même ordre que les distances sur lesquelles les changements d'élévation du lit se sont produits dans les simulations numériques.

Cette étude décrit un protocole d'estimation des variables nécessaires à la réalisation de simulations numériques de l'évolution historique du Rhône et souligne l'utilité d'un modèle morphodynamique 1D pour comprendre la dynamique hydraulique et sédimentaire actuelle et prédire la réponse du chenal à des scénarios de restauration.

Mots-clés

OSR ; Rhône ; Modélisation morphodynamique ; évolution du lit ; transport par charriage ; Péage de Roussillon

1. INTRODUCTION	5
1.1. Vue d'ensemble et objectifs	5
1.2. Résumé des travaux antérieurs et des connaissances actuelles	5
1.3. Motivation et justification d'un modèle morphodynamique	6
2. DEFINITIONS	8
3. PORTEE DE L'ETUDE	9
4. METHODOLOGIE	10
4.1. Basement	10
4.2. Configuration du modèle	10
4.2.1. Conditions initiales	10
4.2.2. Conditions aux limites	11
4.2.3. Données de sortie	11
4.2.4. Couches	11
4.2.5. Formule de transport du chargement	12
4.3. Données disponible	13
4.3.1. Hydraulique et courbes de durée d'écoulement	13
4.3.2. Distributions granulométriques	14
4.3.3. Géométrie du chenal	15
4.4. Analyse historique et approche de modélisation	16
4.4.1. Estimation de la composition historique du lit, de l'apport de sédiments et du flux de sédiments	17
4.5. Paramètres du modèle et résumé des simulations	18
5. RESULTATS ET DISCUSSION	19
5.1. Période Pré-endiguement (chenal d'équilibre)	19
5.2. Période post-endiguements	22
5.3. Période post- barrage	24
5.4. Taux de transport actuels par fraction granulometrique	32
5.5. Réinjection de sédiments	36
6. ANALYSE DE SENSIBILITE	46
6.1. Formule de transport de la charge de lit	46
6.2. Coefficients de friction	47
6.3. Largeur avant endiguements et après endiguements	48

6.4. Estimations des valeurs historiques à partir de la sub-surface des bancs	49
6.5. Profondeur de la couche active	51
7. LIMITES ET INCERTITUDES	52
8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	53
9. REFERENCES	54

1. INTRODUCTION

1.1. Vue d'ensemble et objectifs

Ce rapport résume le travail effectué pour construire et valider pour la première fois un modèle morphodynamique 1D pour le fleuve Rhône. Les objectifs de ce travail étaient les suivants:

- a) Établir une compréhension quantitative plus précise de l'évolution historique du fleuve Rhône et des effets relatifs des différents travaux de gestion qui ont été réalisés depuis la fin du 19^{ème} siècle.
- b) Estimer le volume et la distribution granulométrique de la charge transportée à différents débits dans les conditions actuelles.
- c) Fournir un outil aux gestionnaires des rivières pour prévoir les effets des changements futurs, tant naturels qu'anthropiques, sur le débit et l'apport de sédiments.

Le travail réalisé a été effectué pour le tronçon du Péage de Roussillon (PDR) - un des 5 tronçons clés identifiés en collaboration avec les partenaires OSR (en plus de Chautagne, Miribel, Pierre-Bénite, Baix-le-Logis-Neuf et Donzère-Mondragon) en raison de la restauration en cours ou prévue. Le PDR a été sélectionné en raison de la disponibilité de données hydrauliques validées (modèle MAGE) ainsi que de données préliminaires de traçage. Le protocole développé dans ce travail devrait servir de base à la modélisation de futurs tronçons.

Malgré la richesse des données actuelles disponibles pour le Rhône, les données historiques sont limitées. Les données disponibles sur la composition du lit sont minimales (IRS, 2000) et il n'existe aucune mesure de l'apport ou du flux de sédiments. Ainsi, une partie importante de ce travail a été consacrée à l'estimation de ces variables et à la reconstitution de l'évolution historique. Des simulations de réinjections de gravier ont été réalisées sur le lit actuel modélisé afin de prédire leur évolution et leurs impacts. Les résultats ont été comparés aux suivis par traceurs (RFID) réalisés en lien avec une réinjection de gravier en 2017 ainsi qu'aux résultats d'un modèle analytique de transport proposé par Vazquez-Tarrio (action A2.4, OSR5). Ces comparaisons ont pour but de servir de validation du modèle et d'identifier les problèmes dans ses capacités de prédiction.

Ce travail s'appuie sur des données et des travaux antérieurs réalisés dans le cadre de l'OSR (Parrot, 2015 ; rapport OSR I.4, 2017). En particulier, les profils en long historiques et les distributions granulométriques (DG) provenant d'échantillons collectés sur toute la longueur du Rhône et de la surface et de la sub-surface des bancs (Parrot, 2015). Il utilise également les sorties du modèle hydraulique 1D MAGE (INRAE) et les courbes de durée d'écoulement compilées par Vazquez-Tarrio (rapport OSR4 I.4, 2017). Ces travaux complètent directement d'autres actions menées dans le cadre de l'OSR5 (en particulier les actions A2.2 et A2.4). Des références aux travaux antérieurs et en cours sont incluses tout au long de ce rapport.

1.2. Résumé des travaux antérieurs et des connaissances actuelles

Le Rhône actuel (élévation du lit, répartition granulométrique, capacités de transport) est la somme complexe des effets de multiples phases de modifications humaines. Les endiguements (rétrécissement du chenal) sur le Rhône ont commencé à la fin du 19^e siècle. Nous appelons ici la période des années qui ont suivi leur construction la période post-endiguements. Cette période a été

suivie par la construction de barrages, l'extraction des sédiments et le dragage à partir du milieu du 20e siècle. L'extraction des sédiments consiste à extraire des sables et des graviers en tant que ressource et a été réalisée à grande échelle le long du Rhône des années 1950 aux années 1980 (Cœur, 2017 ; Petit et al., 1996), pour prendre fin officiellement en 2010. Le dragage est généralement effectué à des fins de gestion, par exemple pour réduire le risque d'inondation, maintenir une profondeur minimale pour la navigation. Nous désignons ici la période suivant la construction du barrage et durant laquelle le dragage et l'extraction minière ont été effectués comme la période post-barrage (l'année exacte du début de cette période dépend du barrage et varie donc entre les tronçons).

En raison des impacts simultanés et probablement superposés de ces modifications, notre compréhension des effets spécifiques de chaque phase sur la morphologie du chenal est imprécise. Sur la base de quelques études qualitatives et semi-quantitatives (Dépret et al., 2017 ; IRS, 2000 ; Provansal et al., 2014) ainsi que de la mémoire collective des gestionnaires de cours d'eau, la compréhension générale est que le rétrécissement du chenal dû aux endiguements a conduit à une incision qui a entraîné une augmentation de la granulométrie du lit (pavage) et une réduction des capacités de transport. Les barrages de dérivation qui ont suivi ont encore réduit la compétence en matière de débit en raison de la réduction de la fréquence des crues et de la pente hydraulique (retenue). Une première tentative d'estimation des capacités de transport passées et actuelles dans l'OSR4 a confirmé que les estimations de transport pour le lit actuel sont effectivement plus faibles par rapport à un lit plus fin (en utilisant le DG des bancs comme indicateur d'un lit pré-pavage), et que les taux de transport pour les écoulements non entravés étaient également plus élevés (rapport OSR4 I.4, 2017 ; Vázquez-Tarrío et al., 2019). Ces travaux ont également mis en évidence l'évolution non uniforme des différents tronçons et suggéré que les tronçons ont évolué différemment en réponse aux effets relatifs de la réduction des capacités de transport et des apports de sédiments. Diverses questions sont restées sans réponse, comme celle de savoir si les barrages ont entraîné un nouveau grossissement du lit, si la rivière était en équilibre ou encore en train de s'ajuster à la fin / au début de chaque phase, et si la rivière est en équilibre aujourd'hui.

1.3. Motivation et justification d'un modèle morphodynamique

Les rivières évoluent grâce à des rétroactions complexes mais fondamentales entre le débit (hydraulique), le transport des sédiments et la forme appelée *morphodynamique* (par exemple, Church et Ferguson, 2015). Les études morphodynamiques des rivières, dans lesquelles l'hydraulique, le transport et l'évolution du lit qui en résulte évoluent conjointement, deviennent rapidement la norme dans les études sur les rivières et ont transformé notre capacité à prédire l'évolution des rivières. Pour prédire l'érosion et le dépôt dans le lit d'une rivière, il faut comprendre comment les vitesses et les profondeurs locales de l'eau (qui contrôlent la contrainte de cisaillement locale, la force par unité de surface exercée par l'écoulement sur le lit et les berges de la rivière) dépendent de la topographie locale et de la géométrie du lit, et comment l'érosion, le transport et le dépôt de sédiments fluviaux modifient la topographie locale pendant les crues. Les mesures fournissent des informations sur les capacités de transport et l'évolution du lit en temps réel, tandis que les modèles nous permettent d'étudier l'évolution du chenal en réponse à leurs interactions combinées sur des échelles de temps décennales. En comparant les prédictions des modèles avec les mesures, les modèles peuvent être améliorés et leurs capacités de prédiction rendues plus robustes.

Les équations qui régissent les modèles morphodynamiques sont les équations standard d'écoulement en eau peu profonde dans un chenal ouvert (conservation de la masse et du momentum), et une

équation d'Exner spécifique à la taille des grains pour la conservation des sédiments, c'est-à-dire une équation qui exprime la conservation des sédiments pour des tailles de grains caractéristiques. Ces équations sont combinées avec un prédicteur spécifique à la taille des grains pour le transport des sédiments afin d'estimer les flux de sédiments dans le sens du courant (Figure 1). Des formulations mathématiques unidimensionnelles ont été mises en œuvre dans des modèles numériques pour décrire quantitativement l'évolution morphodynamique des rivières alluviales et pour prédire les effets des changements du régime d'écoulement, de l'apport de sédiments et du niveau de base (Nelson et al., 2009; Robinson and Slingerland, 1998) et ont été appliqués avec succès à des études sur le finage en aval (Wright et Parker 2005 a et b), l'augmentation des sédiments (Viparelli et al., 2011), les transitions gravier-sable (Cui and Parker, 1998), et l'armature (Parker and Sutherland, 1990). Les échelles spatiales de ces modèles varient de plusieurs kilomètres à des centaines de kilomètres et les échelles de temps varient de plusieurs décennies à des échelles de temps géologiques.

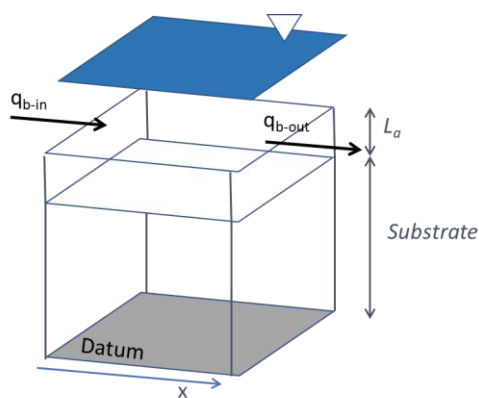


Figure 1 Schéma de la couche de surface et du substrat. La est l'épaisseur de la couche de surface, le substrat désigne une couche de dépôt sous la couche de surface, $q_b\text{-in}$ et $q_b\text{-out}$ sont respectivement les transports de la charge de fond qui entre et sort du volume de contrôle représenté. La surface bleue représente la surface de l'eau.

Les modèles morphodynamiques 1D sont validés avec des profils longs 1D du lit de la rivière et des distributions de la taille des grains lorsque de telles données sont disponibles. Plus les données disponibles pour la validation sont nombreuses, plus le modèle est fiable. Les comparaisons avec les données de traçage et la bathymétrie après les réinjections constitueront une partie supplémentaire et importante du processus de validation. Une fois validé, un modèle morphodynamique constitue un outil robuste pour prédire la réponse d'une rivière aux perturbations affectant l'apport de sédiments (par exemple, les réinjections), le débit (par exemple, le changement climatique, le fonctionnement du barrage) et l'élévation du lit (par exemple, le dragage). Comme les modèles morphodynamiques mettent à jour l'élévation et la composition du lit à chaque pas de temps en réponse à la capacité de transport locale par rapport à l'apport de sédiments, ils sont bien adaptés pour prédire l'évolution du lit (aggradation et dégradation) ainsi que les changements dans la distribution granulométrique en réponse aux changements dans l'apport de sédiments. Ils peuvent être utilisés pour estimer les vitesses auxquelles les sédiments réinjectés se déplaceront en aval et leur devenir lorsqu'ils atteindront la retenue du barrage suivant, ainsi que l'interaction entre les sédiments réinjectés et le lit actuellement blindé. En outre, un avantage majeur de l'utilisation d'un modèle numérique est la capacité de faire varier les conditions initiales ainsi que les caractéristiques des apports sédimentaires. Ainsi, différents scénarios tels que des conditions de lit plus fines ou plus grossières (et plus pavés) et des réinjections de divers volumes et distributions granulométriques peuvent être simulés.

2. DEFINITIONS

Vous trouverez ci-dessous les définitions de certains des termes clés utilisés dans ce travail.

Charge sédimentaire (rendement) : taux de transport de la charge du lit (ou flux, en m^3/s) pour un tronçon ou une section transversale donnée en fonction de Q , S , DG du lit et de la largeur, également appelé mélange sédimentaire global. La charge peut être mesurée ou calculée à partir d'équations empiriques. La charge annuelle moyenne est estimée à partir de la somme de tous les flux par débit sur la base d'une courbe de débit à fréquence annuelle (ou hydrogramme). Sur de longues échelles de temps, les rivières s'ajustent afin d'équilibrer l'apport de sédiments et la charge sédimentaire. Pour les tronçons entièrement alluviaux (transport limité), la charge sédimentaire est supposée être égale à la capacité de transport (c'est-à-dire le potentiel hydraulique).

Alimentation en sédiments : le taux auquel les sédiments sont fournis (en m^3/s) au tronçon à la limite amont. On parle également de taux d'alimentation ou d'apport de sédiments.

La **couche de surface** : Également appelée couche active, c'est la couche supérieure des sédiments qui constituent le lit du chenal. C'est la couche sur laquelle se produit le transport du charriage et où il y a un échange avec l'écoulement. On suppose généralement que la couche de surface a une épaisseur de $n \times D_{90}$, avec n compris entre 1 et 2 (Viparelli et al., 2011).

Couche de sub-surface : Les sédiments situés sous la couche active. L'épaisseur de ce matériau alluvial jusqu'à la roche-mère varie selon les rivières et les tronçons. La sub-surface est également appelée substrat. La DG de la sub-surface est considérée comme représentative de la DG de la charge sédimentaire (voir la définition de l'armure mobile).



Figure 2 Photo montrant un exemple de couche de surface et de sub-surface

Pavage du lit : Deux types de pavage du lit existent et doivent être distingués. Une **armure mobile** est le phénomène que l'on retrouve dans la plupart des cours d'eau à lit de gravier où la couche de surface est plus grossière que la couche de sub-surface (Parker and Klingeman, 1982; Parker and Toro-Escobar, 2002). Une armure mobile est facilement mobilisée lors de forts débits. Elle résulte du vannage des sédiments fins pendant les faibles débits et est associée au concept de mobilité égale et de conditions d'équilibre. L'existence d'une armure mobile implique que la distribution granulométrique de la charge sédimentaire annuelle moyenne (rendement) des graviers transportés sera plus fine que celle des graviers contenus dans la surface blindée, évidente à faible débit, et similaire à celle des graviers contenus dans la couche de sub-surface. Ainsi, sur le long terme, la distribution granulométrique moyenne dans le temps de la charge de fond est la plus proche de celle de la sub-surface (Parker and Toro-Escobar, 2002). Une **armure statique** est une couche de surface grossière qui est immobile dans

les conditions hydrologiques dominantes. En empêchant l'accès à la sub-surface, une armure statique peut réduire considérablement la charge sédimentaire. Les couches d'armure statique signifient une condition de déséquilibre typiquement due à un déficit d'approvisionnement en sédiments par rapport à la capacité de transport. Les pavages statiques sont souvent observés en aval des barrages. Le degré d'armure peut être quantifié comme le rapport entre la taille médiane des grains de la surface et la taille médiane des grains du substrat. Un rapport technique de l'USDA (Bunte and Abt, 2001) identifie une valeur proche de 1 comme associée aux cours d'eau à fort apport en sédiments, une valeur proche de 2 relative aux cours d'eau dans lesquels la capacité de transport dépasse l'apport en sédiments, et un ratio égal ou supérieur à 3 représentant les cours d'eau naturels des montagnes à forte énergie ou les cours d'eau fortement impactés par la réduction de l'apport en sédiments (par exemple, une armure statique en aval des barrages). Plusieurs cours d'eau dominés par la fonte des neiges ont été enregistrés avec un ratio d'armure proche ou égal à 2, certains atteignant même 6 (Hassan et al., 2006). Ce ratio est très variable, et même au sein d'un cours d'eau, il peut s'avérer difficile d'attribuer une valeur unique pour le degré d'armure. Il n'existe pas de valeur seuil dans la littérature pour distinguer une armure mobile d'une armure statique, mais celle-ci peut être déterminée en considérant le ratio d'alimentation du lit (Dietrich et al., 1989; Vázquez-Tarrío et al., 2019, 2020; Venditti et al., 2017).

3. PORTEE DE L'ETUDE

Les travaux de modélisation se sont jusqu'à présent concentrés sur le tronçon du Péage de Roussillon (PDR) qui est compris entre le barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf en amont (PK 51 ; en service depuis 1977) et le barrage d'Arras (PK 82,85 ; en service depuis 1971) en aval. Le tronçon a une longueur d'environ 30 km et se compose d'un tronçon court-circuité (RCC) à l'aval immédiat du barrage qui est parallèle au chenal de dérivation, de la confluence (PK64) où la dérivation du débit est rétablie, et d'un tronçon total du Rhône entre la confluence et le barrage aval, dont une partie se trouve dans la zone de retenue. Un seuil (Peyraud) a été installé dans le RCC (PK 60.5) entre 1978-1979 afin de maintenir un niveau d'eau fixe pour les résidents locaux. Le seuil a été construit à une hauteur de 3,4 m au-dessus du lit du chenal à un endroit où le lit est naturellement plus haut localement.

Dans le tronçon PDR, aucune extraction significative de sédiments n'a eu lieu, mais un dragage important a été effectué en aval de la confluence afin d'augmenter la chute verticale de l'élévation de l'eau pour améliorer la production d'énergie hydroélectrique dans le chenal ("dragage énergétique"). D'après un rapport d'Ekium (2017), environ 1 650 000 m³ de sédiments ont été dragués entre 1979 et 1985 dans le PK 63.3-69.

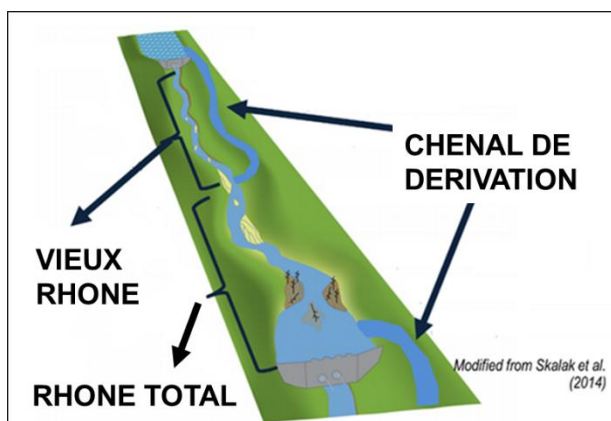


Figure 3 Présentation graphique d'un tronçon unique de barrage à barrage dans le fleuve Rhône

4. METHODOLOGIE

4.1. Basement

Notre objectif était d'utiliser une plateforme numérique existante pour répondre aux besoins immédiats des gestionnaires de rivière en l'absence d'un modèle morphodynamique OSR fonctionnel (en cours à l'INRAE). L'expérience et les résultats de ce travail informeront et seront utilisés pour valider le modèle OSR au fur et à mesure de son développement. BASEMENT (<https://basement.ethz.ch/>) est un outil de simulation développé à l'ETH (Zurich) qui est basé sur un code numérique bien établi capable de simulations morphodynamiques et bien adapté à l'étude d'un large éventail de systèmes fluviaux. Les motivations pour utiliser le modèle BASEMENT dans cette étude étaient les suivantes :

- Le modèle a été développé pour l'ingénierie et les études appliquées dans le but de produire des résultats réalistes pour les questions actuelles de gestion des rivières.
- Le modèle a été appliqué à de nombreuses études de cas en Suisse, dont le contexte géographique, l'histoire de la gestion et les objectifs de restauration sont similaires à ceux du Rhône : rivières alpines à lit de gravier, digues, énergie hydraulique, extraction de sédiments, réinjections de sédiments, réaménagement de canaux, etc.
- Le modèle est capable de simuler des mélanges de sédiments (tailles de grains multiples).
- Le modèle est capable de réaliser des simulations 1D et 2D ainsi que des simulations
- Le modèle BASEMENT est un logiciel libre qui n'est pas open source. Si cela limite la possibilité de modifier le code source, cela garantit également un modèle de haute qualité puisque chaque fonctionnalité a été testée et appliquée de manière approfondie.
- Le modèle convivial garantit que le présent travail peut être facilement transféré et développé par de futurs chercheurs et gestionnaires de rivière.
- Le modèle est très bien documenté (manuel d'utilisation, didacticiels, manuel de référence...) et il existe un forum en ligne permettant aux utilisateurs de soumettre leurs questions aux autres utilisateurs ainsi qu'aux développeurs.

Le modèle Basement peut être utilisé via son interface graphique ou via une feuille brute utilisant le codage interne de Basement. Les manuels et tutoriels disponibles en ligne fournissent des informations et instructions détaillées pour l'utilisation du modèle. Dans ce rapport, nous ne détaillons que les informations spécifiques au travail effectué pour le tronçon PDR du Rhône.

4.2. Configuration du modèle

4.2.1. Conditions initiales

Le modèle numérique nécessite des conditions hydrauliques et morphologiques initiales à partir desquelles il peut commencer. D'un point de vue hydraulique, les simulations qui commencent à partir d'un chenal sec sont numériquement instables. Ainsi, les conditions hydrauliques initiales (surface mouillée et débit pour chaque section transversale) pour toutes les simulations ont été basées sur une condition de faible débit uniforme et constant équivalent à $85 \text{ m}^{3/s}$. De plus, lorsque des impacts hydrauliques multiples étaient présents dans le tronçon, par exemple en raison de structures multiples, les conditions initiales ont été introduites une par une afin d'atteindre la stabilité hydraulique.

Les conditions initiales morphologiques sont constituées de deux parties : une grille 1D d'élévation du lit (basée sur des sections transversales) et la distribution granulométrique de chaque couche (voir 4.2.4). La grille doit toujours être saisie manuellement tandis que la taille des grains et les couches peuvent être saisies manuellement ou définies à partir d'un état antérieur (par exemple, l'état du lit à la fin d'une simulation précédente).

4.2.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les conditions hydrauliques et morphologiques au début et à la fin du tronçon (typiquement la première et la dernière section transversale), appelées entrée et sortie. Le modèle peut également avoir une limite à l'intérieur du tronçon (par exemple une confluence, un seuil...), appelée "limite interne". La définition correcte des conditions limites est très importante pour le bon fonctionnement du modèle et les conditions limites hydrauliques et sédimentaires doivent être évaluées ensemble car elles s'influencent mutuellement.

Le Basement offre un large éventail de possibilités pour définir les conditions limites hydrauliques, notamment les barrages, les hydrogrammes et les relations Q-H (courbes de tarage). Les conditions limites morphologiques sont définies par l'apport de sédiments à l'entrée. Pour les simulations normales, nous avons utilisé l'option "débit de sédiments" dans laquelle un apport constant est introduit dans le temps. Une distribution granulométrique doit être fournie pour l'apport de sédiments. La seule condition de limite en aval qui existe pour le transport des sédiments est celle dans laquelle tous les sédiments entrant dans la dernière cellule de calcul sortent du tronçon. Ici encore, une "frontière interne" peut être définie, telle qu'une réinjection de sédiments, un dragage ou un puits à sédiments.

4.2.3. Données de sortie

Le modèle Basement permet une variété de formats de sortie (voir les manuels Basement). La plupart des données sont extraites du fichier xxx_out.dat qui contient les informations hydrauliques et morphologiques par pas de temps et par section transversale. Le fichier xxxSed.txt contient les caractéristiques des sédiments (granulométrie, couches) par section transversale et par pas de temps.

4.2.4. Couches

Comme expliqué dans les définitions de la section 2, le lit de la rivière est constitué d'une couche de surface et d'une ou plusieurs couches de sub-surface. Chaque cellule de calcul consiste donc en une structure verticale, comme le montre la Figure 4. Bien que Basement possède un module sur les sédiments en suspension (et les polluants), les sédiments en suspension n'ont pas été considérés dans cette étude. La composante hydrodynamique de la Figure 4 est constituée d'eau claire.

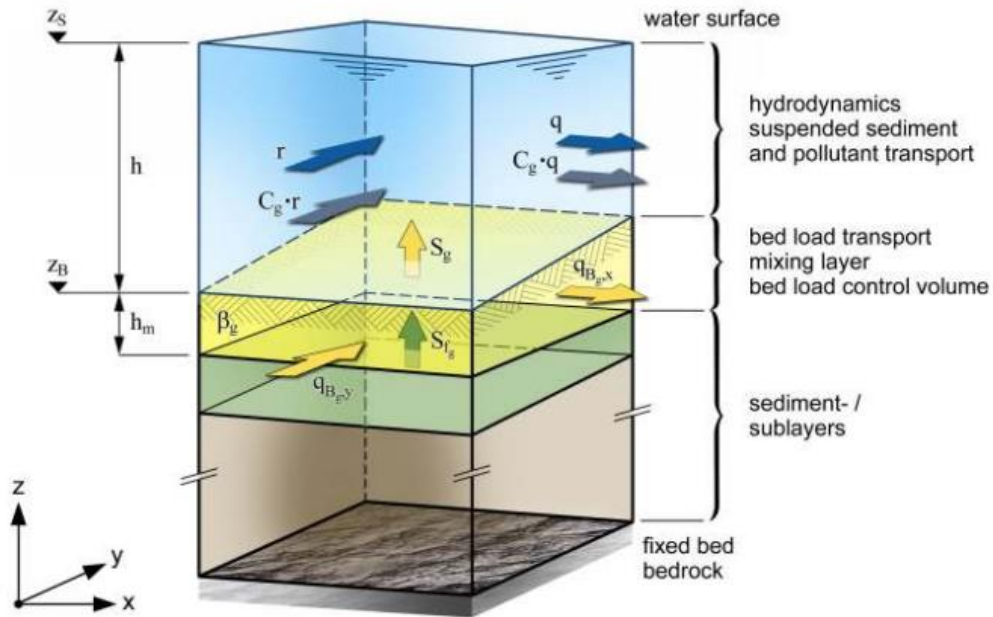


Figure 4 Discrétisation verticale d'une seule cellule de calcul dans Basement (source manuel Basement)

La profondeur de la couche active ou le volume de contrôle du charriage définit la région sur laquelle le transport du charriage se produit et est supposé avoir une distribution granulométrique uniforme. Des études précédentes ont utilisé la règle générale de $n \cdot D_{90}$ comme estimation de la profondeur de la couche active (avec n variant entre 1 et 2, voir Viparelli et al, 2011). Dans ce travail, nous avons appliqué une profondeur de couche active uniforme fixe de 0,1 m basée sur les mesures de la distribution de la taille des grains des canaux dans le RCC (Parrot, 2015). Les propriétés du sol sont définies pour chaque couche avec une fraction de masse de la i ème classe de grains par rapport à la masse totale de la sous-couche (ou couche active). Les distributions granulométriques issues des données de terrain doivent être discrétisées et un certain nombre de classes de grains est choisi. Nous avons sélectionné 10 classes de grains, ce qui est proche du maximum possible pour le bon fonctionnement du modèle dans le Basement. Chaque classe de grain est définie par son diamètre moyen géométrique (D_i) (Parker, 2004) :

$$D_i = (D_{b,i} D_{b,i+1})^{1/2}$$

Où $D_{b,i}$ est la limite inférieure de la classe de grains extraite des courbes de distribution granulométrique disponibles à partir des données de terrain.

4.2.5. Formule de transport du chargement

Au cours des dernières décennies, de nombreuses relations empiriques ont été proposées afin d'estimer le transport du lit. Initialement, ces relations étaient proposées pour les sédiments uniformes et ont été tronçons par la suite aux sédiments non-uniformes. Généralement, le modélisateur choisit l'équation qu'il considère comme la plus applicable ou pertinente pour son étude. Dans l'OSR4 (rapport I.4, 2017; Vázquez-Tarrío et al., 2019), une comparaison entre les estimations du transport avec quatre équations différentes (Meyer Peter et Muller, Wilcock et Crowe, Camenen et Larson, et Recking) et les données de terrain de l'évolution morphologique du tronçon Arras/La Roche-

de-Glun a montré que l'équation de Recking (ci-après dénommée R) estimait le mieux le transport pour le tronçon. Cependant, les quatre équations ont donné des résultats adéquats (moins d'un ordre de grandeur de différence). L'équation R n'est pas actuellement une option dans Basement, cependant plusieurs autres équations pour des classes de grains multiples sont intégrées dans le modèle : La formule de Meyer-Peter Mueller avec l'approche de l'exposition cachée selon Ashida et Michiue (1971, 1972) ; la formule de Parker (1990), la formule de Wilcock et Crowe pour les classes de grains multiples, y compris le sable (Wilcock and Crowe, 2003), la formule de Smart et Jaeggi tronçon aux classes de grains multiples avec l'approche de l'exposition cachée selon Ashida et Michiue (1971) et la formule de Wu, Wang et Jia (Wu (Wu et al., 2000). Nous avons effectué une analyse de sensibilité sur les équations disponibles (voir les détails dans la section 6.1) et déterminé que l'équation de Wilcock et Crowe (ci-après dénommée WC) donnait les meilleurs résultats.

Les équations WC et R sont toutes deux basées sur ce que l'on appelle l'approche "surface-based", dans laquelle on suppose que la granulométrie de surface s'ajuste aux conditions d'approvisionnement en sédiments et, en tant que telle, on considère que la DG de surface est une approximation plus adéquate pour l'étalonnage des formules de charge de fond que la DG de sub-surface (comme cela était fait classiquement, en particulier avant Parker, 1990). En effet, la granulométrie de surface interagit avec le débit et le taux de transport, ce qui rend cette approche plus physique. Néanmoins, WC et R sont basés sur des stratégies différentes. WC commence par estimer les taux fractionnels de charriage (taux de transport par classe de taille de grain). Les taux fractionnaires sont ensuite intégrés pour obtenir une valeur de masse en vrac pour la charge du lit. À l'inverse, l'équation de Recking calcule directement les volumes massifs de la charge de fond sans hypothèses préalables sur les taux de transport fractionnés. Le modèle de seuil généralisé (GTM), développé par Recking (2016), peut alors être appliqué pour calculer la distribution granulométrique de la charge.

La variabilité des estimations entre les formules de transport des charges de fond est normale (Recking et al., 2012). Ainsi, les différences dans les estimations de transport entre ce travail qui utilise l'équation WC et le travail effectué dans l'OSR4 utilisant l'équation R sont normales et à prévoir (rapport I.4, 2017 ; Vazquez-Tarrio et al., 2019). Les calculs effectués dans le cadre de ce travail ne visaient pas à remplacer ni à améliorer les estimations antérieures, mais reposent plutôt sur une approche différente : une estimation des capacités de transport du charriage en moyenne annuelle (OSR4) par rapport à un modèle morphodynamique 1D d'un tronçon simplifié (OSR5). En tant que telles, les différences entre les résultats doivent être considérées dans le contexte du type d'analyse qui a été mené. ***Nous insistons sur le fait que sans une validation supplémentaire avec des mesures sur le terrain, aucune estimation ne peut être considérée comme plus fiable ou plus précise que les autres, étant donné que les deux sont basées sur des formules empiriques.***

4.3. Données disponible

Nous résumons ici les données générales disponibles utilisées pour définir les conditions initiales et limites et pour la validation du modèle.

4.3.1. Hydraulique et courbes de durée d'écoulement

Nous avons utilisé la courbe de débit classé actuelle compilée par Vazquez-Tarrio dans l'OSR4 à partir des données des stations de mesure de la CNR et de la DREAL disponibles dans la base de données hydrologiques française (BanqueHydro). Les hydrogrammes utilisés dans le modèle ont été dérivés directement de ces courbes de débit classé avec un pic au milieu et des faibles débits au début et à la

fin pour assurer la stabilité du modèle (Figure 5 Courbe de durée de débit). Les sorties hydrauliques (relations Q-H) du modèle MAGE (INRAE) calculées pour l'ensemble du fleuve Rhône pour la courbe de débit classé actuelle complète avec et sans dérivation du débit aux barrages (Figure 5 Courbe de durée de débit ; rapport OSR4 I.4, 2017 ; Vazquez-Tarrio et al., 2019) ont également été utilisées. Les débits maximaux qui ont été modélisés avaient une période de retour de 10 ans puisque le modèle MAGE n'a pas été validé pour des crues plus importantes.

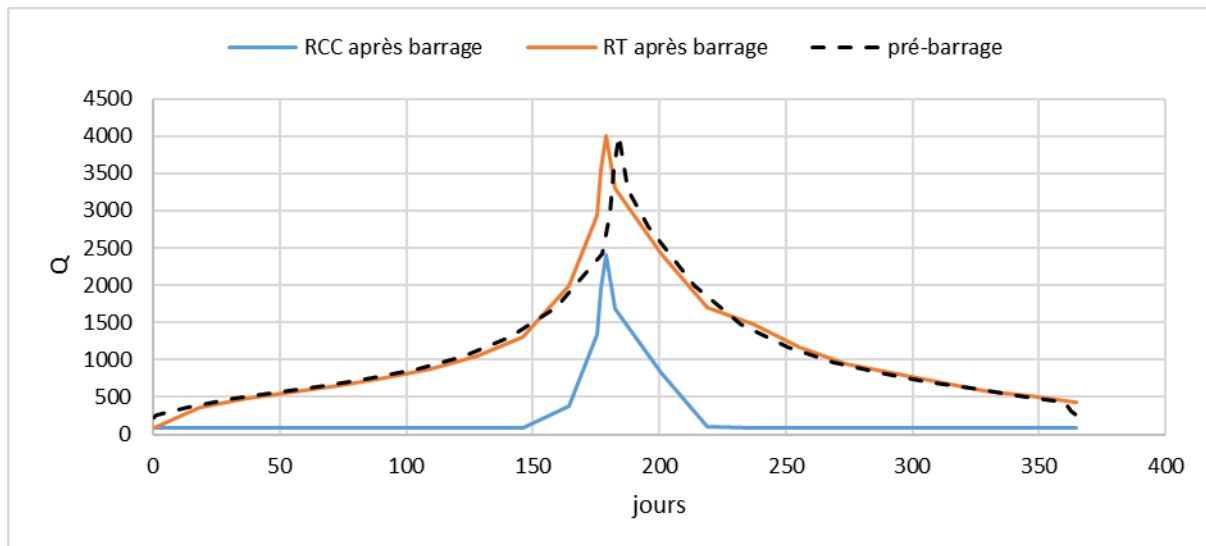


Figure 5 Courbe de durée de débit réorganisée, appelée hydrogramme "post-barrage" pour RCC et RT et courbe de durée de débit réorganisée sans l'impact des barrages, appelée hydrogramme "pré-barrage".

On a utilisé les mêmes coefficients de friction (Strickler) et la même largeur de chenal du mineur éclairé dans le tronçon PDR que ceux utilisés dans le modèle MAGE. Nous avons émis l'hypothèse que les coefficients de friction n'ont pas changé historiquement, et une analyse de sensibilité (voir 6.2) a montré que des changements mineurs n'affectent pas les résultats.

4.3.2. Distributions granulométriques

Nous avons utilisé les distributions granulométriques actuelles à partir d'échantillons prélevés dans le chenal (environ tous les 5 km) et à la surface et la sub-surface de bancs occasionnelles (rapport OSR2 Action 2, 2014 ; Parrot, 2015). La Figure 6A montre la distribution granulométrique moyenne dans les sous-tronçons RCC et RT du PDR, calculée sur l'ensemble des échantillons collectés dans chacune d'elles. Une distribution plus fine est observée pour le RCC. La Figure 6B montre la distribution granulométrique moyenne de la sub-surface des bancs comparée à la moyenne pour le chenal RCC et démontre que la DG des bancs, dont nous supposons qu'elle est une approximation de la charge historique du Rhône (voir 4.4), est beaucoup plus fine que le lit actuel du chenal. La distribution de la sub-surface des bancs a été reconstruite à partir des D50 et D90 rapportés de 5 échantillons (Parrot, 2015) en utilisant le module granulométrique de Bedloadweb (bedloadweb.com), qui applique le modèle DG de Recking (2013). Les Figure 6C et D montrent les distributions pour tous les échantillons de chaque sous-tronçon (RCC et RT) ainsi que la distribution moyenne pour chaque sous-tronçon. Ces figures mettent en évidence que le RCC est caractérisé par une plus grande variabilité de la taille des grains.

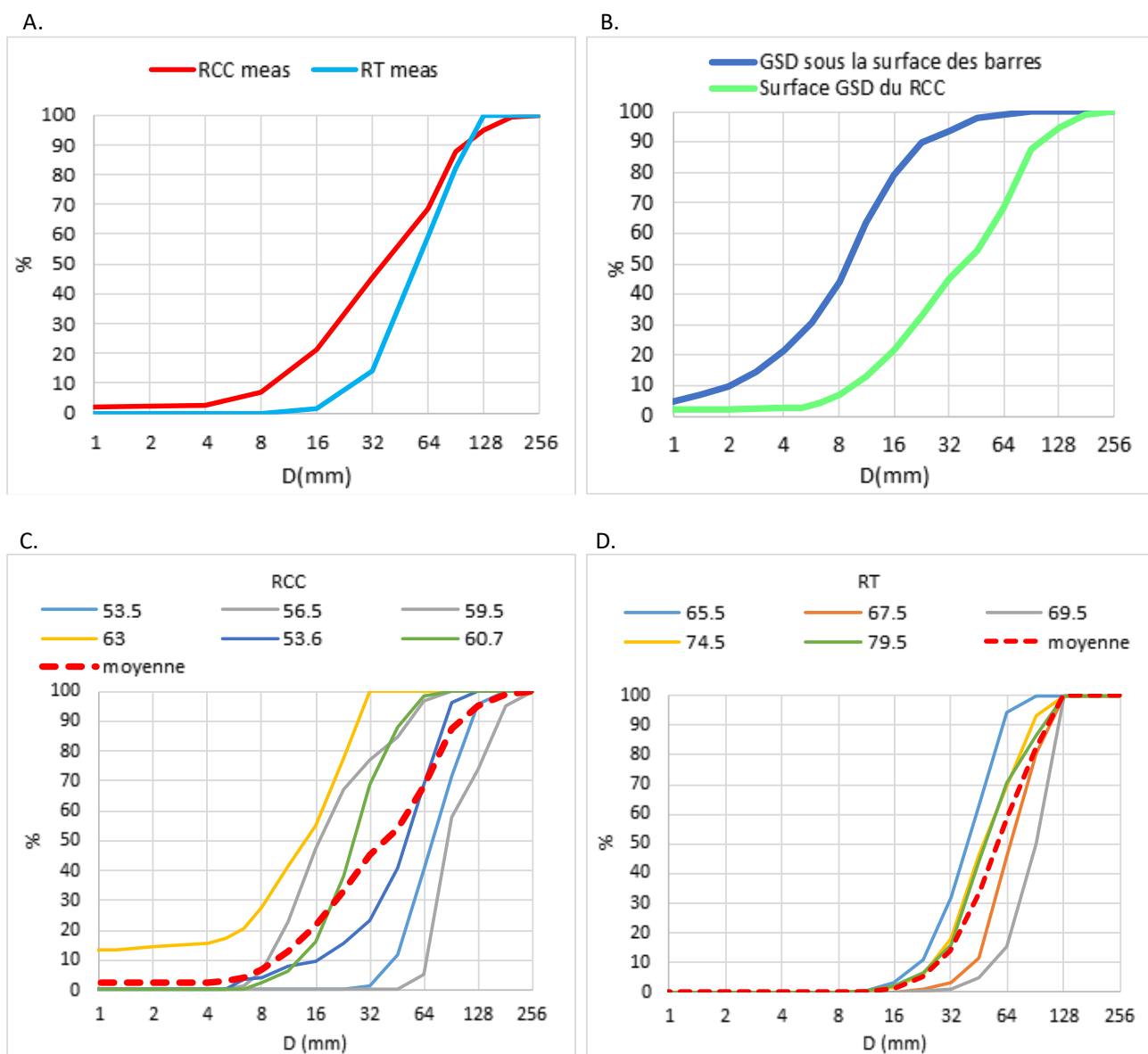


Figure 6 Distribution granulométrique moyenne pour RCC et RT basée sur des échantillons mesurés (A), DG moyenne de la sub-surface des bancs comparée à la DG moyenne de la surface de RCC (B), toutes les distributions granulométriques mesurées pour RCC (C) et RT (D) y compris la moyenne sur tous les échantillons (la légende indique la localisation dans PK).

4.3.3. Géométrie du chenal

Le chenal actif a été configuré comme une série de sections rectangulaires et sa largeur joue un rôle important dans la morphodynamique. Nous avons mesuré les largeurs à partir de cartes historiques et de photos aériennes disponibles sur IGN Geoportail afin d'estimer une largeur moyenne du chenal avant et après endiguements (carte de l'Etat Major, 1820-1866, et photos aériennes, 1950-1965, respectivement). Une comparaison entre ces largeurs mesurées et les largeurs estimées par une analyse hydraulique effectuée par le postdoc Hossein Gaffarian après la réalisation de ce travail est discutée dans la section 6.3. Nous avons utilisé des sections transversales historiques du chenal et des profils longitudinaux compilés pour différentes périodes à partir des analyses bathymétriques de

l'OSR2 (rapport Action 2 2014, Parrot, 2015). Les sections transversales actuelles mesurées par la CNR (à partir de 2007 pour le tronçon PDR) ont été exportées du modèle Mage.

4.4. Analyse historique et approche de modélisation

L'équilibre le long du Rhône actuel ne peut être présumé. Certaines parties du chenal peuvent encore s'adapter à la mise en œuvre des barrages, de l'extraction minière et du dragage au milieu du 20^{ème} siècle sous la forme de changements de pente, de pavage, d'affinement du lit, ... De tels ajustements peuvent se produire très lentement et/ou à un niveau non détectable par la surveillance standard. En tant que tel, l'exécution d'un modèle morphodynamique basé sur des conditions actuelles imposées pour simuler des scénarios futurs à long terme peut ne pas être physiquement significatif et pourrait entraîner des erreurs puisque les processus physiques sous-jacents et en cours pourraient être manqués. Ainsi, alors que les objectifs opérationnels de cette étude se rapportent aux conditions actuelles (état du lit, hydraulique) du fleuve Rhône, nous considérons qu'un modèle robuste pour prédire les effets futurs de la restauration est un modèle qui a évolué dans le temps en réponse à un ensemble de conditions initiales et limites à partir de la dernière fois où le système a été supposé être en équilibre (c'est-à-dire un état pré-perturbé) et qui a reproduit aussi fidèlement que possible l'évolution du système dans le temps en réponse à des perturbations successives (voir 1.2).

Compte tenu des multiples phases de travaux sur le chenal réalisées tout au long du 20^{ème} siècle, il nous a semblé nécessaire de remonter jusqu'au Rhône avant la construction des digues pour définir nos conditions initiales et limites préliminaires. Les hypothèses suivantes sous-tendent notre reconstitution historique à partir de la fin de la période de pré-aménagement :

1. Le Rhône était en équilibre avant l'endiguement du chenal.
2. Le régime hydrologique (hydrogramme) n'a pas changé au cours des 150 dernières années et les réductions du débit dans le RCC sont strictement le résultat des détournements de débit.
3. Les mesures de la DG de sub-surface des bancs sont une approximation raisonnable de la DG moyenne à long terme de la charge sédimentaire de la rivière (Bankert and Nelson, 2018)
4. La charge sédimentaire transportée dans les conditions du lit actuel et d'un régime d'écoulement non perturbé est une approximation raisonnable de premier ordre pour la charge historique et l'apport sédimentaire.

Nous soulignons que le seul objectif de la simulation des pré-endiguements du lit était de définir l'état initial de la période post-endiguements. Une étude de la période de pré-endiguements en soi est en dehors de la portée de cette étude. Une fois nos conditions initiales préliminaires fixées, les périodes post-endiguements et post-barrage ont chacune été simulées pour leur durée historique équivalente et les conditions finales à la fin de chaque période ont été prises comme conditions initiales de la période suivante. Des simulations plus longues ont également été effectuées afin d'étudier la condition d'équilibre et de révéler toute tendance morphologique et/ou instabilité du modèle qui n'aurait pas été visible à court terme. L'équilibre dans le modèle a été défini comme l'absence de changement significatif de l'élévation du lit et de la distribution granulométrique entre deux pas de temps consécutifs. La Figure 7 est un résumé de notre approche et de nos hypothèses.

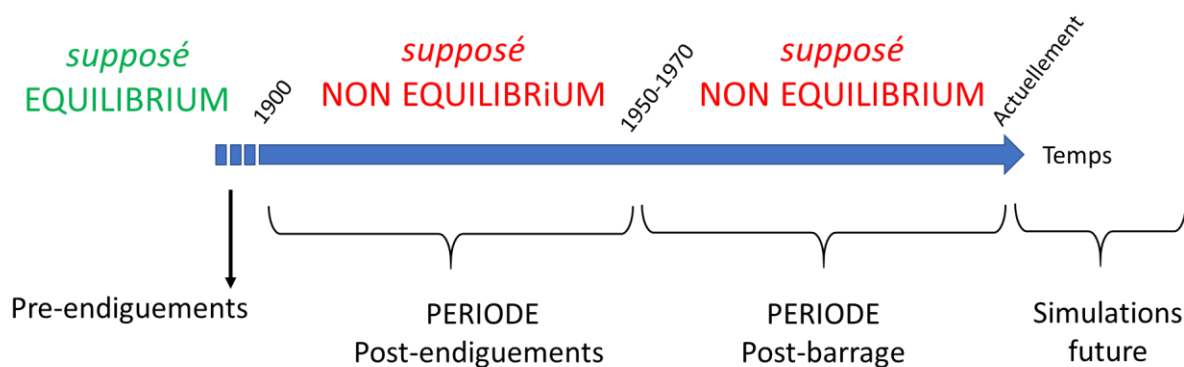


Figure 7 Vue d'ensemble des différentes périodes impactant le lit du Rhône

4.4.1. Estimation de la composition historique du lit, de l'apport de sédiments et du flux de sédiments

Comme expliqué précédemment, des conditions initiales et des conditions aux limites sont nécessaires pour exécuter le modèle numérique (voir 4.2). Cependant, les données disponibles sur la composition de la surface et de la sub-surface du lit sont minimales (IRS, 2000), et il n'existe aucune mesure de l'apport ou du flux (charge) de sédiments. Nous avons estimé ces données à l'aide d'une combinaison d'étapes de modélisation analytique et numérique Figure 8 qui ont soutenu nos hypothèses (voir 4.4).

Tout d'abord, une simulation d'équilibre a été réalisée à l'aide de Basement, ce qui signifie qu'il n'est pas nécessaire de définir un apport de sédiments à la limite amont puisqu'il est égal à la capacité de transport et donc calculé par le modèle. Cette simulation a été effectuée dans les conditions d'un lit actuel (élévation du lit, largeur moyenne et DG de surface actuelle) et d'un hydrogramme pré-barrage (régime d'écoulement non perturbé). Le résultat de ce calcul a fourni les taux de charge par classe de grain par Q (c'est-à-dire une courbe de tarage). Ces taux de charriage pondérés sur l'ensemble de l'hydrogramme ont donné la charge sédimentaire annuelle totale que nous avons considérée comme égale à l'apport sédimentaire historique (hypothèse 4). Le flux annuel estimé résultant de cette analyse était de $275 \text{ m}^3/\text{an}$ ($8,72\text{E-}06 \text{ m}^3/\text{s}$). Cette valeur est très faible mais est en accord avec les estimations du bilan sédimentaire (Ekium, Burgeap) des volumes de transport de sédiments grossiers. Nous avons supposé que les fractions granulométriques de la charge actuelle du lit avec un régime d'écoulement non perturbé sont représentatives des fractions du Basement historique et de l'approvisionnement en sédiments.

Ensuite, nous avons appliqué un modèle analytique en utilisant l'approche décrite dans Blom et al. (2017) qui est basée sur la théorie proposée par Parker et Sutherland (1990) en utilisant la pente du pré-endiguements, la largeur moyenne du pré-endiguements et la courbe d'évaluation des sédiments (à partir de la simulation expliquée ci-dessus et basée sur l'hypothèse 4) pour estimer la DG de surface du lit du pré-endiguements. Nous avons comparé ces résultats avec ceux obtenus en utilisant la DG de sub-surface des bancs comme paramètre d'entrée dans l'exécution de l'équilibre du Basement. Les résultats sont décrits dans la section 6.4.

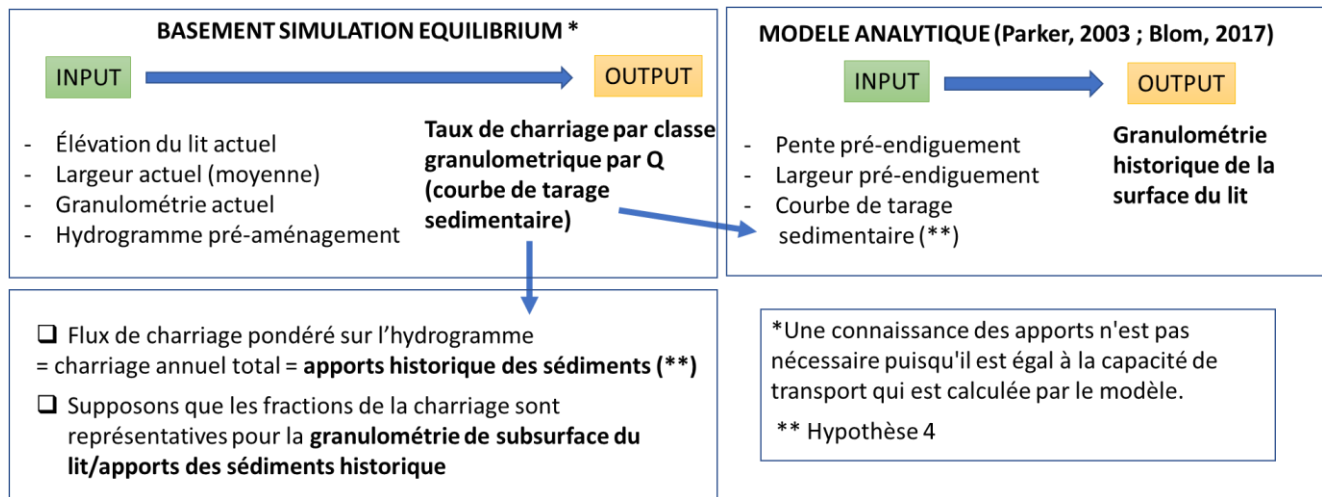


Figure 8 Aperçu des étapes utilisées pour estimer les données historiques

4.5. Paramètres du modèle et résumé des simulations

Le tableau 1 résume les principaux paramètres et les simulations effectuées pour chaque période. Des détails supplémentaires spécifiques à chaque période sont fournis dans la section 5.

Toutes les simulations numériques consistaient en une grille 1D avec des sections transversales rectangulaires de largeur fixe espacées de 1 km. La distribution granulométrique était constituée de 10 classes de grains - un choix fait par le modélisateur qui dépend du modèle utilisé et de la disponibilité des données. L'apport de sédiments a été fixé à 275 m³/an (8,72E-06 m³/s) pour toutes les simulations (section 4.4.1), à l'exception des scénarios dans lesquels l'apport de sédiments a été fixé à 0.

Tableau 1 Résumé des paramètres et des simulations effectuées pour chaque période

Période	Simulations	Largeur (m)	Élévation initiale du lit	Hydraulique	DG de la surface initiale
Pré-endiguements	a. 2000 ans (pour atteindre l'équilibre)	300	Pente fixe basée sur le profil en long de 1897 (Parrot, 2015)	Avant le barrage	Estimé (voir 4.4.1)
Post-endiguements	a. 75 ans : moyenne des années de construction des barrages (1897 - 1969/1974) b. 1000 ans	230	Simulation du stade du lit d'équilibre avant la mise en place de la digue.	Avant le barrage	Composition du lit final de la simulation de l'équilibre pré-endiguements
Après le barrage	a. 43 ans : 1977-2020, barrages uniquement b. 43 ans : barrages + dragage c. 500 ans : barrages + dragage	RCC - 150 RT - 230	État final du lit à la fin de la simulation après endiguements	Après le barrage	Composition finale du lit à la fin de la simulation post-endiguements

	d. 500 ans : barrages + dragage, pas d'apport de sédiments				
Réinjections actuelles et sédiments	a. Simulation annuelle b. volume de réinjection de 6500 m3, hydrogramme annuel moyen, apport annuel moyen de sédiments c. Volume de réinjection de 6500 m3, hydrogramme annuel moyen, pas d'apport de sédiments d. Volume de réinjection de 6500 m3, hydrogramme mesuré, apport annuel moyen de sédiments e. Volume de réinjection de 50000 m3, hydrogramme annuel moyen, apport annuel moyen de sédiments f. Volume de réinjection de 50000 m3, granulométrie unique et uniforme, hydrogramme annuel moyen, apport annuel moyen de sédiments.	RCC - 150 RT - 230	État final du lit à la fin de l'après-barrage	Après le barrage	Composition finale du lit à la fin de la simulation post-barrage

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Période Pré-endiguement (chenal d'équilibre)

La Figure 9 est une comparaison de notre DG historique estimé de la surface du lit (ligne pointillée rouge) basé sur le modèle analytique (voir section 4.4.1) et de notre DG historique estimé de la sub-surface basé sur les calculs de charge actuels (ligne pointillée jaune) avec le DG mesuré. La DG historique estimée de la surface n'est que légèrement plus fine que la DG mesurée du chenal actuel. La DG historique estimée de la sub-surface est plus grossière que les mesures de la sub-surface des bancs. Cependant, étant donné qu'il y a si peu d'échantillons de bancs, et que les distributions complètes ont été estimées à partir des mesures rapportées de la D50 et de la D90, nous considérons qu'il s'agit d'un résultat adéquat qui confirme notre hypothèse selon laquelle la DG de sub-surface des bancs est une approximation raisonnable de la charge historique. En outre, les résultats montrent que

la DG de surface est plus grossière que la DG de sub-surface avec un rapport de pavage de 2,3, une valeur dans la gamme normale pour une armure mobile dans les rivières à lit de gravier naturel.

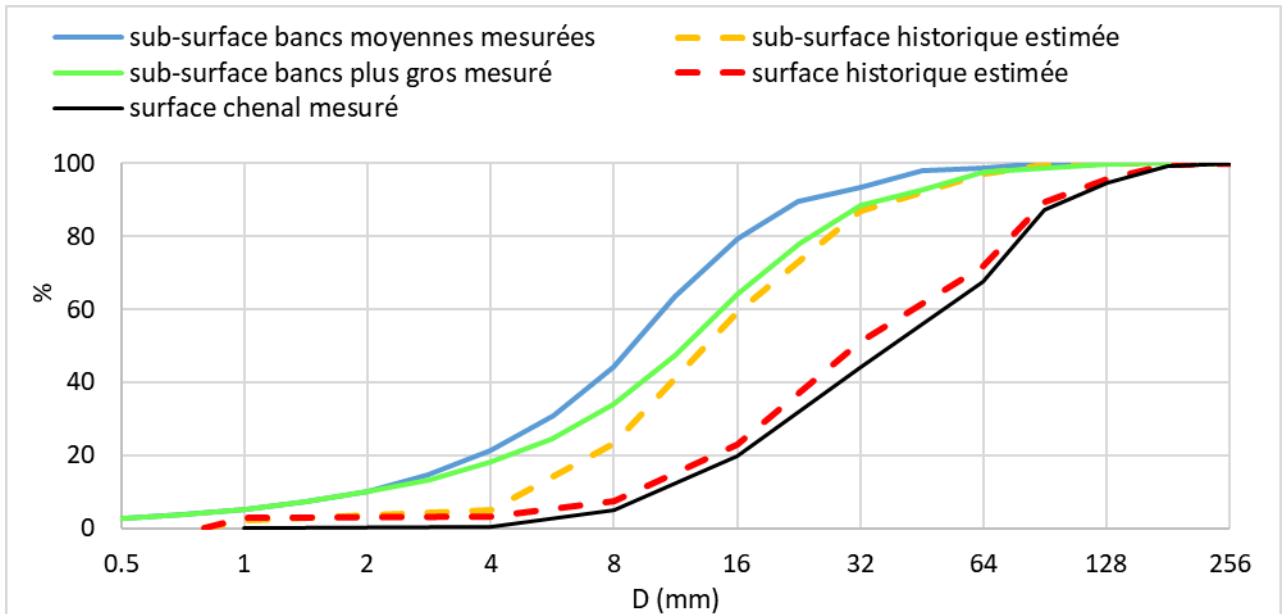


Figure 9 Estimation de la DG de surface et de sub-surface pour le chenal pré-endiguements comparée à la DG de surface mesurée et à la DG de sub-surface des bancs.

Nous avons utilisé ces estimations initiales de DG comme base d'une simulation dans Basement que nous avons laissé aller jusqu'à l'équilibre afin de les affiner (l'équilibre a été atteint après 2000 ans).

Figure 10 montre la différence entre l'élévation du lit à différents moments dans la simulation par rapport au lit initial. A la fin de la simulation, le lit reste stable et les changements totaux du lit sont très faibles (globalement moins de 5 cm après 2000 ans).

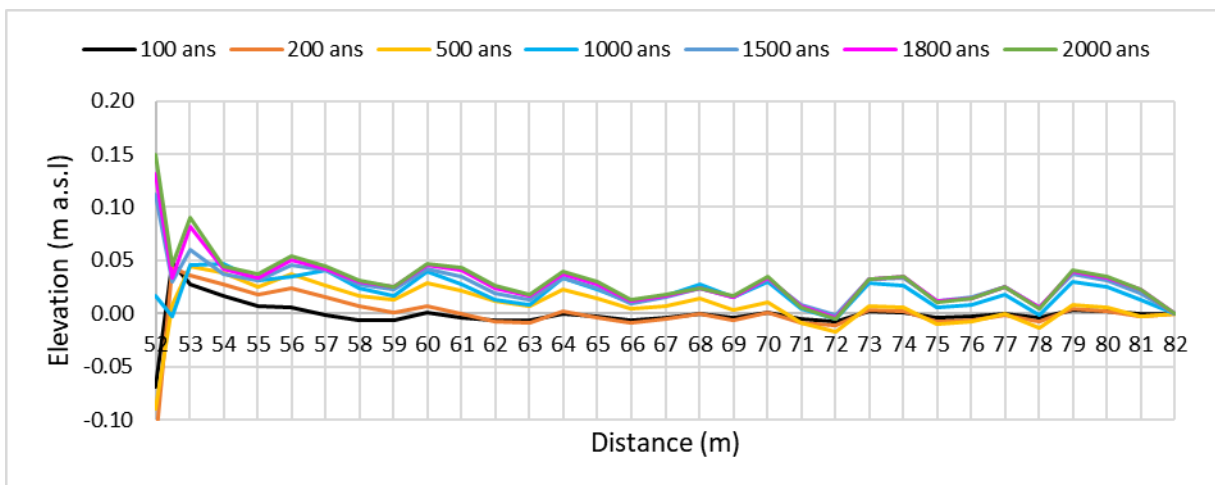


Figure 10 Élévation du lit de la rivière avant endiguements à partir d'une simulation à long terme.

La distribution granulométrique de surface a également atteint l'équilibre (Figure 11) : la DG de surface à la fin de l'essai était légèrement plus fine par rapport à nos estimations initiales de DG, avec un rapport d'armure final de 1,7. Aucun changement n'a été observé dans la DG de sub-surface (ceci était attendu étant donné que le lit reste stable).

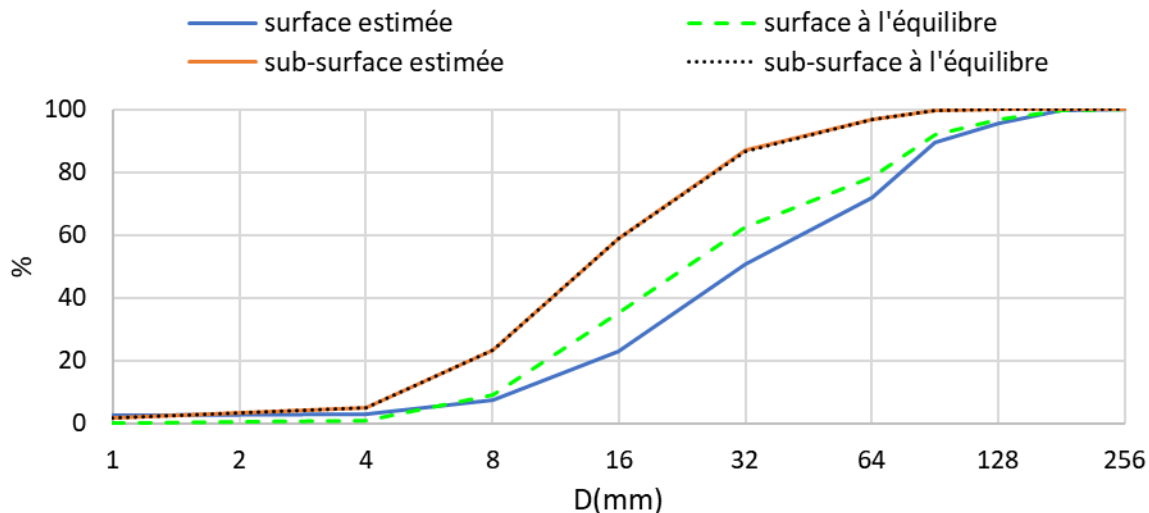


Figure 11 DG estimée par rapport à la DG modélisée à l'équilibre

Résumé et conclusions

Afin de définir les conditions initiales nécessaires pour simuler l'évolution du tronçon pendant la période post-remboursement, nous nous sommes référés aux conditions d'équilibre présumées du chenal avant les endiguements. Cette hypothèse nous a permis d'utiliser une série d'étapes d'analyse et de modélisation afin d'estimer la composition historique du lit, le flux de sédiments et les apports sédimentaires (voir section 4.4.1) pour lesquels aucune donnée n'est disponible. Nous réitérons que ces simulations n'avaient pas pour but de reproduire précisément le Rhône pendant la période pré-endiguements ni d'étudier en détail le chenal pendant cette période. Les taux historiques de transport de charriage et d'apport de sédiments sont basés sur l'hypothèse que le taux de transport de charriage dans le chenal actuel, dans les conditions de débit avant aménagement, est une bonne estimation de premier ordre pour le charriage historique.

La sub-surface historique estimée par la méthode analytique est très similaire à la DG mesurée dans la sub-surface des bancs actuelles. Ce résultat confirme notre hypothèse selon laquelle la DG de la sub-surface des bancs est une approximation raisonnable de la DG moyenne à long terme de la charge sédimentaire de la rivière. La DG historique estimée de la surface n'est que légèrement plus fine que la DG mesurée du chenal actuel. En d'autres termes, sur la base de la pente et de la largeur moyennes extraites des mesures, d'un hydrogramme d'écoulement moyen avant barrage, et des taux estimés de transport du lit et d'apport de sédiments, on obtient une DG de surface assez proche de celle du lit actuel.

Une comparaison de l'élévation et de la composition initiales du lit avec celles à la fin d'une longue simulation qui a atteint l'équilibre a montré que l'élévation du lit est restée stable, que la DG finale de la surface n'était que légèrement plus fine que celle initialement estimée, et que le rapport d'armure final du lit (1,7) correspond à une armure mobile typique. Les résultats confirment que les étapes d'analyse et de modélisation que nous avons utilisées pour estimer le flux sédimentaire historique et la composition du lit pour le chenal avant endiguements (équilibre) sont valides et constituent une approche appropriée pour déterminer les conditions initiales nécessaires pour simuler la période après endiguements.

5.2. Période post-endiguements

Nous avons simulé la période post-endiguements d'environ 75 ans avec la composition finale du lit et l'élévation du lit de la simulation d'équilibre pré-endiguements comme conditions initiales et avec une largeur de chenal réduite de 300 m à 230 m (Tableau 1). Au début de la période post-endiguement, nous avons effectué une simulation sur un an afin de déterminer les taux de transport du lit et de les convertir en une charge sédimentaire annuelle totale. Nous avons obtenu une valeur de $2,03E-5$ m³/s ou 641 m³/an, ce qui est légèrement supérieur aux valeurs précédemment estimées pour la charge de fond historique et l'apport de sédiments (voir 4.4.1). Comme la différence était faible, nous avons utilisé la même estimation de l'apport (275 m³/an) pour simuler la période post-endiguements.

La simulation a montré qu'il n'y avait pas de changement dans l'élévation du lit pendant la période qui a suivi la construction du barrage (Figure 12 Thalweg). Nous avons validé ce résultat en le comparant aux ajustements de la pente linéaire aux élévations du lit mesurées en 1897 et immédiatement avant la construction des barrages (1969 - 1974 ; Figure 12 Thalweg). Malgré un léger changement de pente qui peut être observé entre les deux tendances linéaires dans la moitié amont du tronçon, nous avons conclu qu'aucun changement significatif et continu de la pente ne s'est produit dans ce tronçon pour les raisons suivantes :

- Le changement de magnitude est très faible (environ 2,4 mm/100 m ou 72 cm sur 30 km).
- L'erreur dans les mesures historiques est inconnue, mais nous supposons qu'elle est moins précise que les mesures actuelles.
- Aucune tendance plus importante de changement de pente n'est observée dans le profil en long du Rhône sur une plus longue portée
- Les plus grandes différences dans l'élévation du lit se produisent à des points individuels (non continus) (par exemple, PK 53, 55.5, 60, 64 ...) qui sont ponctués par des différences qui sont presque nulles. Nous pensons que cela indique que les changements de morphologie sont locaux, et qu'ils sont dus par exemple à la présence ou à la migration de bancs ou de seuils et mouilles.

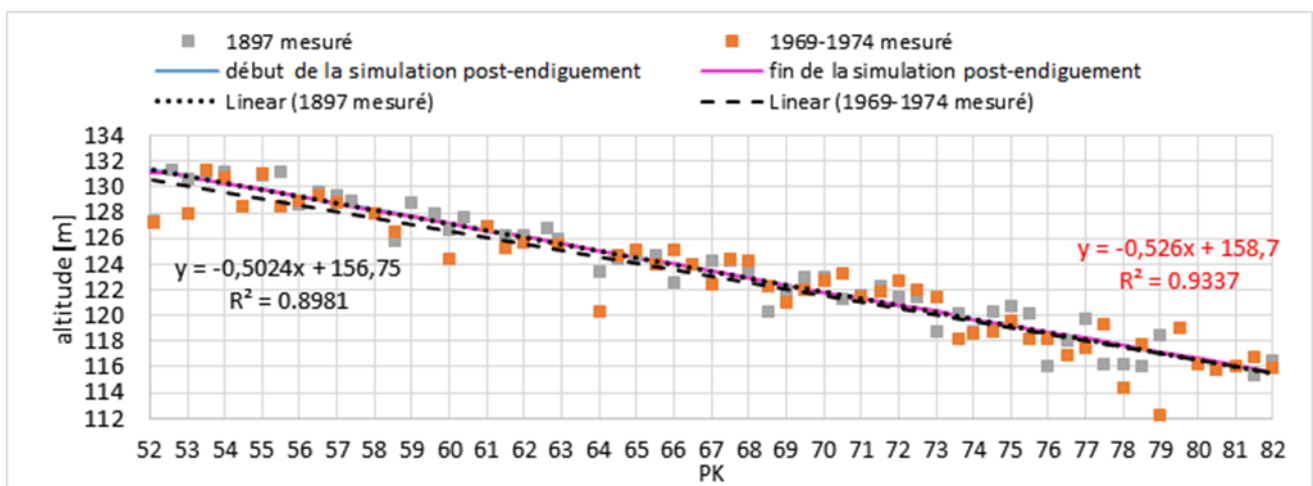


Figure 12 Thalweg mesuré en 1897 (début de la période post-endiguement) et 1969-1974 (fin de la période post-endiguement) et simulations au début et à la fin de la période post-endiguement.

Les simulations ne montrent aucun changement dans les distributions granulométriques de surface pour cette période (Figure 13). Ce qui est à prévoir dans le cas d'une élévation constante du lit (pas d'érosion ou d'aggradation). La DG de surface simulée reste plus fine que la DG de surface mesurée.

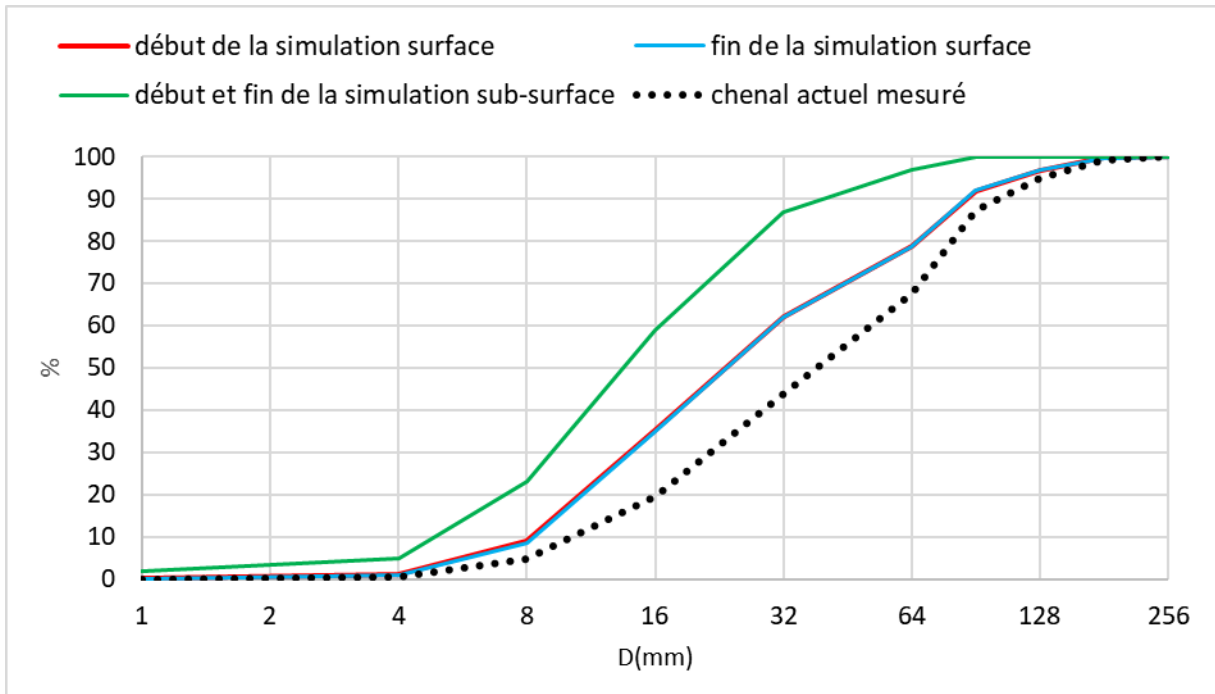


Figure 13 Distributions granulométriques au début et à la fin de la période post-endiguements, ainsi que les mesures actuelles de la surface du chenal.

En plus de la simulation de la durée réelle de la période post-endiguements (75 ans), nous avons effectué une simulation longue de 1000 ans afin de déterminer la condition d'équilibre du chenal. La simulation à long terme ne montre aucun changement significatif de l'élévation du lit et une légère augmentation de DG de la surface du lit (Figure 14 et Figure 15).

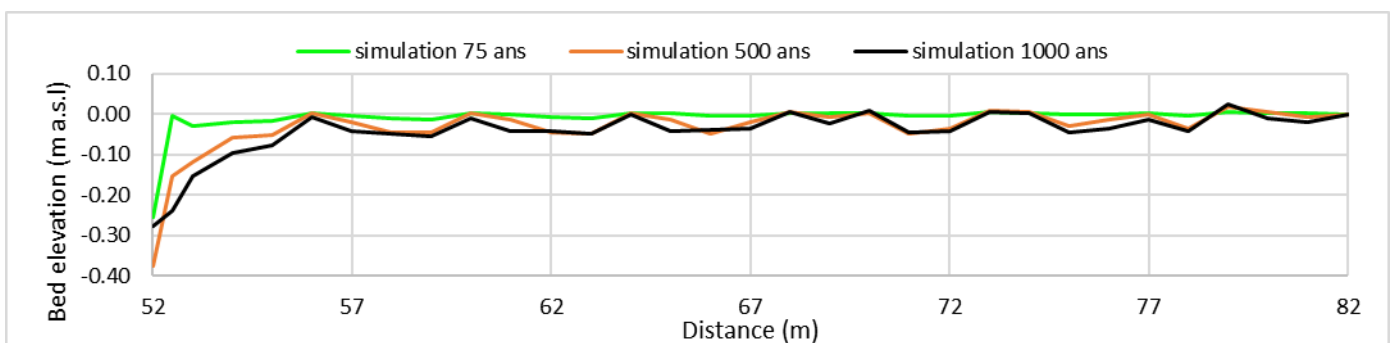


Figure 14 Différence d'élévation du lit après les endiguements à long terme (par rapport au lit au début de la simulation)

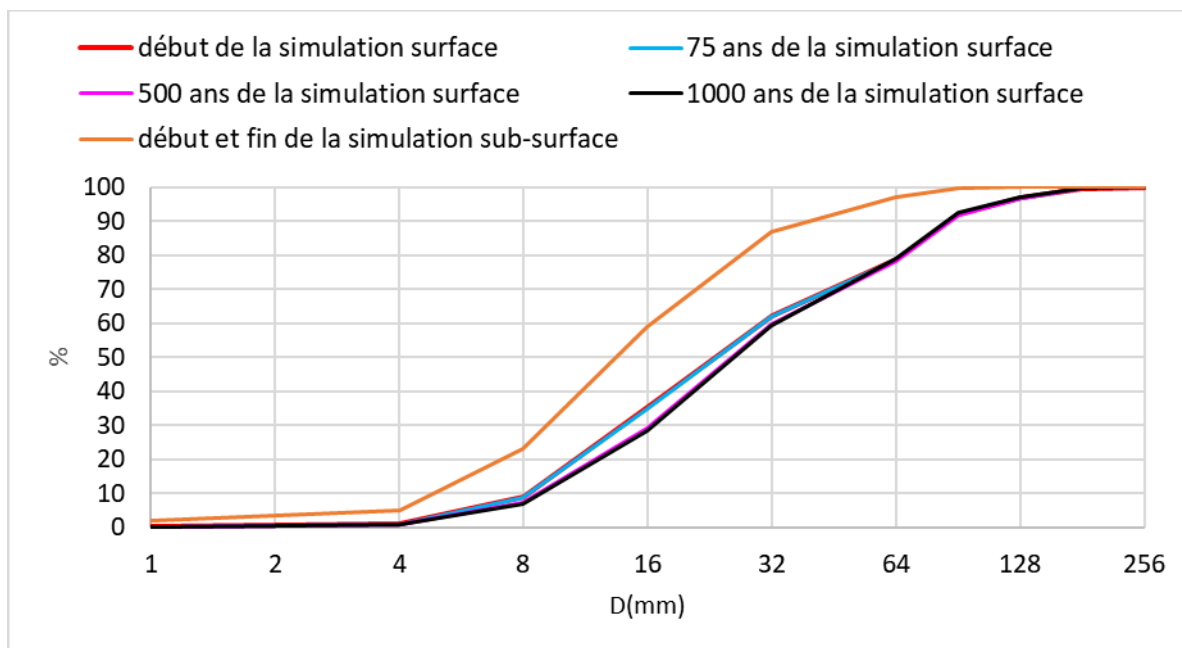


Figure 15 Modifications de la granulométrie simulation impact des endiguements à long terme

Résumé et conclusions

Notre simulation de la période post-endiguements ne montre aucun changement dans la pente et est en bon accord avec les profils longs au début et à la fin de cette période. La simulation ne montre également aucun changement dans les distributions granulométriques de surface ou de sub-surface en réponse au rétrécissement du chenal associé aux endiguements. Un rapport d'armure estimé à 1,7 à la fin de la période post-endiguements reste en bon accord avec les rapports d'armure mobiles des rivières à lit de gravier naturel. Une simulation à long terme montre que l'incision et l'augmentation de DG de la surface du lit sont extrêmement faibles et que le lit est très proche de l'équilibre au début de la construction du barrage. En résumé, le rétrécissement du lit associé aux Casiers Girardon n'a pas eu d'impact observable sur le tronçon du PDR.

L'apport sédimentaire d'équilibre simulé au début de la période post-endiguements était légèrement supérieur à l'apport historique estimé précédemment (641 m³/an et 275 m³/an respectivement). Cette augmentation suggère que le lit rétréci était capable de transporter un peu plus de charge que le lit avant les endiguements, mais la différence n'était pas suffisante pour avoir un impact morphologique sur le lit.

5.3. Période post- barrage

Nous avons effectué une série de simulations afin d'étudier l'évolution du lit en réponse aux barrages seuls ainsi qu'en réponse aux barrages couplés au dragage hydraulique qui a été effectué le long du tronçon (Tableau 1). La période post-barrage avait une durée de 43 ans s'étendant du moment de la construction du barrage à aujourd'hui (1977-2020). La composition et l'élévation du lit finales de la simulation d'équilibre post-barrage ont servi de conditions initiales avec une largeur de chenal réduite dans le RCC (Tableau 1). Le seuil de Peyraud (1978 - 1979) a également été implanté dans le tronçon simulé dès le début de la période de simulation. Comme il a été mentionné précédemment, un dragage énergétique a été effectué de 1979 à 1985 en aval de la confluence (PK 63,9 - PK 69 ; Figure 16). Ceci

aussi a été implémenté dans la simulation au début de la période. Le volume dragué a été estimé à environ 1 650 000 m³ (Ekium, 2017). Nous avons effectué deux simulations sur 500 ans afin de détecter tout changement à long terme et de déterminer si le lit était en équilibre. La première de ces simulations comportait toutes les mêmes conditions que la simulation sur 43 ans. Dans la deuxième simulation, nous avons imposé une condition d'apport sédimentaire nul pour explorer le rôle que notre taux d'apport sédimentaire estimé, malgré sa faible valeur, avait sur le tronçon.

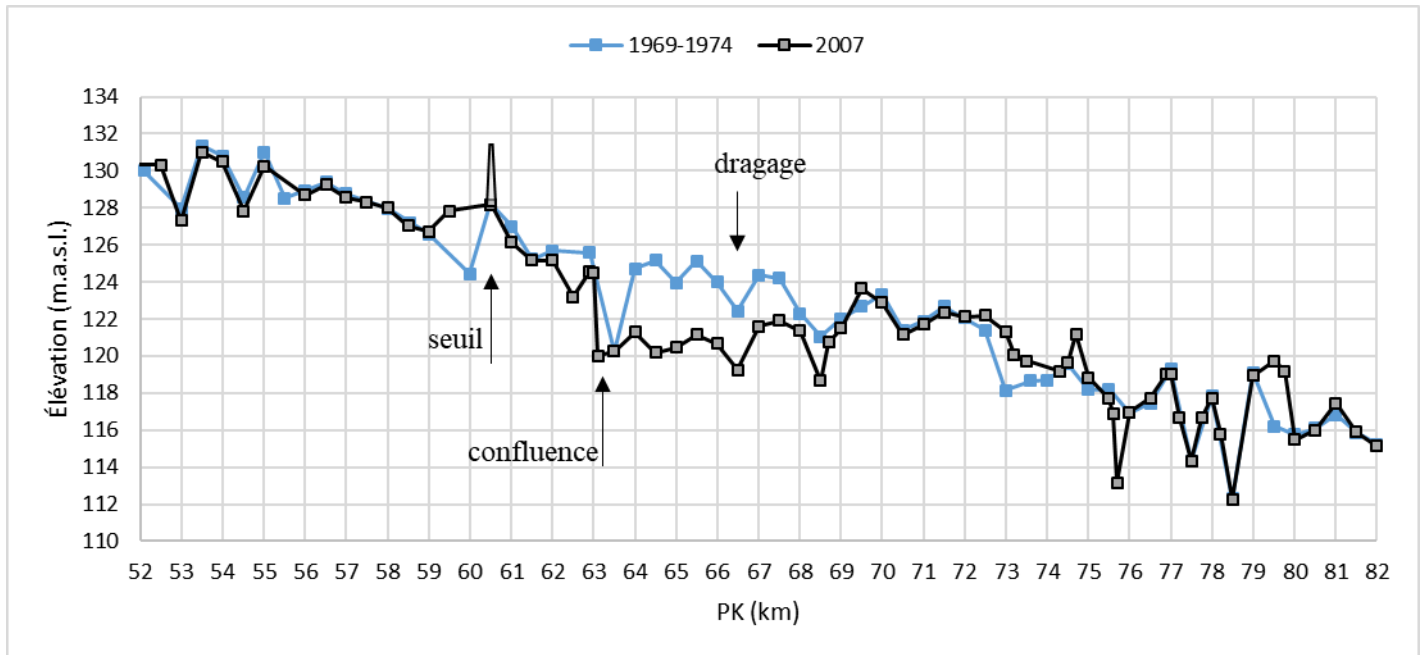


Figure 16 Altitude mesurée du lit au début et à la fin de la période post-barrage

Configuration et validation du modèle

Dans un premier temps, toutes les structures hydrauliques ont été intégrées dans le modèle (Figure 14). Comme notre modèle repose sur les résultats des simulations hydrauliques du modèle Mage, nous avons d'abord simulé notre tronçon dans Basement en utilisant des sections transversales réelles (plutôt que des sections rectangulaires simulées) afin de nous assurer que les niveaux d'eau s'alignent aussi précisément que possible avec Mage.

Le modèle commence juste en aval du barrage de St Pierre de Boeuf et reçoit le débit entrant dans le RCC (Q_{in_rcc}) à cette limite amont. A la confluence avec le chenal (PK64), on définit un débit hydraulique entrant (Q_{in_chenal}) égal au débit passant par le chenal. À la limite aval, on définit un débit hydraulique sortant (Q_{out_chenal}) égal au débit s'écoulant vers le chenal en aval ; le débit restant s'écoule par-dessus le barrage ($Q_{out_barrage}$). Les valeurs de Q_{in_rcc} , Q_{in_chenal} et Q_{out_chenal} sont basées sur les courbes de durée d'écoulement après le barrage (Figure 5) et sur la répartition du débit fournie par le modèle Mage (voir 4.3.1).

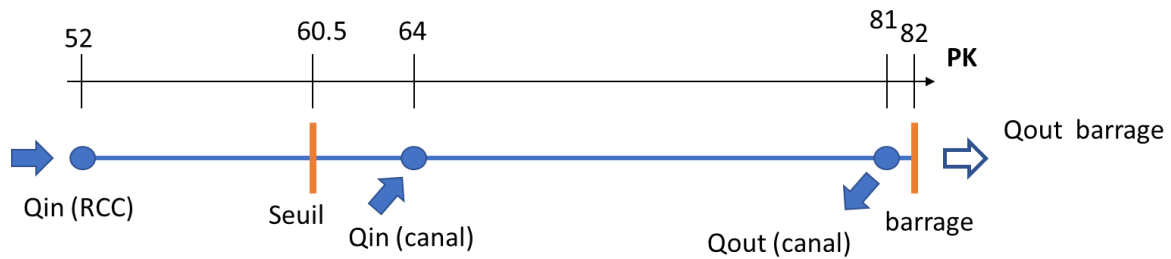


Figure 17 Représentation schématique de la configuration du modèle pour la période post-barrage.

Le seuil a été défini dans le modèle comme une "frontière intérieure" à PK60.5 avec une hauteur fixe à une altitude de 131,5 m.a.s.l. et une largeur de 310 m. Le seuil a été configuré de telle sorte qu'aucun sédiment ne puisse passer. La structure du barrage aval n'est pas fixe - sa hauteur dépend des règles d'extraction, et sa mise en œuvre est donc plus complexe. Toute la complexité des règles régissant cette structure est intégrée dans le modèle Mage. Dans notre modèle, nous avons simplement implémenté une limite similaire à un seuil avec une hauteur variable en fonction de Q. Les différentes hauteurs du barrage ont été déterminées sur la base des lignes d'eau à différents débits dans Mage.

La combinaison de plusieurs structures hydrauliques et de flux d'entrée et de sortie a rendu difficile l'obtention de la stabilité hydraulique du modèle. Il a donc été nécessaire de faire tourner le modèle jusqu'à ce qu'il se stabilise en réponse à un impact à la fois. La Figure 18 montre les lignes d'écoulement des modèles Mage et Basement pour les débits simulés les plus faibles et les plus élevés. Une fois la stabilité du modèle et la bonne concordance avec les lignes d'eau de Mage obtenues, nous avons utilisé la même configuration de modèle avec notre grille 1D et des sections transversales rectangulaires.

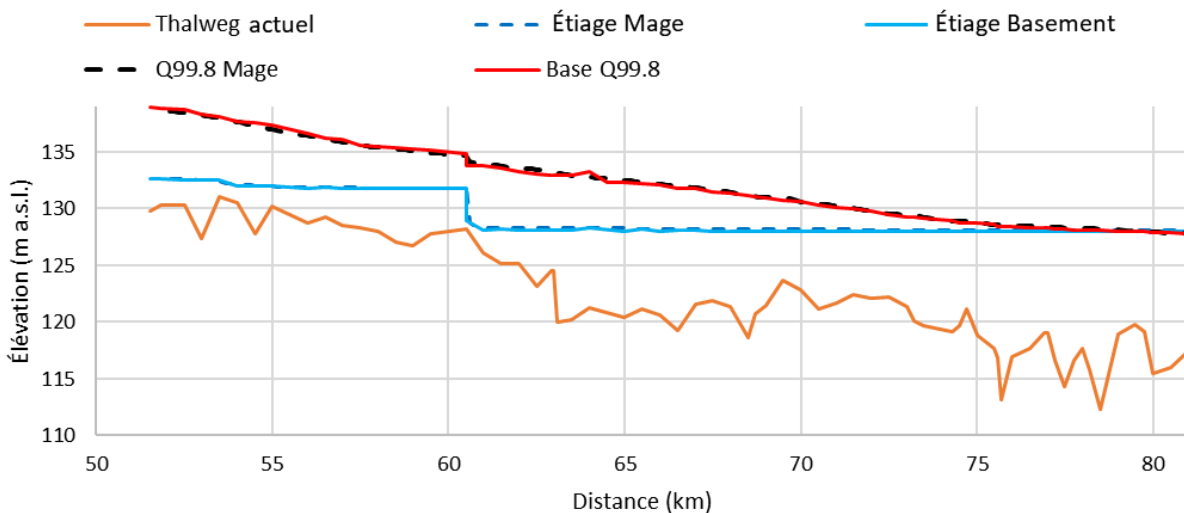


Figure 18 Lignes de débit de Mage et Basement pour les débits simulés les plus faibles et les plus élevés.

Nous avons simulé le volume dragué en pratiquant une incision d'environ 2 m dans le lit modélisé entre PK 65 et PK 68 (Figure 12), ce qui équivaut à retirer un volume de 1 587 000 m³ (remarque : l'incision réellement mesurée descend à 120 m au-dessus du niveau de la mer contre 22 m au-dessus du niveau de la mer dans le modèle (Figure 16)). L'incision de la couche de surface vers la couche de sub-surface (voir 4.2.4) a entraîné une distribution granulométrique plus fine (c'est-à-dire celle de la sub-surface) à cet endroit.

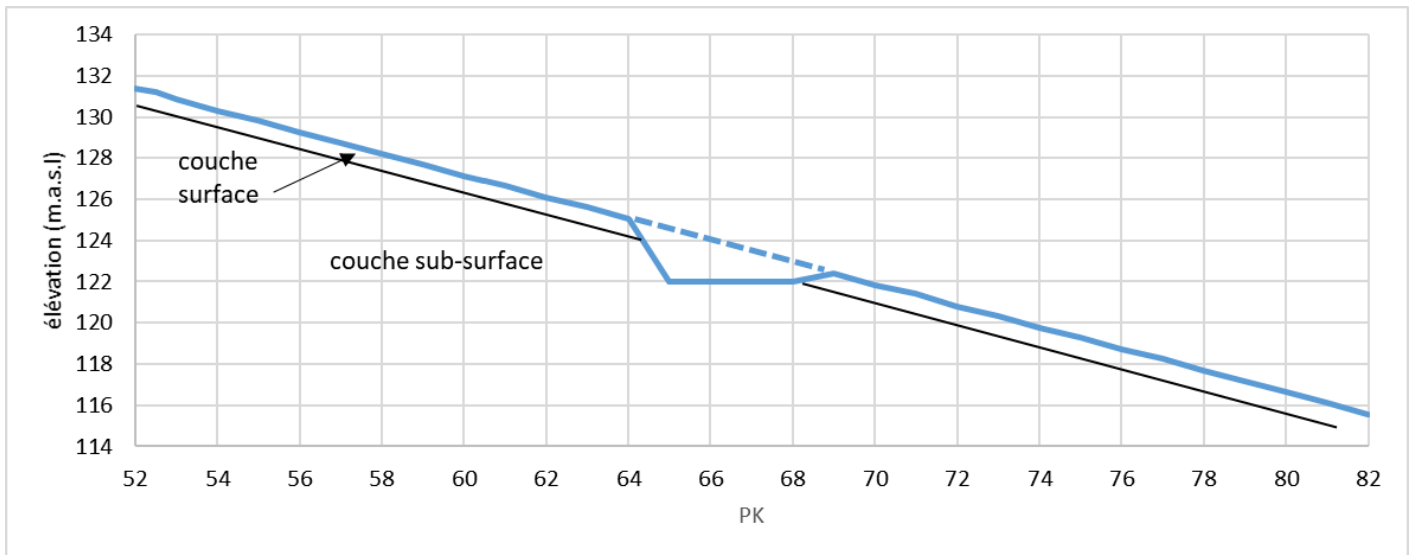


Figure 19 Retrait du volume dragué mettant en évidence l'incision dans la sub-surface. Notez que l'épaisseur de la couche de surface (10 cm) n'est pas à l'échelle.

Comme le montre le tableau 1, nous avons effectué des simulations pour déterminer comment le lit a évolué en réponse aux éléments suivants :

- 1) Barrages uniquement sur la période post-barrage
- 2) Barrages et dragage pendant la période post-barrage
- 3) Barrages et dragage à long terme
- 4) Barrages et dragage à long terme sans apport de sédiments

Résultats et discussion

Élévation du lit

La Figure 20 Profils longitudinaux mesurés en 1969-1974 présente l'élévation du lit mesurée au début et à la fin de la période post-barrage, comparée aux résultats du scénario 2. Les mesures montrent des changements locaux mais pas de changement dans la pente. Les résultats de la simulation ne montrent aucun changement significatif dans l'élévation du lit, en bon accord avec les données mesurées.

La Figure 21 montre la différence entre les élévations du lit de début et de fin pour les deux scénarios de la période post-barrage (1 et 2) et les deux scénarios à long terme (3 et 4). Les résultats dans le premier kilomètre du modèle doivent être ignorés en raison de la proximité de la limite amont. Les résultats à la fin de la période post-barrage montrent un lit presque stable avec un dépôt de 1 à 2 cm sur les 4 premiers kilomètres. Le scénario 3 indique un dépôt accru entre le barrage et le seuil qui se réduit considérablement dans le cas d'un apport de sédiments nul (scénario 4). Comme mentionné précédemment, la configuration du modèle ne permet pas aux sédiments de traverser le seuil, ce qui cause (ou contribue à) la déposition. On ne sait pas si dans la réalité le seuil permet le passage des sédiments. (une étude plus détaillée de l'impact du seuil sur le transport de la charge de fond devrait être menée avec un modèle 2D). Les changements de lit mesurés entre les PK 53 et 59 montrent une érosion mineure (entre 0.1- 0.8m), tandis que la zone juste en amont du seuil suggère un dépôt (Figure 20 Profils longitudinaux mesurés en 1969-1974). Le rapport de Laval et al. (2021) indique une érosion progressive dans les quatre premiers kilomètres juste en aval du barrage (30 cm entre 1977-1994) et un dépôt substantiel en amont du seuil (+7000 m³/an entre 1977-1994 et +5000 m³/an après 2000 - on ne sait pas quelle part de ces volumes sont des fines).

Les simulations montrent une érosion limitée en aval du seuil pendant la période post-barrage qui augmente sur le long terme (Figure 21). Les mesures indiquent une érosion de 0,9 m au PK 61 juste en aval du seuil (Figure 20 Profils longitudinaux mesurés en 1969-1974) et une érosion de 1 m plus en aval au PK63 (un petit seuil submersible existant juste en amont du pont SNCF au PK 62, qui n'est pas pris en compte dans le modèle, peut expliquer cela). Le PK 62,5 indique un lit plus bas, mais aucune référence n'existe pour la période 1969-1974. La confluence dans le modèle a été conçue au PK 64, cependant, en réalité, la confluence est plus proche du PK 63.3, et le dragage a probablement été exécuté à partir du PK63.1 (Figure 20 Profils longitudinaux mesurés en 1969-1974). Le rapport d'étude (Laval et al., 2021) indique également une érosion progressive en aval du seuil (-6000 m3/an).

Un dépôt est observé à la confluence dans les simulations (Figure 21), ce qui ne correspond pas aux données mesurées. Une analyse de sensibilité dans le modèle a indiqué une baisse des taux de transport de la charge de fond due à la combinaison de l'élargissement, du changement de pente (de la zone draguée) et de l'hydraulique. La confluence est une zone complexe à modéliser, et les résultats sont peut-être liés en raison des simplifications de notre modèle de cette région.

Enfin, en aval de la zone de dragage dans le réservoir, les simulations montrent une érosion (PK 58) et un dépôt mineur (PK 70-76 ; Figure 21). Le dépôt est observé dans les données mesurées entre PK 72-75 (Figure 20 Profils longitudinaux mesurés en 1969-1974). Le rapport d'étude de Laval et al. (2021) confirme le dépôt en aval de PK 73.

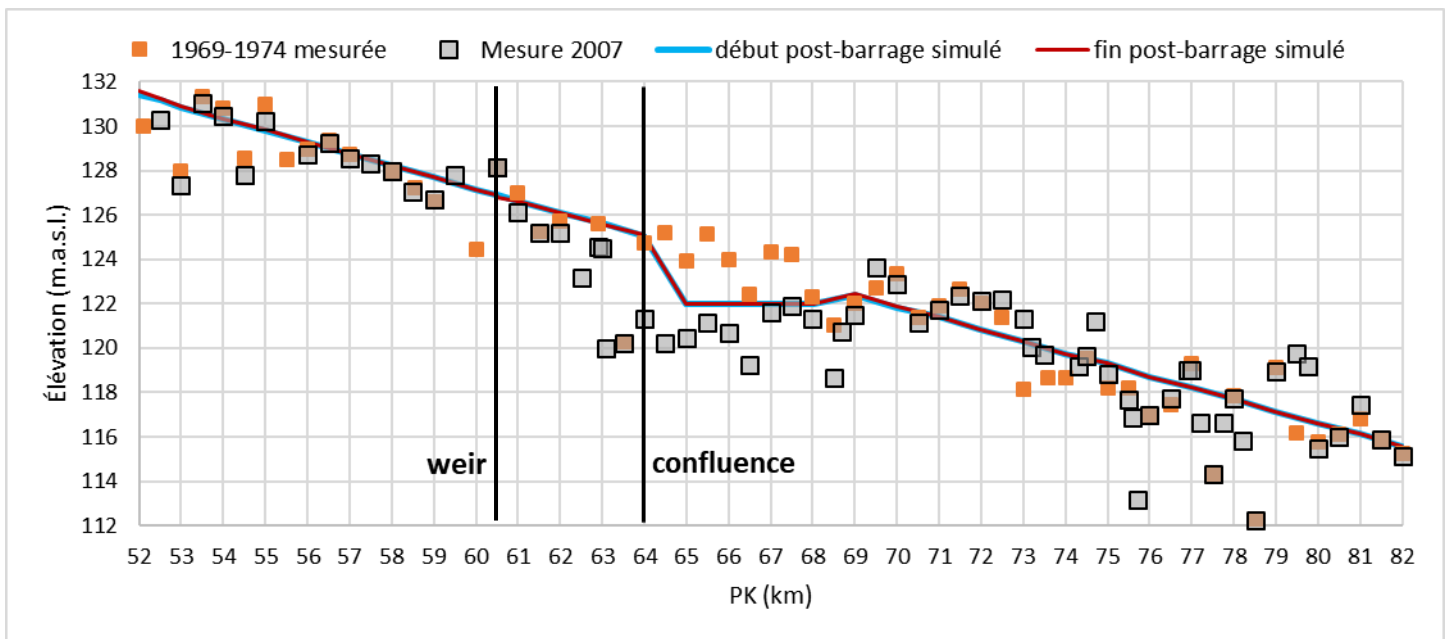


Figure 20 Profils longitudinaux mesurés en 1969-1974 (début de la période post-barrage) et 2007 (fin de la période post-barrage) et simulations au début et à la fin de la période post-barrage pour le scénario 2.

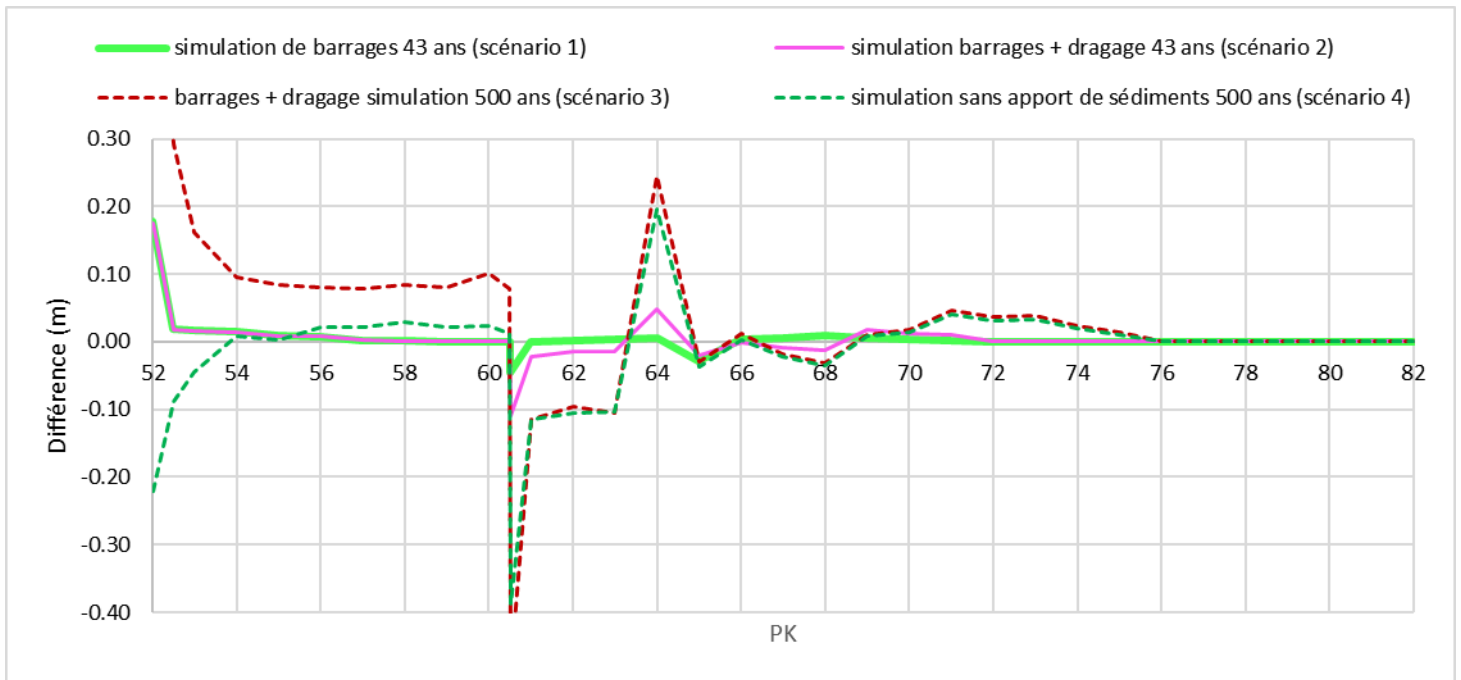


Figure 21 Différence d'élévation du lit pour les scénarios 1) barrages seulement, 2) barrages avec dragage 3) barrages à long terme avec dragage et 4) à long terme avec barrages et dragage sans apport de sédiments.

Distributions granulométriques

Les Figure 22 et 23 montrent comment la moyenne de la DG de surface simulée dans le RCC et la RT respectivement à la fin de la période post-barrage en réponse aux barrages et au dragage (scénario 2) se compare à toutes les mesures existantes dans chaque tronçon et à la moyenne de celles-ci. Dans le RCC, nous observons que la DG simulée est solidement dans la gamme des distributions mesurées et donc bien validée. En outre, le rapport de pavage (D_{50} surface / D_{50} sub-surface à la fin de la simulation est égal à 1,7 (23,8 mm / 14 mm). Cette valeur est proche des valeurs basées sur les mesures de Parrot (2015 ; Tableau 2).

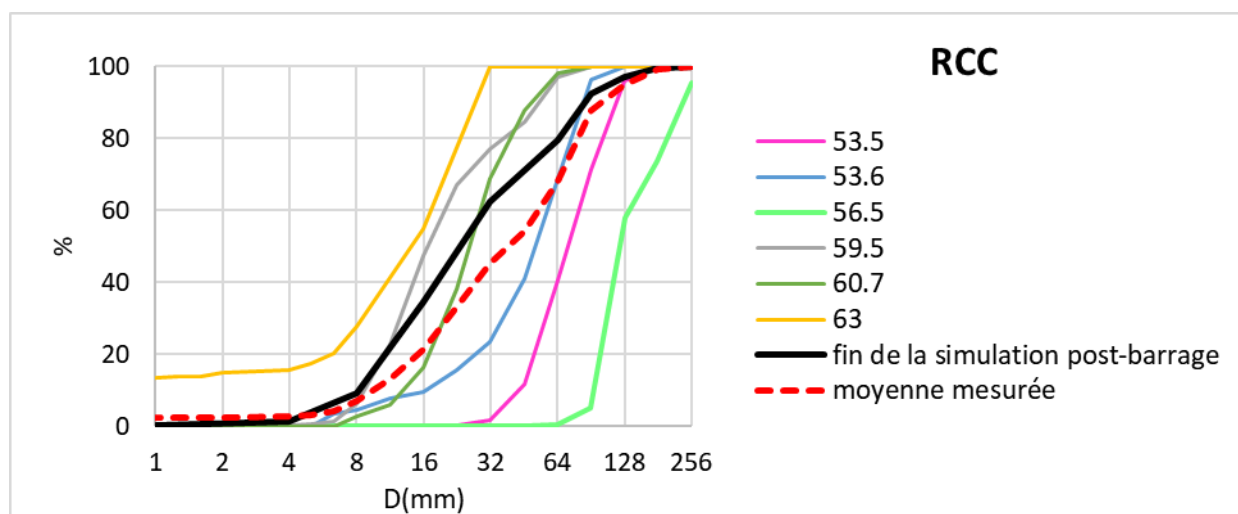


Figure 22 Granulométrie mesurée dans le RCC et moyenne (ligne rouge intermittente) comparée au résultat simulé (ligne noire) (la légende indique la localisation dans le PK).

Tableau 2 Résumé des ratios de pavage pour le tronçon PDR (Parrot, 2015)

PK	Taux de pavage
52,7	2,0
53,0	1,6
53,5	1,3
53,6	5,4
53,6	2,3
60,7	2,0
60,7	2,1
Moyenne	2,4

Dans le RT, nous observons que la fraction la plus grossière de la distribution simulée correspond bien aux distributions mesurées tout en montrant un pourcentage plus élevé de fines. Une hypothèse pour cette divergence est que le matériel plus fin a été perdu lorsque les échantillons, qui ont été collectés avec une drague, ont été soulevés à la surface, et donc sous-représentés dans les mesures. Une version modifiée de la DG simulée tronquée pour $D \leq 15$ mm montre en effet un meilleur ajustement avec les données mesurées. En raison du manque de mesures sous la surface dans la RT, il n'y a pas d'estimations des rapports de pavage. Néanmoins, le rapport de pavage pour la RT à la fin de la simulation est égal à 1,9.

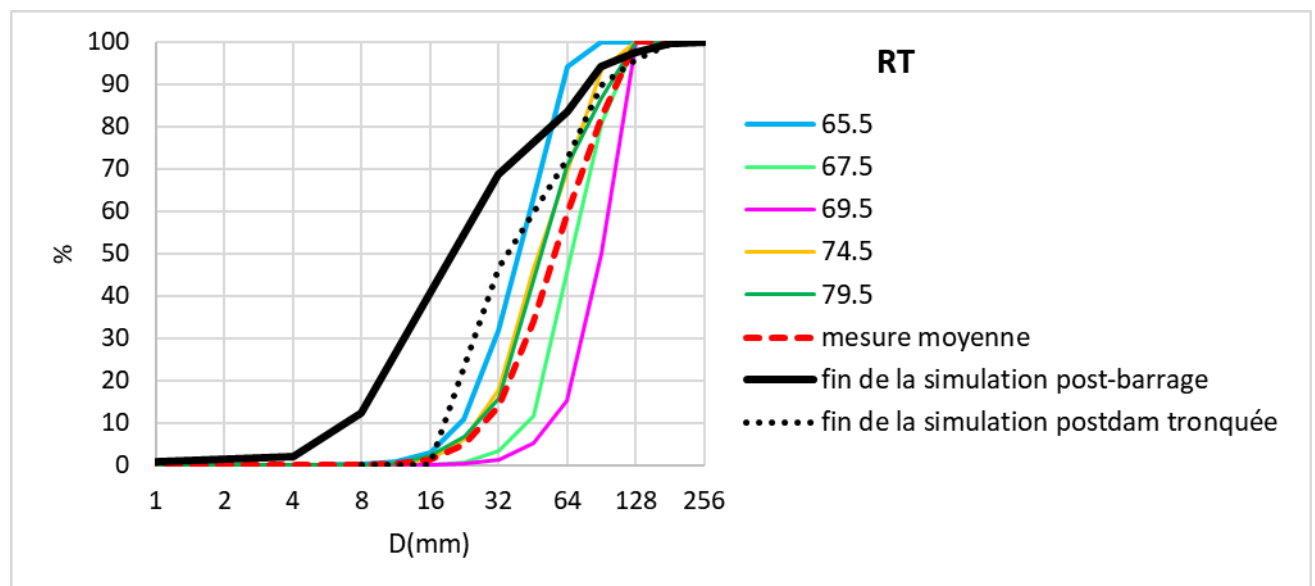


Figure 23 Granulométrie mesurée en RT et moyenne (ligne rouge intermittente) comparée au résultat simulé et tronqué à 16mm (la légende indique la localisation en PK).

La Figure 24A et B présente la DG de surface simulée pour les 4 scénarios pour le RCC et le RT respectivement. De très faibles changements sont observés, même pour les simulations à long terme. Le scénario 1 ne montre aucun changement observable dans la DG pour le RCC ou la RT. Seul le scénario 3 indique un changement plus observable dans le RCC finissant la surface en raison du dépôt. Dans le RT, la surface pour les scénarios 2, 3 et 4 est légèrement plus fine en raison de l'exposition de la couche de sub-surface plus fine où le lit a été dragué. La sub-surface montre un comportement similaire avec aucun changement significatif autre que l'affinement dans le scénario 3 dû au dépôt.

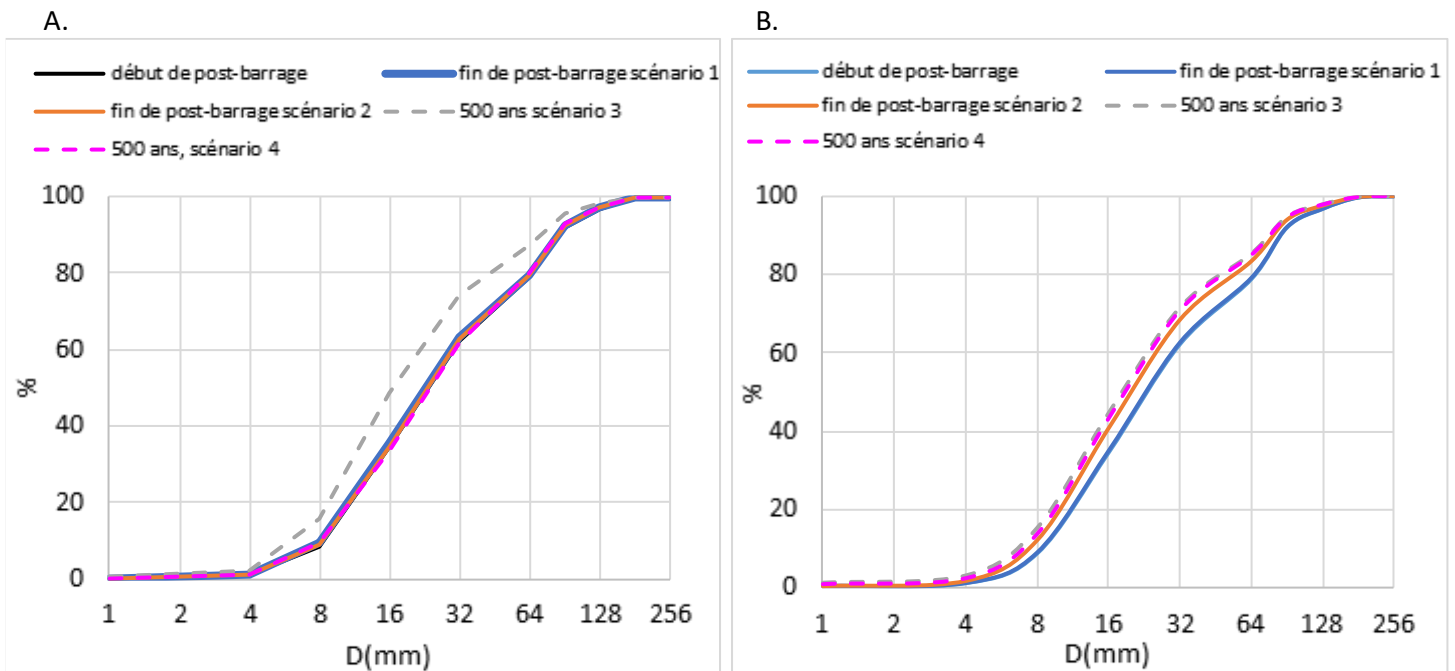


Figure 24 Résultats de la simulation pour le DG de surface pour les 4 scénarios A) en RCC et B) en RT

Résumé et conclusions

Les simulations hydrauliques dans le Basement utilisant des sections transversales réelles ont montré un très bon accord avec celles du modèle 1D Mage, ce qui nous a permis d'utiliser la même configuration de modèle avec notre grille rectangulaire simulée. Cependant, malgré la disponibilité de sections transversales mesurées, nous avons continué à utiliser des sections transversales rectangulaires pour simuler la période post-barrage. Nous considérons que cela est plus robuste pour étudier l'évolution du lit à long terme, car il est plus facile d'interpréter les tendances et évite de mal interpréter les changements dus aux fluctuations de la topographie locale du lit.

L'élévation du lit simulée a montré un bon accord avec les mesures sur la période post-barrage - les deux ne montrent aucun changement significatif dans l'élévation ou la pente du lit. Les simulations n'indiquent pas non plus de changements significatifs dans la DG de surface ou de sub-surface en réponse aux barrages et au dragage.

Un examen détaillé des différences d'élévation du lit a montré diverses tendances le long de différentes parties du tronçon, mais ces changements étaient tous très petits (échelle cm) et évoluaient très lentement. Ces changements locaux mineurs dus au dépôt et à l'érosion sur des échelles de temps courtes et longues sont en accord avec les observations des mesures et les résultats de Laval et al. (2021) confirment que notre modèle reproduit correctement le comportement du chenal sur la période post-barrage. Une exception à cela est le comportement du modèle dans la zone de la confluence qui montre des dépôts. Nous attribuons cela à l'utilisation d'un modèle 1D simplifié pour une région complexe. Sur la base de ces résultats, nous concluons que les barrages et le dragage n'ont pas eu d'impact significatif sur le tronçon PDR et que le lit, qui était déjà stable au début de la période post-barrage, n'a pas évolué au cours de la période post-barrage. Ce résultat confirme l'avis générale des gestionnaires de rivière.

5.4. Taux de transport actuels par fraction granulométrique

Configuration et validation du modèle

Nous avons simulé le lit actuel en utilisant l'état final du lit et sa composition obtenus à la fin de la simulation de la période post-barrage. Nous avons effectué une simulation sur une seule année avec de petits pas de temps afin d'estimer le flux de charriage à différents débits. Nous avons calculé les taux de transport du lit par fraction granulométrique pour Q10 (le débit le plus élevé que nous avons simulé, correspondant à 99,8% de notre courbe de durée de débit et équivalent à 2400 m³/s dans le RCC) et nous les avons utilisés pour calculer les volumes de transport annuels totaux. Nous avons également analysé l'impact des endiguements, des barrages et du dragage sur les taux de transport de la charge en comparant les taux totaux et cumulés au début de chaque période.

Aucune mesure n'est disponible pour valider les estimations actuelles du transport du lit. Néanmoins, nous avons comparé les résultats obtenus en utilisant des sections transversales rectangulaires avec des sections transversales mesurées. Nous avons également analysé les différences entre l'utilisation d'un DG moyen par sous-tronçon et les valeurs interpolées de D50 par section transversale lors de l'utilisation de sections transversales mesurées. Enfin, nous avons comparé nos résultats avec les estimations du transport du substratum rocheux basées sur les travaux menés dans le cadre de l'OSR4 (rapport OSR4 I.4, 2017). Bien qu'elles ne soient pas considérées comme une validation, ces comparaisons servent à mettre en évidence l'impact de la configuration et de l'approche du modèle sur les résultats.

Résultats et discussion

Les Figure 25 et 26 montrent respectivement les taux et les volumes de transport des charges de fond par fraction granulométrique pour une grande crue (Q10) et la valeur totale cumulée. En général, ces figures montrent que les taux et volumes de transport sont très faibles et qu'ils sont variables sur le tronçon. Comme on peut s'y attendre, il n'y a presque pas de transport en amont du seuil et en aval dans le réservoir.

La fraction granulométrique la plus présente dans le flux de la charge (D = 16-32 mm) correspond à la fraction la plus présente dans le lit (D50 = 24 mm dans le RCC).

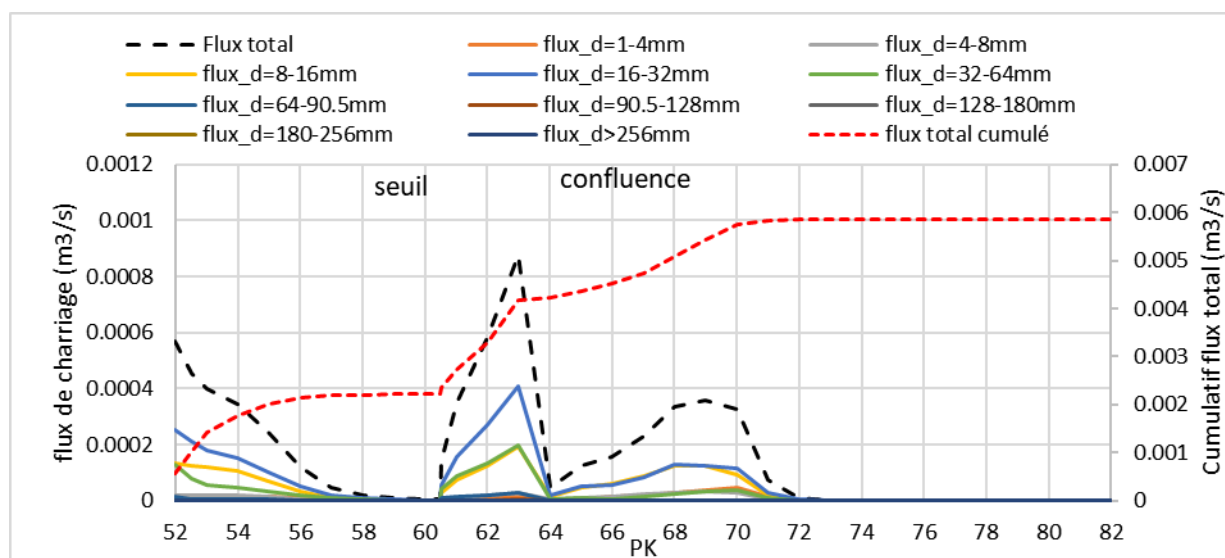


Figure 25 Transport fractionné pour Q10 pour le lit actuel

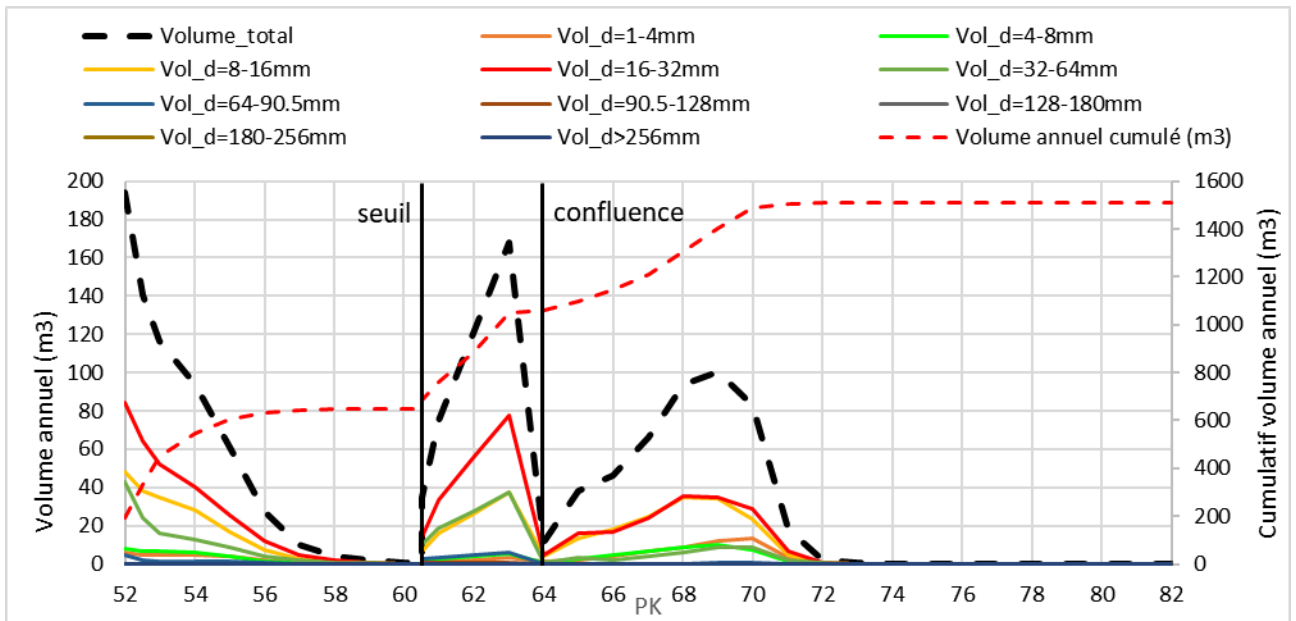


Figure 26 Volumes annuels de transport de la charge du lit pour Q10 par classe de grain et cumulés sur le lit actuel

La Figure 27 montre une comparaison entre les flux totaux simulés de la charge du lit à Q10 au début de la période post-endiguements, au début de la période post-barrage et au jour présent. La Figure 28 montre les valeurs cumulées. Les deux figures soulignent une fois de plus que les taux de transport sont très faibles pour toutes les périodes. Comme on pouvait s'y attendre, les taux de transport pendant la période post-endiguements étaient uniformes sur l'ensemble du tronçon. A partir de la période post-barrage, la mise en place des structures hydrauliques et le partage et la restitution du débit conduisent à une hétérogénéité du flux de charriage le long du tronçon. Les flux actuels montrent une réduction des pics survenant à PK 63 et entre PK 65 et 68. Nous attribuons cela à un aplanissement progressif du lit au cours de la période post-barrage. Nous n'avons pas d'explication quant à la raison pour laquelle les taux de transport augmentent à la prise d'eau pendant la période post-barrage, ce qui correspond à un dépôt mineur (voir Figure 21). Les taux cumulatifs à Q10 (Figure 10) montrent des valeurs de flux total plus élevées après la construction du barrage et peu de différence avec la situation actuelle. Nous attribuons cette augmentation à une hétérogénéité accrue induite par un hydraulique variable.

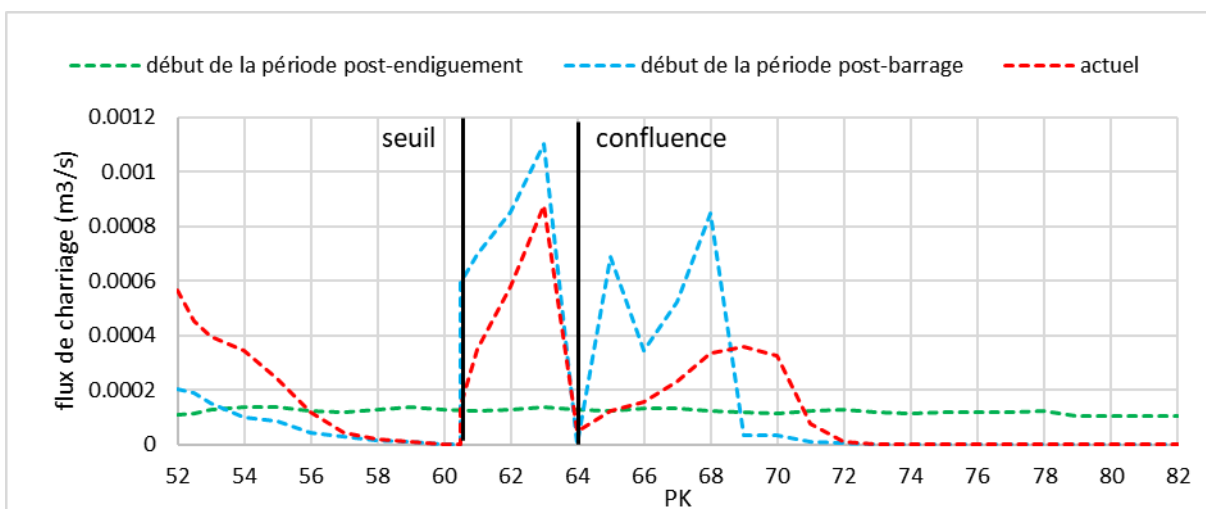


Figure 27 Transport total de la charge du lit pour Q10 pour le lit au début de la période post-endiguements, au début de la période post-barrage et à l'heure actuelle.

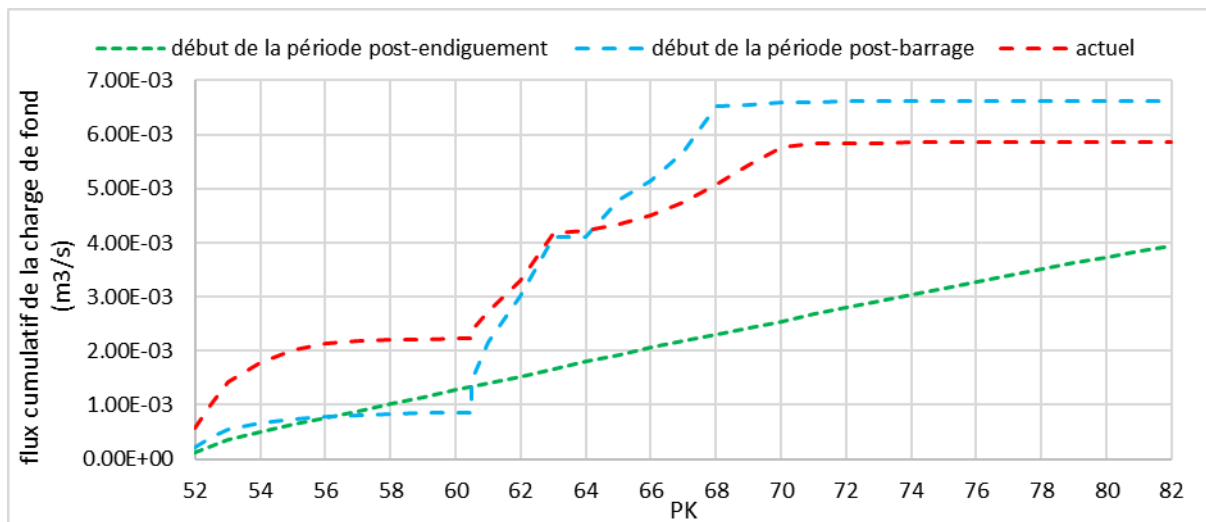


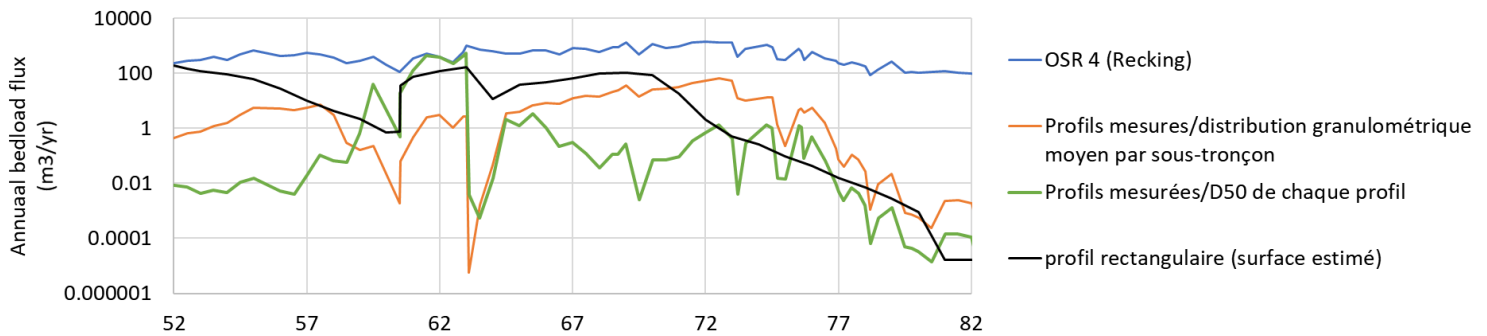
Figure 28 Transport total cumulé de la charge du lit pour Q10 pour le lit au début de la période post-endiguements, au début de la période post-barrage et à l'heure actuelle.

Comparaison avec d'autres estimations

Nous avons comparé nos estimations de flux basées sur l'équation de Wilcock et Crowe implémentée dans Basement avec des sections transversales rectangulaires simulées et une DGE de surface moyenne avec celles estimées dans le RSO4 sur la base de la formule de Recking (OSR4 report I.4, 2017) et d'une interpolation de la DG de surface mesurée. Nous avons également comparé nos résultats avec ceux de notre modèle en utilisant différentes approches : a. des sections transversales mesurées couplées à une DG de surface moyenne mesurée par sous-tronçon (RT, RCC), et b. des sections transversales mesurées couplées uniquement à une D50 par section transversale interpolée à partir des valeurs mesurées. Les résultats sont présentés dans la Figure 29 et B.

Les trois estimations basées sur la formule de Wilcock et Crowe (mise en œuvre dans Basement) sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur aux flux estimés dans l'OSR4 à l'aide de l'équation R, en raison des différences inhérentes entre ces formules. Cependant, les trois simulations utilisant l'équation WC dans Basement montrent un ordre de grandeur similaire et un flux total cumulé similaire. Les différences entre les trois approches sont locales et résultent de variations topographiques et de différences dans la taille des grains. Par exemple, à l'entrée (PK52), les flux basés sur des simulations utilisant des sections transversales mesurées et une DG moyenne sont plus importants que les taux basés sur une DG interpolée. Les simulations basées sur des sections transversales rectangulaires montrent des taux encore plus élevés d'un autre ordre de grandeur. Ces différences peuvent s'expliquer par une DG localement plus grossière et une pente plus douce entre les PK 52 et 57. Le flux cumulé total similaire entre ces deux approches souligne que notre choix de sections transversales rectangulaires et de DG moyenne est approprié pour étudier les tendances générales des flux le long du tronçon. Les autres approches seraient plus appropriées pour étudier la variabilité des flux le long du tronçon.

A.



B.

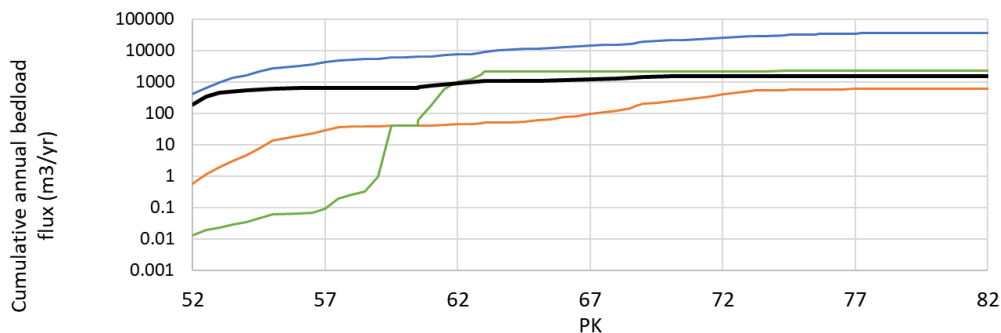


Figure 29 Flux annuel de charriage le long du tronçon PDR estimé avec différentes méthodes (A). Flux annuel cumulé de sédiments le long du tronçon PDR estimé par différentes méthodes (B).

Résumé et conclusions

Dans l'ensemble, les taux de transport de sédiments simulés et les volumes annuels sont très faibles dans le tronçon PDR. La variabilité le long du tronçon est liée aux barrages et au dragage, mais l'ordre de grandeur reste le même. En d'autres termes, en raison du très faible transport de charriage déjà présent dans le lit, l'impact des barrages et du dragage est très limité.

Les taux estimés de transport de charriage basés sur le modèle morphodynamique 1D implémenté dans Basement sont inférieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux obtenus dans l'OSR4 en raison des différences inhérentes entre les formules de transport de charriage. Nous n'avons pas observé de différences majeures dans les ordres de grandeur des flux dus à l'utilisation d'une géométrie de chenal rectangulaire simplifiée par rapport aux sections transversales mesurées ou interpolées par rapport à la DG moyenne. En tant que tel, nous considérons que le modèle simplifié est bien adapté pour étudier les tendances générales et les ordres de grandeur. Des modèles plus détaillés devraient être utilisés pour étudier les effets des changements locaux dans la topographie et la taille des grains.

5.5. Réinjection de sédiments

Configuration et validation du modèle

Nous avons réalisé une série de simulations sur notre lit actuel modélisé afin d'étudier l'évolution et les impacts d'une réinjection de sédiments effectuée près de PK52,5 le 27 mars 2017. Un volume total de 7000 m³ (porosité comprise) de matériaux qui avaient été retirés des marges dans le cadre des opérations de démantèlement des Casiers Girardon a été réinjecté dans le chenal. Sur la base d'une porosité estimée à 25% (typique des rivières à lit de gravier, par exemple Bui et al. (2019); Frings et al.(2008)), nous avons introduit un volume de 6500 m³ de sédiments sans porosité dans le modèle. Quatre échantillons de granulométrie ont été prélevés dans le matériau réinjecté, et une distribution granulométrique moyenne a été reconstruite à partir de ceux-ci. La Figure 30 montre la distribution granulométrique de la réinjection comparée à la surface et à la sub-surface simulées du chenal et à la surface mesurée du chenal et à la sub-surface des bancs. Elle montre que le matériau réinjecté est fin comparé à toutes les distributions granulométriques mesurées et simulées dans le chenal et qu'il est le plus similaire à la DG de la sub-surface des bancs.

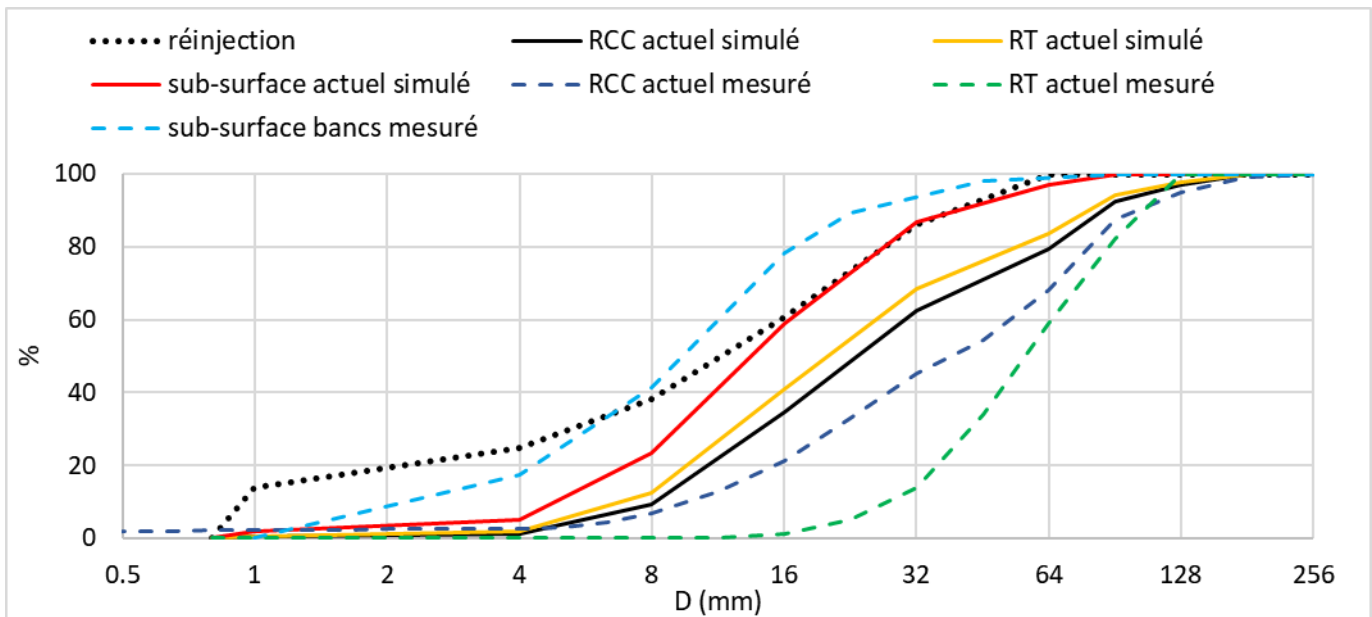


Figure 30 Granulométrie du matériau réinjecté comparée aux données simulées et mesurées dans le lit et les bancs.

Les réinjections simulées ont été implémentées à PK52.5, immédiatement en aval du barrage, comme dans le cas de la réinjection réelle. Basement implémente automatiquement une réinjection sous la forme d'une pyramide avec une élévation maximale au site de dépôt qui s'étend jusqu'à la section transversale suivante en amont et en aval (étant donné que nos sections transversales sont espacées de 500 m, la réinjection s'étendait sur 1 km de long). Etant donné que notre modèle est unidimensionnel, la largeur est uniforme.

Le tableau 3 résume les simulations réalisées dans lesquelles nous avons fait varier l'apport de sédiments, le volume réinjecté et la granulométrie. La seule granulométrie uniforme utilisée était de 22,6 mm (classe 16 - 32 mm), équivalente à la D50 de la DG moyenne modélisée sur l'ensemble du tronçon.

Tableau 3 Résumé des scénarios de réinjection simulés sur le lit actuel

Scénario	Volume de matériau réinjecté	DG de matière réinjectée	Q	Apports de sédiments - Qs
1	6500	Mesuré	hydrogramme annuel moyen	Apports annuel moyen
2	6500	Mesuré	hydrogramme annuel moyen	pas d'apports
3	6500	une seule taille de grain uniforme	hydrogramme annuel moyen	Apports annuel moyen
4	50000	Mesuré	hydrogramme annuel moyen	Apports annuel moyen
5	50000	une seule taille de grain uniforme	hydrogramme annuel moyen	Apports annuel moyen

La réinjection de sédiments exécutée en 2017 dans la RDP a été suivie par des relevés répétés de traceurs RFID (Geopeka, 2019). Nous avons comparé les tailles des traceurs et leurs distances de déplacement avec nos simulations à titre de validation préliminaire. Par ailleurs, dans un travail mené en parallèle de celui-ci (actions A2.2 et A2.4), Daniel Vazquez-Tarrio a développé un modèle statistique pour estimer le déplacement des traceurs. Nous avons comparé les résultats des deux méthodes.

Résultats et discussion

Élévation du lit

Nous examinons l'impact du volume de réinjection (scénarios 1 et 4) sur l'élévation du lit 50 ans après la réinjection (Figure 31). Après 50 ans, dans les deux scénarios, nous observons que les sédiments réinjectés se sont propagés légèrement en aval et se sont déposés en amont du seuil. Comme mentionné précédemment, le seuil dans le modèle ne permet pas aux sédiments de passer, les impacts en aval du seuil sont donc très limités.

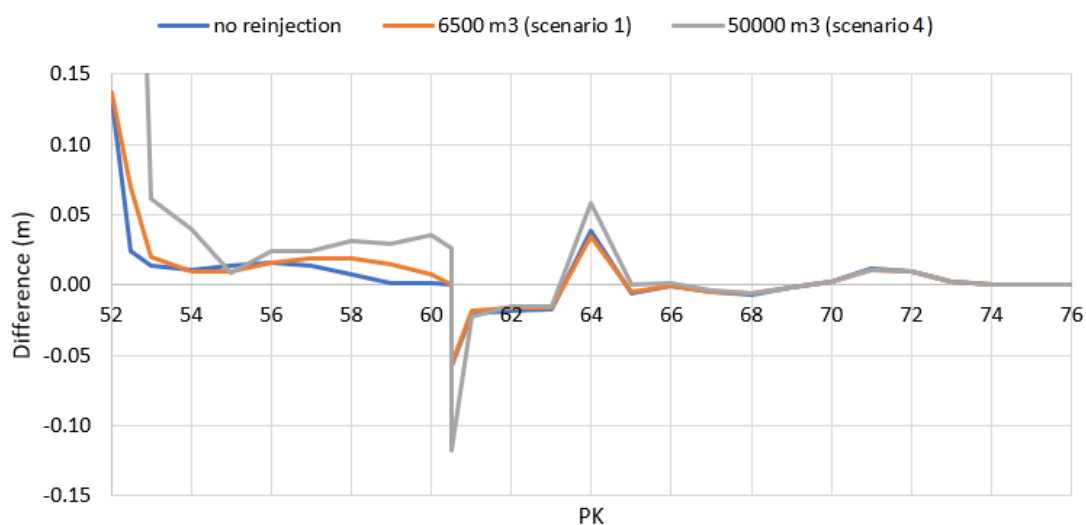


Figure 31 Différence d'élévation du lit après 50 ans en comparant différents volumes de réinjection

De plus, nous avons évalué l'impact de l'absence d'apport de sédiments (scénario 2) sur l'évolution du lit pour un volume de réinjection de 6500 m³ (Figure 32). Nous observons une érosion plus importante des sédiments dans le scénario 2 (aucun apport) par rapport au scénario 1 (faible apport). Ce résultat souligne l'importance d'avoir une valeur précise pour l'apport de sédiments lors de la modélisation des réinjections de sédiments, car la valeur utilisée aura un impact sur les modèles de dépôt et d'érosion en aval.

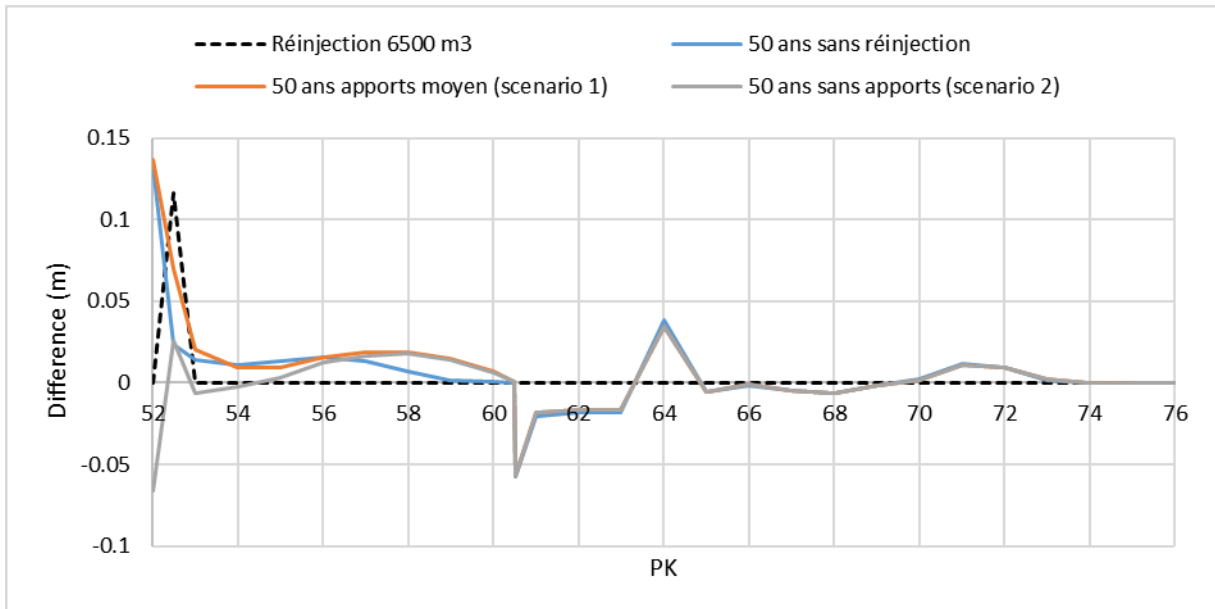


Figure 32 Différence de l'élévation du lit 50 ans après une réinjection de 6500 m³, en comparant avec et sans apport de sédiments

Enfin, nous avons comparé une réinjection avec la DG réelle mesurée à une réinjection avec une granulométrie uniforme 6500 m³ et 50 000 m³ (Figure 33 et Figure 34 respectivement). Dans les deux volumes, la pile de sédiments s'érode beaucoup plus rapidement avec la granulométrie unique.

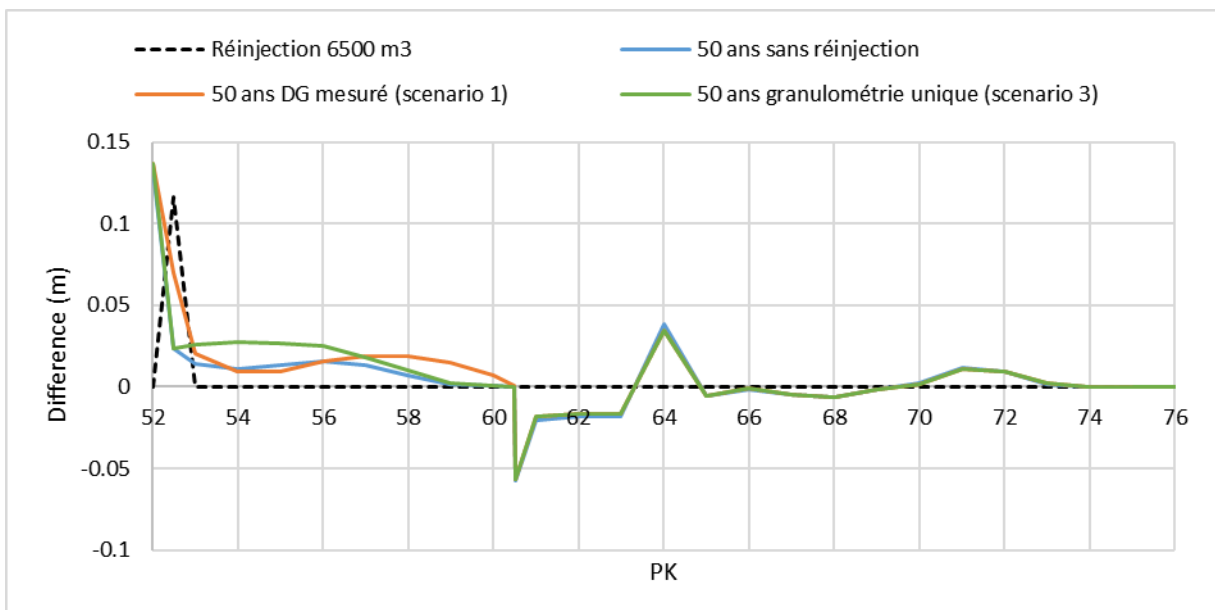


Figure 33 Différence de l'élévation du lit 50 ans après une réinjection de 6500 m³, en comparant la DG mesurée et la granulométrie uniforme simple.

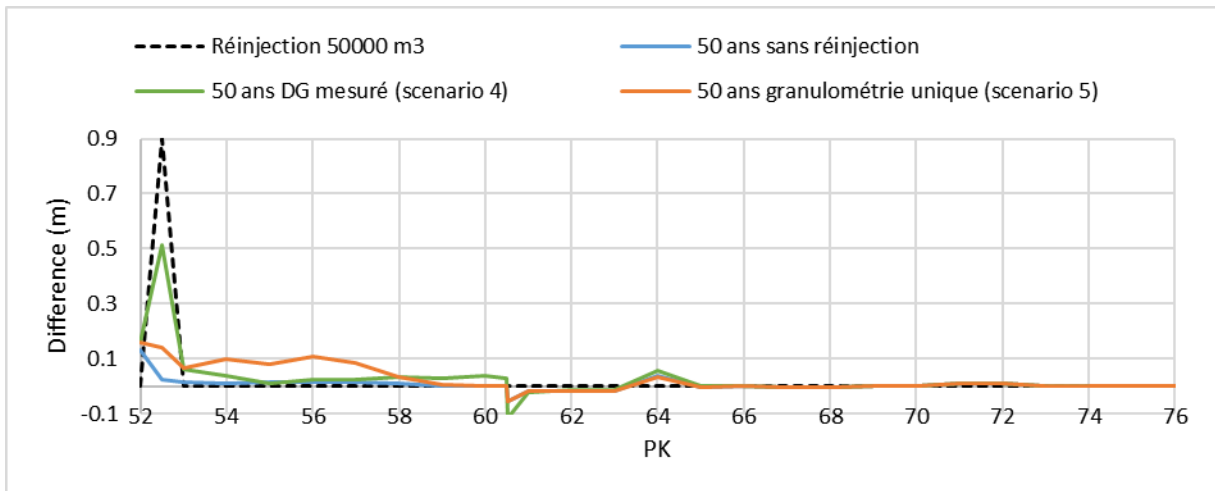


Figure 34 Différence de l'élévation du lit 50 ans après une réinjection de 50 000 m³, en comparant la granulométrie mesurée et la granulométrie uniforme simple.

Distributions granulométriques

Nous avons évalué l'impact des différents scénarios de réinjection sur la distribution de la taille des grains en surface. La granulométrie a été évaluée au PK 58 - immédiatement en aval de la réinjection. Pour rappel, les sédiments réinjectés étaient plus fins que la surface du lit actuel (Figure 30).

Les Figure 35A et B montrent l'impact des volumes de réinjection (scénario 1 et 4 respectivement) sur la surface du lit 50 ans après la réinjection. Elles montrent que la surface est devenue légèrement plus fine dans les deux cas et un peu plus avec le plus grand volume de réinjection. Aucune modification du DG de la surface n'a été observée plus en aval.

Les simulations de réinjections avec une granulométrie uniforme (scénarios 3 et 5) sont présentées dans la Figure 35C et D respectivement. Dans le cas du plus grand volume de réinjection, un affinage plus important se produit entre les fractions de taille 16-32 mm. Dans l'ensemble, il n'y a pas de grandes différences par rapport aux réinjections avec une granulométrie mesurée (Figure 35A et B).

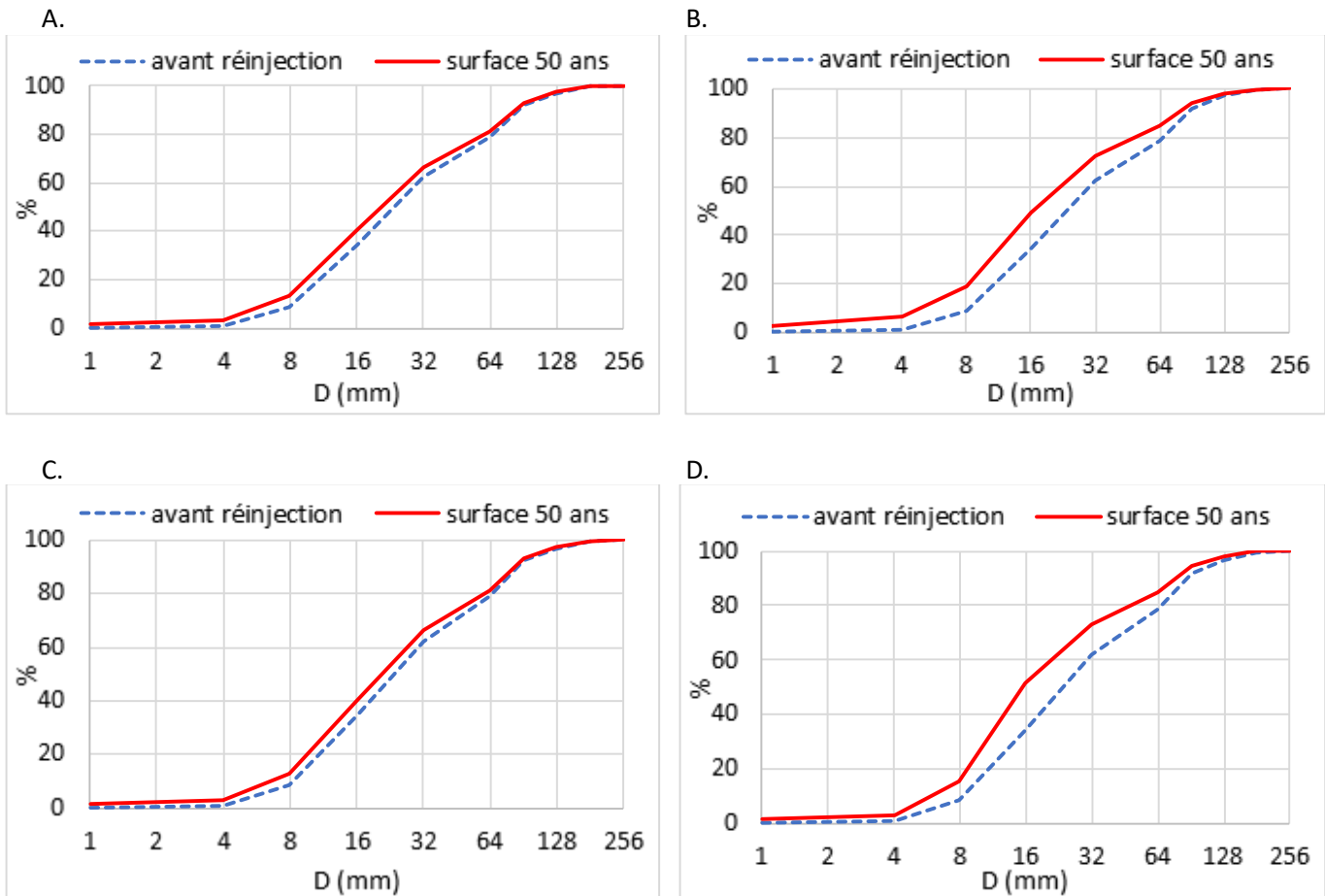


Figure 35 DG en aval de la réinjection des sédiments (PK 58) pour 6500 m3 (A) (scénario 1) et 50 000m3 (B) (scénario 4) pour 6500 m3 avec une seule granulométrie (C) (scénario 3) et 50 000m3 avec une seule classe de grain (D) (scénario 5)

Flux fractionné de la charge du lit

Nous avons évalué les impacts des scénarios de réinjection sur le flux de charriage par fraction de taille. La Figure 36 montre les taux de transport fractionnel du charriage à Q10 (2400 m3/s dans le RCC) pour une réinjection de 6500 m3 (scénario 1). Elle montre des tendances similaires aux taux de transport fractionnés montrés dans la Figure 25 sans la réinjection. La Figure 37 compare le flux de charriage total et cumulé à Q10 avec et sans réinjection. Nous constatons une augmentation des taux de transport au niveau du site de réinjection (PK 52,5 -55) et que le taux de transport total cumulé a été doublé en raison de la réinjection.

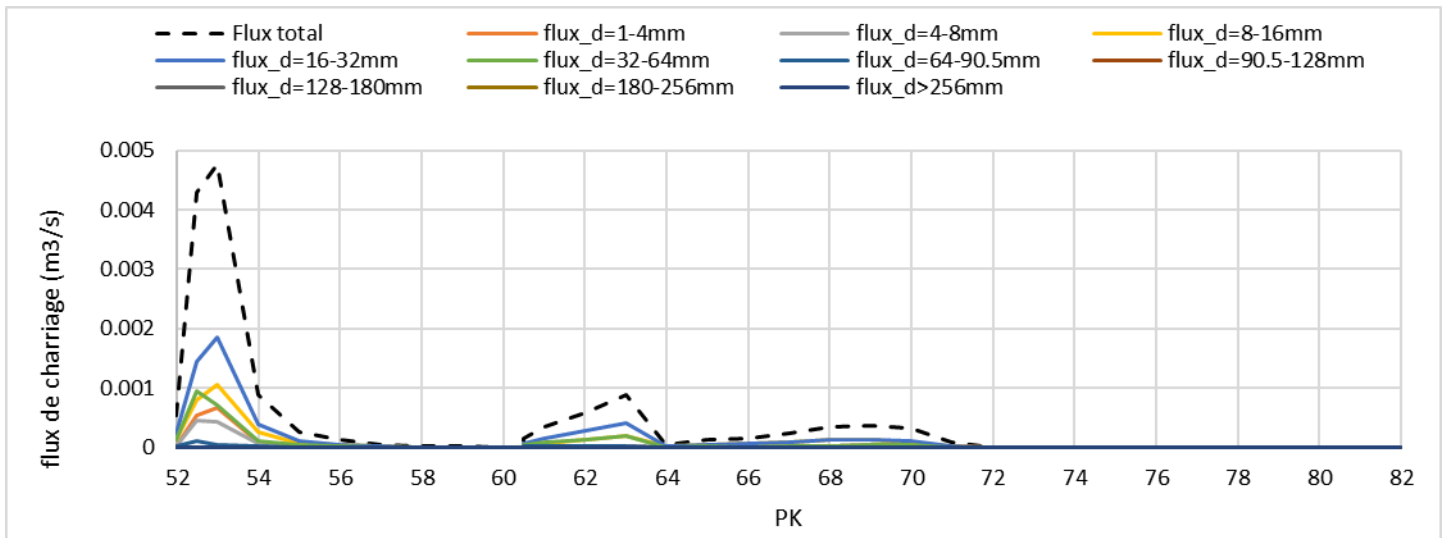


Figure 36 Flux de charriage par classe granulométrique avec réinjection de 6500m3 à Q10

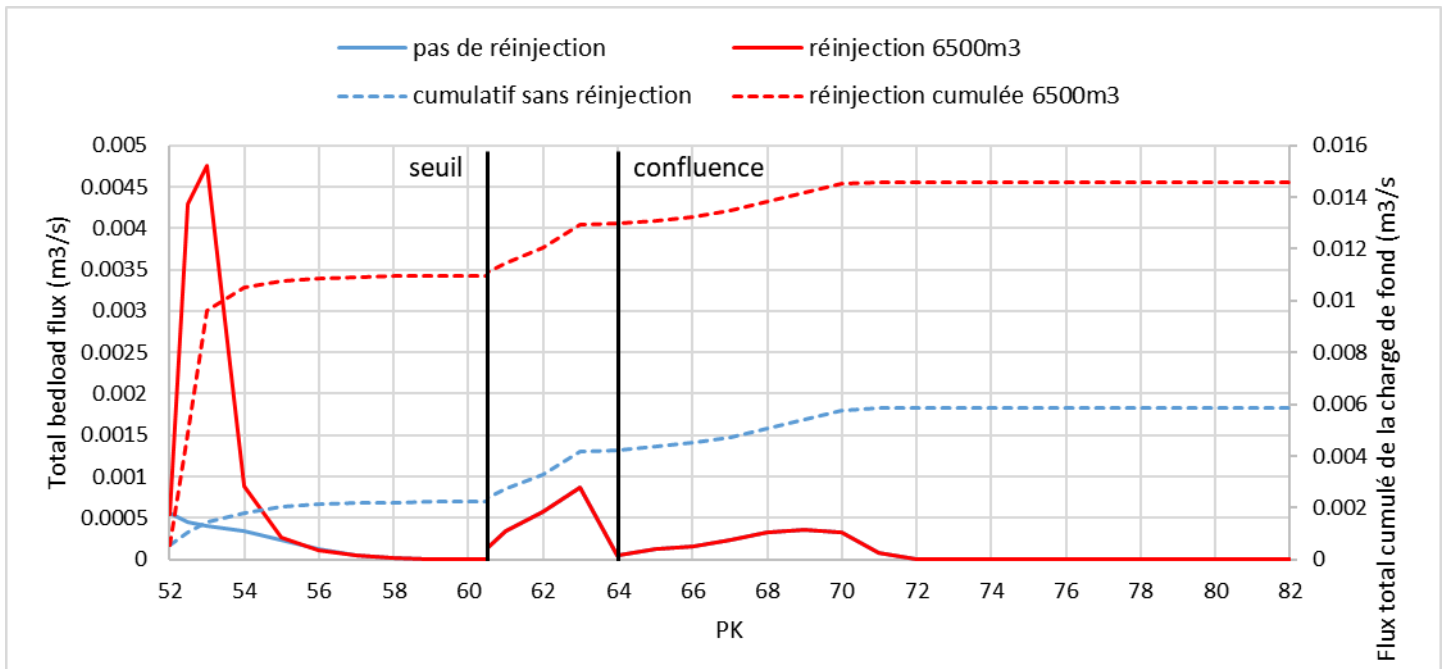


Figure 37 Comparaison du flux total du lit avec et sans réinjection 6500m3 à Q10

Pour avoir une indication du débit nécessaire à la mobilisation de l'amas de sédiments, nous avons comparé les flux de charriage total à différents débits (Figure 38). Le flux de charriage à Q99,8 sans réinjection est inclus pour comparaison. Nous observons une réduction rapide des taux de transport lorsque le débit est réduit à partir de Q99,8% (2400 m³/s en RCC). A Q95% (830 m³/s dans RCC) le flux est encore légèrement plus élevé au site de réinjection comparé à l'absence de réinjection à Q99,8%. A Q90% (386 m³/s en RCC) le taux est négligeable et on peut supposer que les sédiments de la réinjection ne se déplaceront plus.

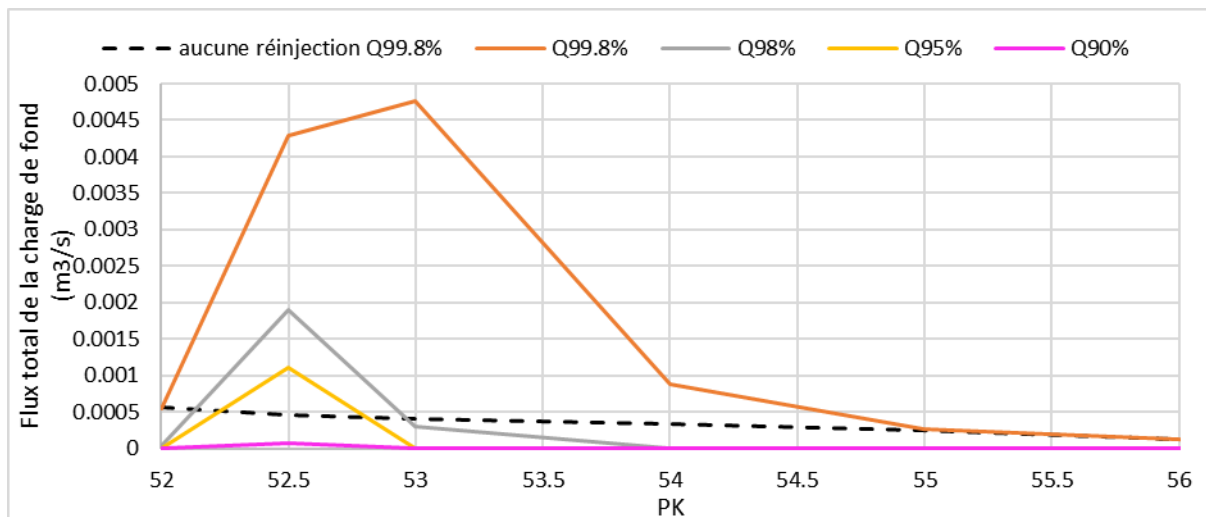


Figure 38 Flux de charriage total pour différents Q au cours de la première année après réinjection, comparé au flux de charriage total le plus élevé sans réinjection (ligne intermittente).

Validation et comparaison des modèles

Le suivi RFID (Geopeka, 2019) a montré que les débits de l'ordre de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ne transportaient pas beaucoup de sédiments, en accord avec nos résultats (Figure 38). Une distance de déplacement moyenne de 400 m a été observée sur une période de 7 mois (550 m lorsque seuls les traceurs trouvés dans le chenal et non dans les berges sont considérés). Un déplacement maximal de 1,8 km a été mesuré.

Afin de comparer plus directement nos simulations avec le suivi RFID, nous avons simulé la réinjection avec le débit mesuré pendant les 7 mois suivant la réinjection (mesures effectuées par Geopeka dans le RCC). Pour ces données mesurées, on ne connaît pas le débit détourné vers le chenal en période d'étiage. Cependant, comme il n'y a pas eu de mouvement des sédiments réinjectés pour les débits inférieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$, nous avons ignoré tous les débits $< 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour les débits plus élevés, nous avons supposé qu'un débit maximal était détourné vers le chenal. La Figure 39 montre l'élévation du lit à la fin de la simulation de 7 mois. Elle confirme que les déplacements mesurés par la surveillance RFID sont du même ordre que les distances sur lesquelles les changements d'élévation du lit se sont produits dans notre simulation. Alors que la simulation montre une petite quantité de dépôt s'étendant jusqu'au PK 56, 3,5 km en dessous du point de réinjection, la majorité se produit au PK 54, 1,5 km en aval du point de réinjection.

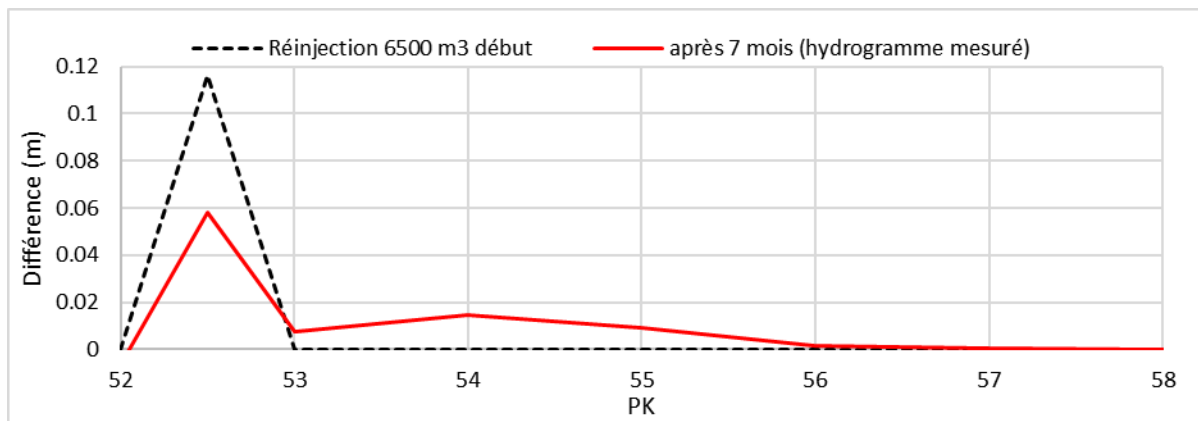


Figure 39 Changements de l'élévation du lit 7 mois après la réinjection de 6500 m3 avec l'hydrogramme mesuré

Dans l'action 2.4 de l'OSR 5, Vazquez-Tarrio a développé un modèle (appelé ici modèle VT) pour estimer la propagation des particules à partir des réinjections de sédiments. Ce modèle ne prend pas en compte l'interaction entre les sédiments réinjectés et le lit. La Figure 40 et la Figure 41 montrent une comparaison des deux approches pour les mêmes conditions hydrauliques et de réinjection (6500 m³, DG réel). Nous n'avons pas inclus d'apport de sédiments dans le Basement afin de mieux comparer avec le modèle VT qui, pour l'instant, ne prend pas en compte les sédiments. Il faut noter que le modèle VT fournit des volumes de particules déplacées alors que le modèle Basement fournit l'élévation du lit. De plus, dans le modèle VT, le seuil n'affecte le transport du lit que de manière hydraulique, tout en permettant physiquement à toute la charge de passer (dans le modèle Basement, aucun sédiment ne passe par le seuil). Néanmoins, malgré ces différences, une comparaison qualitative des changements dans le temps et l'espace peut être faite.

Les Figure 40A et B comparent les volumes transportés et les changements de l'élévation du lit un an après la réinjection en se basant sur les deux modèles respectivement. Les deux modèles montrent que la majorité du déplacement des sédiments et des changements de l'élévation du lit se produit dans les 2 premiers kilomètres du tronçon et qu'il n'y a pas d'impact en aval de PK 55. La concordance entre les modèles est également observée dans la comparaison des volumes cumulés issus des deux modèles dans la Figure 40C.

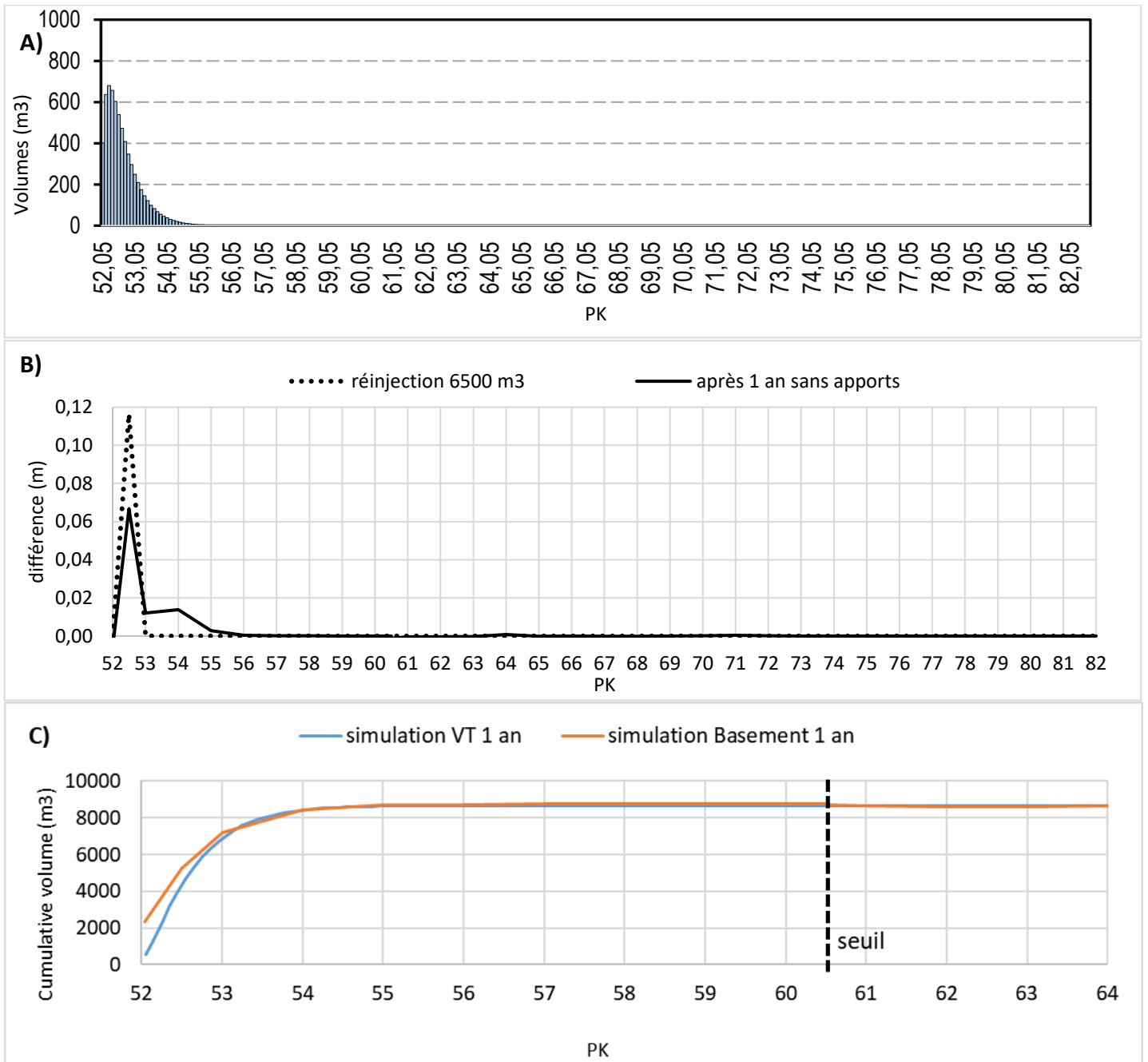


Figure 40 A) Volumes transportés 1 an après réinjection (6500 m³) d'après le modèle de Vazquez-Tarrio (action 2.4), B) changements de l'élévation du lit par rapport au lit actuel 1 an après réinjection d'après le modèle Basement et C) comparaison des volumes cumulés des deux modèles après 1 an

Les Figure 41A et B comparent les volumes transportés et les changements de l'élévation du lit 50 ans après la réinjection en se basant respectivement sur les deux modèles. Les volumes du graphique A ont été déplacés vers l'aval, la majorité restant en amont du seuil au PK 59. De plus petits volumes ont traversé le seuil. Ce résultat suggère que les impacts hydrauliques du seul seuil sont suffisants pour retenir les sédiments en amont. La figure B présente les résultats du scénario 2 (tableau 3 et Figure 32). Le dépôt résultant de la réinjection se produit entre PK 55-60 puisque les sédiments ne peuvent pas traverser le seuil. Le comportement similaire des deux modèles est confirmé par la Figure 41 C, qui présente les volumes cumulés après 50 ans. Cette figure met en évidence la forte augmentation cumulée du volume en amont du seuil et l'absence d'impact dans le réservoir.

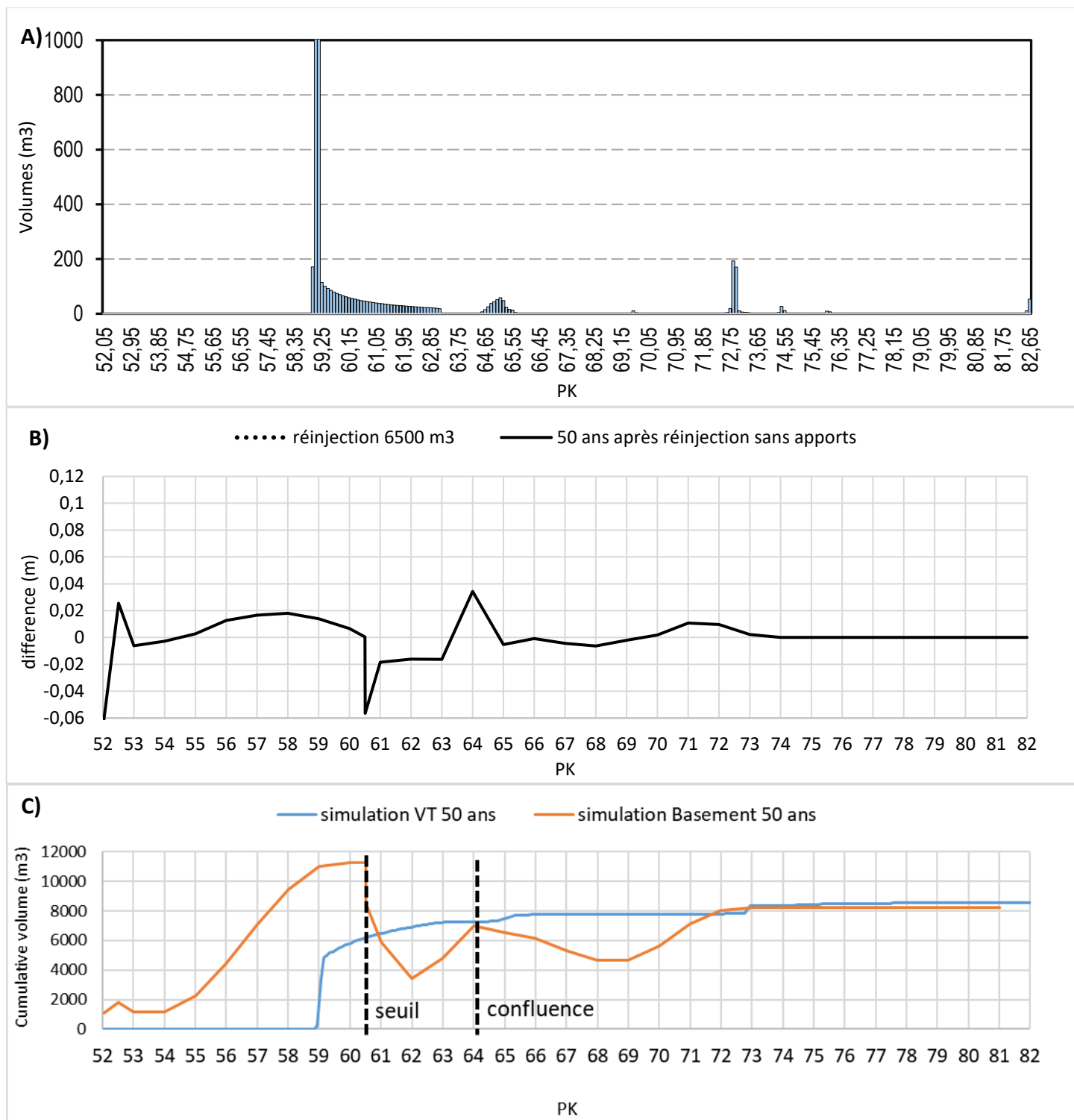


Figure 41 A) Volumes déplacés 50 ans après une réinjection de 6500 m3 selon l'approche de Vazquez-Tarrio, B) changements dans l'élévation du lit (par rapport au lit actuel) après 50 ans avec le modèle de Basement et C) comparaison des volumes cumulés des deux modèles après 50 ans

Résumé et conclusions

Une série de simulations a été réalisée afin d'étudier l'évolution et les impacts des réinjections de sédiments dans le tronçon PDR. Les simulations étaient basées sur une réinjection de sédiments qui a

été effectuée en mars 2017 près de PK52.5. Cinq scénarios différents ont été simulés afin d'explorer l'impact du volume de réinjection, de l'apport en sédiments et du DG des matériaux réinjectés.

Bien que les changements dans le lit aient été très faibles, les résultats servent néanmoins à mettre en évidence plusieurs tendances. i. De petits changements dans l'apport de sédiments, les volumes de réinjection et le DG ont un impact sur les résultats, ii. toutes les simulations sur une période de 50 ans montrent que le dépôt se propage vers l'aval, iii. un volume de réinjection plus important a entraîné des tendances plus prononcées mais similaires de dépôt et d'affinage en aval du point de réinjection, iv. l'absence d'apport de sédiments a entraîné une érosion plus rapide de la pile de réinjection, et v, une réinjection de granulométrie uniforme a conduit à une érosion plus rapide de la pile de sédiments.

L'analyse du flux total de charriage pour différents débits post-réinjection a montré qu'un débit d'au moins Q90% (386 m³/s) était nécessaire pour dépasser le flux de charriage sans réinjection. Cependant, seuls les débits les plus importants (>95%) semblaient avoir un réel impact sur le transport du charriage avec un Q99,8% (2400 m³/s) exponentiellement plus élevé.

Une comparaison des résultats avec les mesures RFID a montré que les distances de déplacement du matériau réinjecté étaient du même ordre de grandeur (les deux montrent un déplacement se produisant dans les deux premiers kilomètres en aval du point de réinjection).

Une comparaison de la propagation des sédiments vers l'aval entre les simulations du Basement et les résultats du modèle VT a montré un comportement similaire sur le court terme (1 an) et le long terme (50 ans) malgré les approches très différentes des deux modèles.

Les résultats démontrent que le modèle 1D est bien adapté pour étudier les tendances générales associées aux réinjections. Cependant, des simulations 2D sont nécessaires pour étudier en détail les modèles de dépôt locaux.

6. ANALYSE DE SENSIBILITE

6.1. Formule de transport de la charge de lit

Comme expliqué au point 4.2.5, la formule de Recking a été utilisée dans les travaux menés dans le cadre de l'OSR4 (rapport I.4, 2017 ; Vazquez-Tarrio et al., 2019) mais n'est pas disponible dans Basement. Nous avons utilisé une approche en deux étapes pour déterminer la formule la plus appropriée à utiliser parmi celles disponibles dans Basement. Premièrement, nous avons généré des courbes de tarage à l'aide d'une gamme de formules de charge de fond dans le modèle Basement (Figure 42) et l'avons comparée à la formule Recking à l'aide de l'outil en ligne Bedloadweb (bedloadweb.com). Deuxièmement, nous avons modélisé le lit actuel avec des sections transversales mesurées et comparé les résultats avec ceux de l'OSR4 (voir 5.4).

La Figure 42 montre les résultats des courbes d'évaluation générées dans Basement pour une gamme de formules multi-grains. Une valeur critique du paramètre Shields de 0,03 a été mise en œuvre pour toutes les formules. Les formules de Wilcock et Crowe, Parker et Wu ont donné des résultats du même ordre de grandeur. Les résultats montrent que le transport du substratum ne commence qu'à des débits beaucoup plus élevés pour les formules de Meyer-Peter et Mueller (MPM) et de Smart et Jaeggi.

La formule d'Ashida & Michiue n'a pas du tout prédit le transport du charriage pour le paramètre critique Shields sélectionné. Un simple test sur des simulations à long terme (élévation du lit, DG) avec les formules de Wilcock et Crowe, Parker et Wu a montré un comportement similaire. Étant donné que Vazquez-Tarrio et al. (2019) ont montré que Wilcock et Crowe se comparaient bien avec les estimations du transport du lit basées sur une approche morphologique dans un autre tronçon du Rhône, nous avons décidé d'utiliser la formule de Wilcock et Crowe pour estimer le transport du lit dans cette étude.

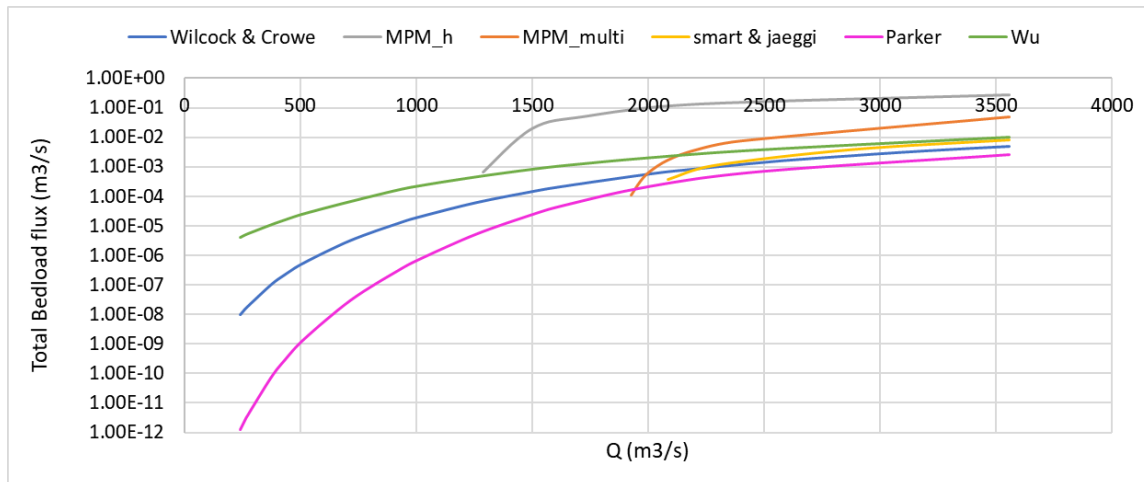


Figure 42 Courbes d'évaluation utilisant une variété de formules de transport de charges en Basement

6.2. Coefficients de friction

Nous avons émis l'hypothèse que la valeur de Strickler pour le chenal n'était pas différente historiquement de celle d'aujourd'hui. Pour tester la sensibilité de nos résultats au choix du coefficient de friction, nous avons modélisé la période post-endigements (75 ans) avec différentes valeurs de Strickler. La Figure 43 montre qu'il n'y a que des différences mineures dans la distribution granulométrique de surface en raison des différents coefficients de friction. Même les valeurs extrêmes telles qu'une valeur de Strickler de 20 n'ont pas un impact substantiel. Nous avons donc maintenu une valeur de Strickler de 36 pour toutes les périodes, ce qui est équivalent à la valeur de Strickler déterminée par l'INRAE (modèle Mage) pour le lit actuel.

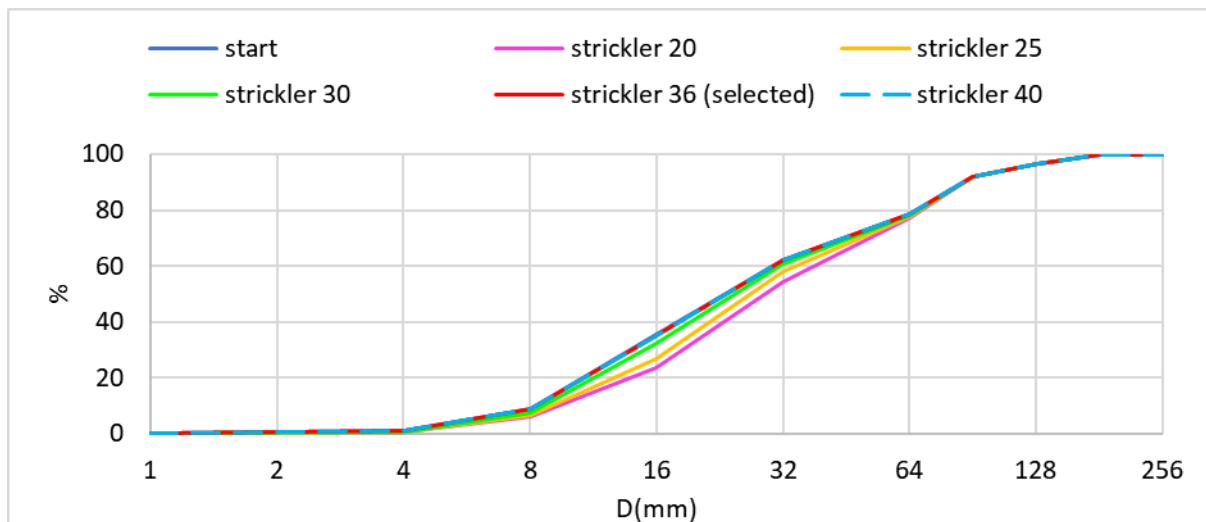


Figure 43 Test de sensibilité pour différentes valeurs de Strickler sur la distribution granulométrique

6.3. Largeur avant endiguements et après endiguements

Nous avons comparé nos estimations de la largeur historique du chenal avant la gestion (basées sur les mesures d'une carte des années 1860 disponible sur IGN Geoportail, voir section 4.3.3) avec une analyse récente de la géométrie historique du chenal réalisée par H. Ghaffarian Roohparvar dont le travail s'est concentré sur l'étude de l'hydraulique historique en utilisant le modèle Mage (axe C4.1, OSR5). Dans le cadre de son travail, Ghaffarian a numérisé une portion du RCC du tronçon PDR à partir d'une carte de 1897 qui comprenait les Casiers Girardon. Il a supprimé manuellement les Casiers afin de modéliser le chenal pré-endiguements. La plaine inondable a également été incluse dans son analyse.

Pour notre modèle morphodynamique, nous nous intéressons à la partie chenalisée de la plaine tressée (braidplain) et, à ce titre, nous avons besoin d'une estimation de la largeur du chenal principal en tant que paramètre d'entrée. Nous supposons que les flux de sédiments entre la partie chenalisée et non chenalisée de la plaine tressée sont en équilibre (somme égale à zéro). Les résultats d'une simulation Mage avant gestion basée sur les sections transversales numérisées de Ghaffarian pour un débit avec un retour de 2 ans donnent le niveau d'eau décrit dans la Figure 44. Le débit d'étiage et la largeur des berges mesurée manuellement, 155 m et 225 m respectivement, sont également représentés.

Nous avons mesuré la largeur de la berge le long de 24 sections transversales le long du tronçon modélisé par Ghaffarian et avons obtenu une valeur moyenne de 280 m. Nous considérons ce résultat comme une bonne validation de la valeur de 300 m que nous avons utilisée dans cette étude pour la largeur avant endiguements.

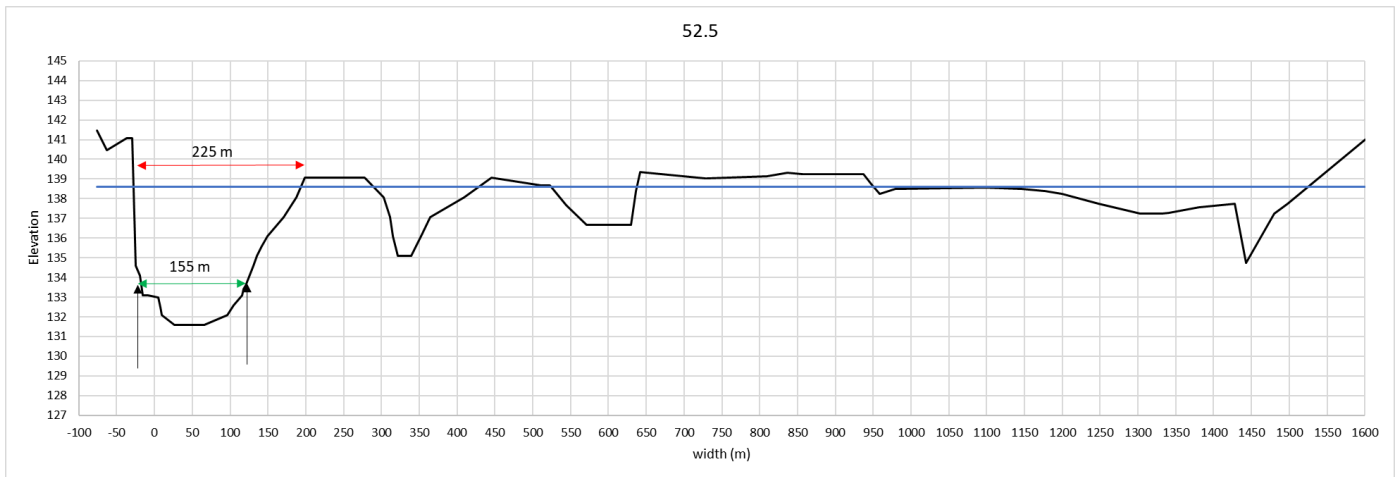


Figure 44 Résultat du modèle Mage 1D sur 1897 sections transversales. Le niveau d'eau est égal à un débit Q2.

6.4. Estimations des valeurs historiques à partir de la sub-surface des bancs

Comme expliqué dans la section 4.4.1, nos estimations de l'apport historique de sédiments, de la charge et de la composition du lit (DG de surface et de sub-surface) étaient basées sur l'hypothèse que la charge sédimentaire transportée dans les conditions du lit actuel et d'un régime d'écoulement non perturbé constitue une approximation raisonnable de premier ordre pour la charge et l'apport historique de sédiments. Afin de déterminer la sensibilité de nos résultats à cette hypothèse, nous avons estimé nos valeurs historiques (étapes décrites dans la section 4.4.1) en nous basant sur une DG représentative de la sous-surface actuelle des bancs, qui est beaucoup plus fine (Figure 6). Ce faisant, nous supposons que la surface du lit historique était plus similaire à la sous-surface actuelle qu'à la surface du lit actuel. Comme on pouvait s'y attendre, une simulation d'équilibre sur le lit pré-endiguements en utilisant une DG plus fine a donné lieu à un apport de sédiments beaucoup plus élevé de 63423 m³/an (contre 275 m³/an).

Les résultats des nouvelles simulations des périodes post-endiguements et post-barrage utilisant la DG des bancs pour estimer les valeurs historiques sont présentés dans les figures ci-dessous. L'élévation du lit au début et à la fin de la période post-barrage montre une légère érosion à la limite amont (Figure 45). La DG de la surface du lit montre très peu de changement (Figure 46). Sur la période post-barrage (Figure 47 et 48), l'élévation du lit montre une grande quantité de dépôt en amont du seuil et presque aucun changement plus en aval. La DG de la surface du lit montre ici aussi peu de changement (Figure 48). Elle montre également que le lit à la fin de la simulation de la période post-barrage (c'est-à-dire aujourd'hui) est beaucoup plus fin que le lit mesuré.

Sur la base de ces résultats, nous concluons que la DG de la sous-surface des bancs est trop fine pour estimer l'apport historique de sédiments, le transport du charriage et la composition du lit. Comme on peut l'observer, très peu de fractions grossières sont présentes dans la DG de la sous-surface des bancs (presque rien au-dessus de 32 mm). Pour un fleuve alpin tressé tel que le Rhône, on s'attendrait à un lit plus mixte composé à la fois de matériaux fins et grossiers.

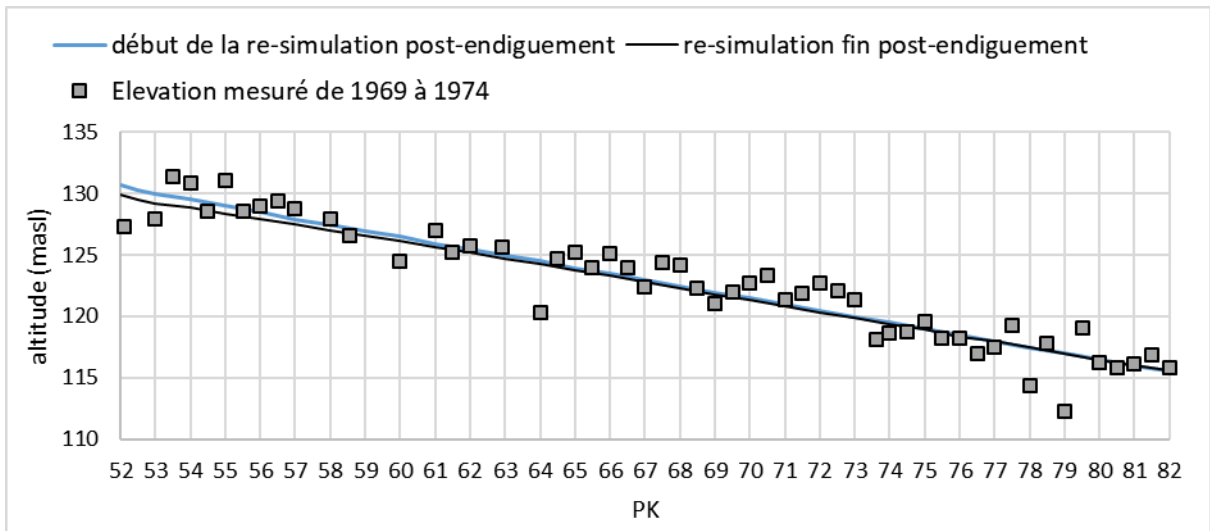


Figure 45 Re-simulation de l'élévation du lit pour la période post-endiguements

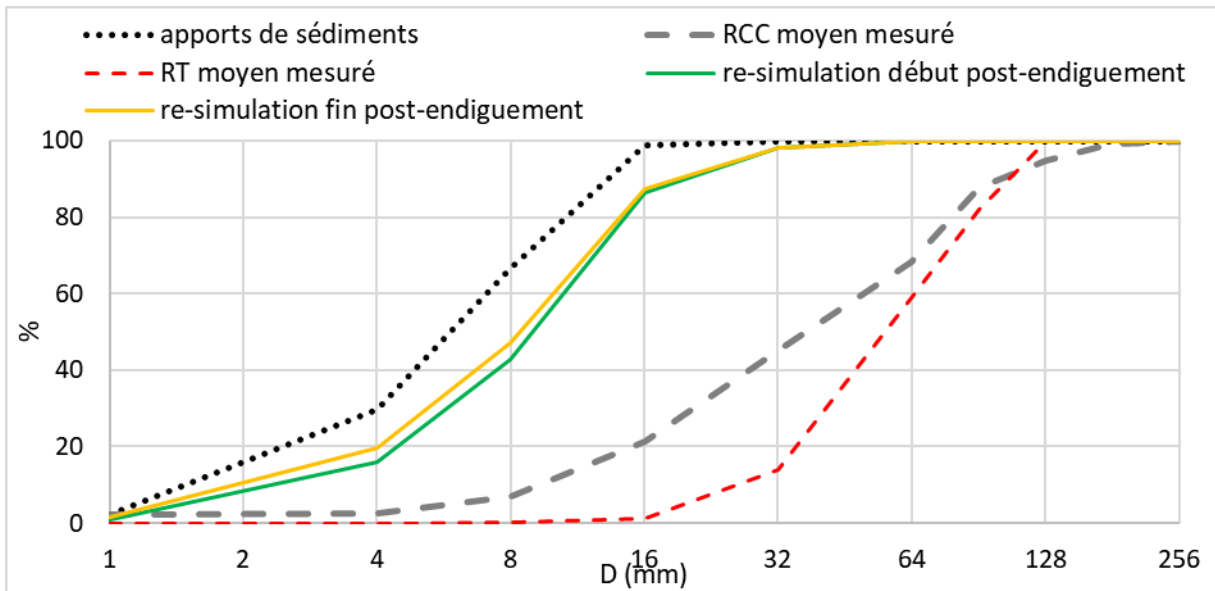


Figure 46 Surface de re-simulation DG du lit du chenal de la période post-endiguements

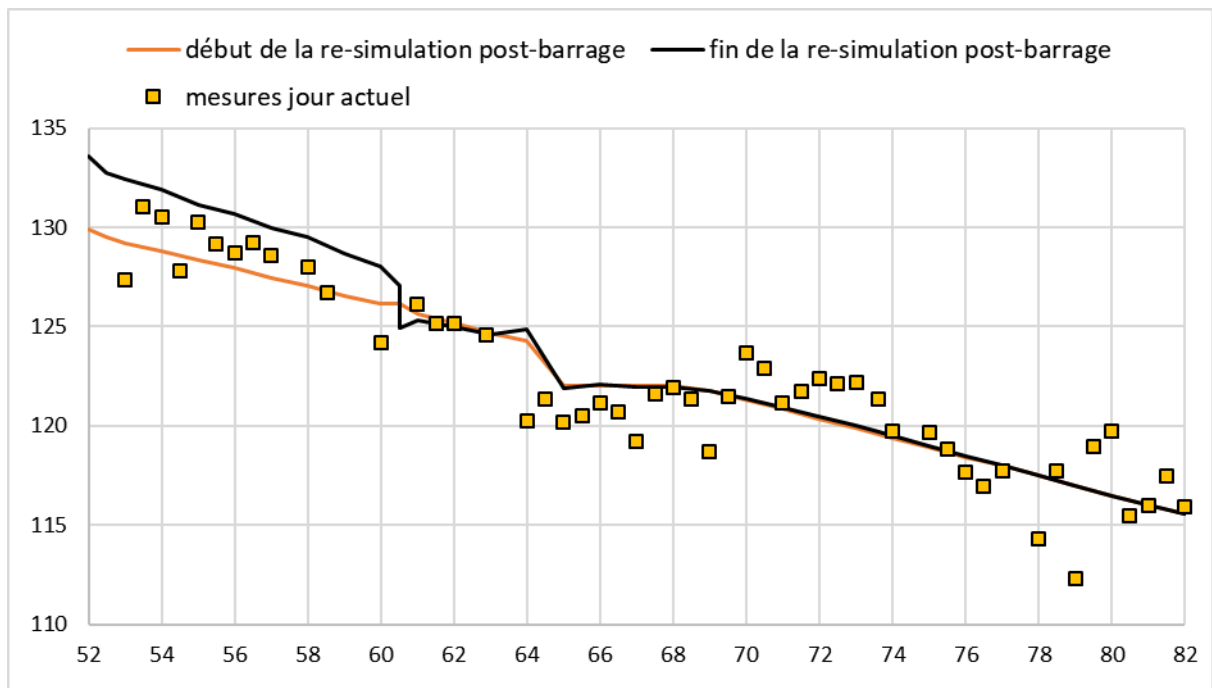


Figure 47 Re-simulation de l'élévation du lit pour la période post-endiguements

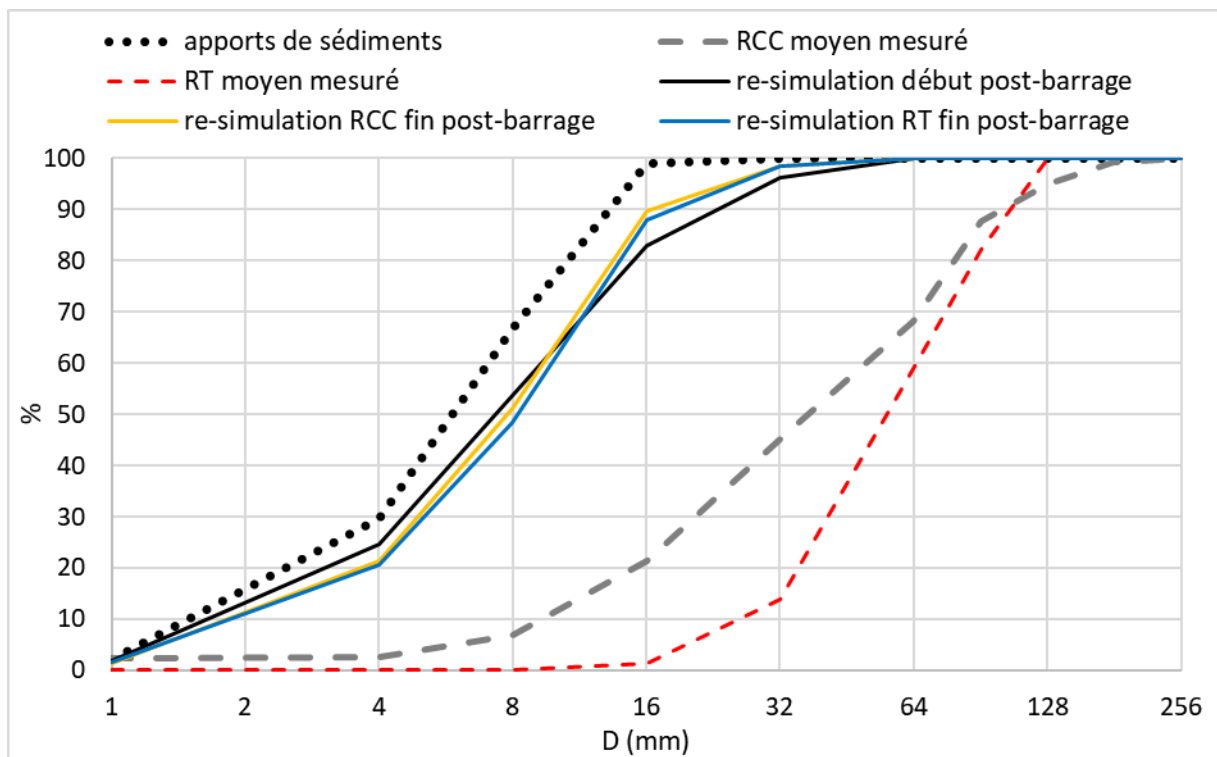


Figure 48 Surface de re-simulation DG du lit du chenal de la période post-barrage

6.5. Profondeur de la couche active

Un paramètre important du modèle est la profondeur de la couche active ou le volume de contrôle du charriage qui définit la région sur laquelle le transport du charriage se produit et est supposé avoir une distribution granulométrique uniforme. Des études précédentes ont utilisé la règle générale de $n \cdot D_{90}$

comme estimation de la profondeur de la couche active (avec n variant entre 1 et 2, voir Viparelli et al, 2011). Nous avons étudié l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche active de 0,025 m à 0,1 m : la première représente $1 \cdot D_{90}$ sur la base de la DG des bancs et la seconde représente approximativement $1 \cdot D_{90}$ sur la base de la DG des canaux et est également égale à la valeur par défaut dans Basement). L'épaisseur de la couche active n'a pas affecté l'augmentation de DG du lit, mais elle a eu un impact significatif sur l'incision, une couche active plus fine entraînant moins d'incision.

L'effet de la profondeur de la couche active pour 3 simulations de 75 ans basées sur des valeurs uniformes et variables de $1 \cdot D_{90}$ a donné les résultats suivants :

- Incision moyenne de 26 cm avec une profondeur uniforme de la couche active égale à 0,05 m
- Incision moyenne de 41 cm avec une profondeur de couche active variable de 0,04 m à 0,09 m
- Incision moyenne de 43 cm avec une profondeur uniforme de la couche active égale à 0,09m

L'effet d'une couche active variable sur l'incision au cours d'une telle simulation à long terme est presque le même que celui d'une profondeur de couche active uniforme de 0,09 m. Sur la base de ces résultats, nous avons décidé d'appliquer une profondeur de couche active uniforme fixe basée sur le DG du chenal.

7. LIMITES ET INCERTITUDES

Le travail effectué présente deux limites majeures. La première est liée au manque de données pour une validation adéquate. Nous soulignons en particulier le manque de mesures historiques de la granulométrie du lit de la rivière.

Le rapport EGR (2000) fournit quelques valeurs globales limitées de D_{50} basées sur des mesures plus en amont dans le Rhône pour des conditions post-barrage, et quelques observations générales de la granulométrie sur les bancs. Le seul jeu de données complet disponible est celui collecté par E. Parrot pour sa thèse (2015). En raison des difficultés de mesure de la granulométrie dans le chenal, les incertitudes de ces données doivent être prises en compte. De plus, il n'existe pas de mesures de l'apport de sédiments et des taux de transport du charriage dans le Rhône - passé ou présent.

La deuxième limite est due à la configuration de notre modèle. Notre modèle consiste en une grille 1D simplifiée avec des sections transversales rectangulaires utilisant des largeurs moyennes et une pente moyenne basée sur la pente historique. Ces importantes simplifications ont permis d'obtenir un modèle robuste pour étudier les tendances générales. Elles ont également facilité l'interprétation des tendances en éliminant les complexités induites par les fluctuations locales de la topographie du lit. Enfin, la formule de Recking n'est pas intégrée au modèle du Basement à l'heure actuelle. Ainsi, les résultats de ce travail ne permettent pas de prolonger d'une manière directe les travaux réalisés dans le OSR4 et de les comparer directement.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous avons construit et validé un modèle morphodynamique 1D du tronçon du Péage de Roussillon. Nous avons effectué des simulations visant à établir une compréhension quantitative plus précise de l'évolution historique du tronçon et des effets relatifs des différents travaux de gestion qui ont été réalisés depuis la fin du 19^e siècle. Nous avons également utilisé le modèle pour estimer le volume et la distribution granulométrique du charriage transporté à différents débits dans les conditions actuelles. Les simulations d'une réinjection de sédiments soulignent comment un tel modèle peut servir d'outil aux gestionnaires de rivière pour prédire les effets des changements futurs, tant naturels qu'anthropiques, sur le débit et l'apport de sédiments.

Sur la base des résultats des simulations numériques qui ont été réalisées, nos principales conclusions pour le tronçon PDR sont les suivantes :

- Le rétrécissement associé aux endiguements n'a pas entraîné de changement significatif de la pente du lit, de la distribution granulométrique de surface ou de subsurface.
- Un rapport de pavage estimé à 1,7 à la fin de la période post-endiguement est en bon accord avec les ratios d'armure mobiles des rivières à lit de gravier naturel.
- La régulation du débit et le dragage pendant la période post-barrage n'ont pas entraîné de changements significatifs de l'élévation du lit, de la GSD de surface ou de subsurface.
- Dans les conditions actuelles, les taux de transport du charriage et les volumes de transport annuels sont très faibles (275 m³/an). Ces faibles taux de transport sont en accord avec les bilans sédimentaires réalisés par Laval et al. (2021).
- Les taux estimés dans cette étude sont inférieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux estimés dans l'OSR4. Nous attribuons cette différence aux différentes formules de transport des charges de fond utilisées (Wilcock et Crowe versus Recking respectivement) et soulignons que les deux résultats constituent des estimations qui restent à valider.
- Nous n'avons pas trouvé de différences majeures dans les flux de sédiments entre les simulations utilisant des sections transversales rectangulaires et celles utilisant des sections transversales mesurées, et nous considérons donc qu'une grille simplifiée est appropriée pour étudier les tendances générales des flux le long du tronçon. De plus, il n'y a pas eu de différences dans les flux basés sur la GSD interpolée par rapport à la GSD moyenne du tronçon.
- Toutes les simulations d'une réinjection de sédiments ont montré une propagation des dépôts en aval sur une distance d'environ 2 km 50 ans après la réinjection.
- Les détails de l'impact du seuil de Peyraud sur le transport de la charge sont inconnus. Dans ce travail, nous avons supposé qu'il n'y avait pas de passage de la charge à travers le seuil. Une étude détaillée de l'impact du seuil nécessiterait un modèle 2D et la prise en compte de la structure 3D complète du seuil ainsi que ses règles de fonctionnement.
- Les différences dans l'apport de sédiments, le volume de réinjection et la granulométrie du matériau réinjecté semblent avoir un impact sur la façon dont l'élévation du lit et la granulométrie de surface changent en réponse à une réinjection : un volume de réinjection plus important a entraîné des tendances plus prononcées de dépôt et d'affinage en aval du point de réinjection, l'absence d'apport de sédiments et une réinjection de granulométrie uniforme ont toutes deux entraîné une érosion plus rapide du tas de réinjection.

- L'analyse du flux total de charriage pour différents débits post-réinjection a montré qu'un débit d'au moins Q90% (386 m³/s) était nécessaire pour dépasser le flux de charriage sans réinjection. Cependant, seuls les débits les plus importants (>95%) semblaient avoir un réel impact sur le transport du charriage, Q99,8% (2400m³/s) étant exponentiellement plus élevé.
- Une comparaison des résultats avec les mesures RFID a montré que les distances de déplacement du matériau réinjecté étaient du même ordre de grandeur : les deux montrent un déplacement se produisant dans les deux premiers kilomètres en aval du point de réinjection.
- Les résultats démontrent que le modèle 1-D est bien adapté pour étudier les tendances générales associées aux réinjections. Cependant, des simulations 2D sont nécessaires pour étudier en détail les patrons de dépôt locaux.

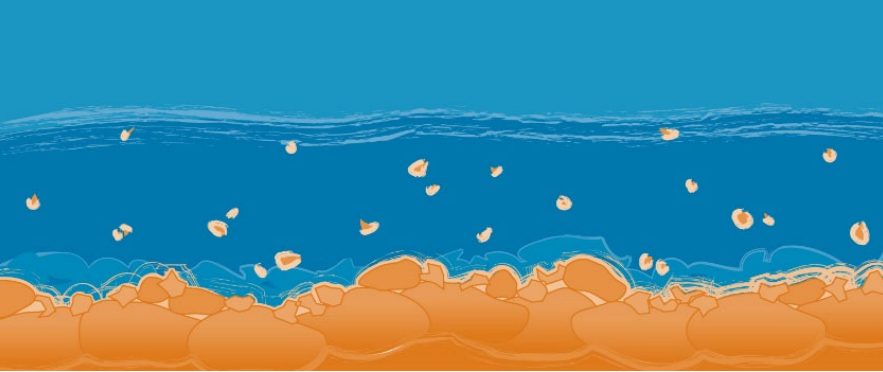
La prochaine étape de ce travail est la construction d'un modèle pour un deuxième tronçon du fleuve Rhône, basé sur le protocole développé ici. Plusieurs ajustements seront effectués en fonction des connaissances acquises lors de ce travail, par exemple, nous utiliserons un plus petit nombre de classes de grains et augmenterons la résolution de la grille 1D.

9. REFERENCES

- Ashida K, Michiue M. 1971. An investigation over river bed degradation downstream of a dam. *Proceedings of the 14th congress of IAHR* **3** : 247–256.
- Ashida K, Michiue M. 1972. Study on hydraulic resistance and sediment transport rate in alluvial stream. *Proceedings of JSCE* **206** : 55–69.
- Bankert AR, Nelson PA. 2018. Alternate bar dynamics in response to increases and decreases of sediment supply. *Sedimentology* **65** : 702–720. DOI: 10.1111/sed.12399
- Blom A, Arkesteijn L, Chavarrías V, Viparelli E. 2017. The equilibrium alluvial river under variable flow and its channel-forming discharge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **122** : 1924–1948. DOI: 10.1002/2017JF004213
- Bui VH, Bui MD, Rutschmann P. 2019. Advanced numerical modeling of sediment transport in gravel-bed rivers. *Water (Switzerland)* **11** DOI: 10.3390/w11030550
- Bunte K, Abt SR. 2001. Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. *General Technical Report n°RMRS GTR74* : 428.
- Church M, Ferguson RI. 2015. Morphodynamics: Rivers beyond steady state M. *Water Resources Research* **51** : 1883–1897. DOI: 10.1002/2014WR016862
- Coeur D. 2017. Etude historique des prélèvements de sédiments dans le Rhône, 1954–2010. CNR (Report + annexes)
- Cui Y, Parker G. 1998. The arrested gravel front: Stable gravel-sand transitions in rivers Part 2: General numerical solution. *Journal of Hydraulic Research* **36** : 159–182. DOI: 10.1080/00221689809498631
- Dépret T, Riquier J, Piégay H. 2017. Evolution of abandoned channels: Insights on controlling factors in a multi-pressure river system. *Geomorphology* **294** : 99–118. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.01.036

- Dietrich W, Kirchner J, Ikeda H, Iseya F. 1989. Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Letters to Nature* **340** : 215–217. DOI: 10.1038/340301a0
- EGR. 2000. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Technical Report Edited by SOGREAH.
- Frings RM, Kleinhans MG, Vollmer S. 2008. Discriminating between pore-filling load and bed-structure load: A new porosity-based method, exemplified for the river Rhine. *Sedimentology* **55** : 1571–1593. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2008.00958.x
- Geopeka. 2019. Suivi par traçage RFID de la mobilité des sédiments d'une opération de réinjection dans le Vieux Rhône de Péage de Roussillon
- Hassan MA, Egozi R, Parker G. 2006. Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel bed rivers. *Water Resources Research* **42** : 1–15. DOI: 10.1029/2005WR004707
- IRS. 2000. Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide. SOGREAH, Grenoble, France.
- Laval F, Fantino G, Strosser P, Mallet J-P, E. B, Cumin T, Gilles G, Catalon E, Mosselman E. 2021. Etude préalable qu schéma directeur de gestion sédimentaire du fleuve Rhône du lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée. Fiches de synthèse par unité hydrographique cohérente (UHC). Fiche UHC#13-PDR
- Nelson PA, Venditti JG, Dietrich WE, Kirchner JW, Ikeda H, Iseya F, Sklar LS. 2009. Response of bed surface patchiness to reductions in sediment supply. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **114** : 1–18. DOI: 10.1029/2008JF001144
- OSR4 report I.4. 2017. Evolutions morphodynamiques du chenal sur le long-terme
- Parker G. 1990. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research* **28** : 417–436. DOI: 10.1080/00221689009499058 [online] Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00221689009499058>
- Parker G. 2004. 1D sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents. e-book [online] Available from: <http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/default.asp>
- Parker G, Klingeman PC. 1982. On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research* **18** : 1409–1423. DOI: 10.1029/WR018i005p01409
- Parker G, Sutherland AJ. 1990. Fluvial armor. *Journal of Hydraulic Research* **28** : 529–544. DOI: 10.1080/00221689009499044
- Parker G, Toro-Escobar CM. 2002. Equal mobility of gravel in streams: The remains of the day. *Water Resources Research* **38** : 46-1-46–8. DOI: 10.1029/2001wr000669
- Parrot E. 2015. Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée. (PhD dissertation)., Lyon 3 University
- Petit F, Poinart D, Bravard JP. 1996. Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France (canal de Miribel). *Catena* **26**
- Provansal M, Dufour S, Sabatier F, Anthony EJ, Raccasi G, Robresco S. 2014. The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130years: Hydropower dams versus other control factors. *Geomorphology* **219** : 27–41. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.033 [online] Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.033>
- rapport I.4. 2017. Evolutions morphodynamiques du Chenal sur le long-terme. OSR4

- Recking A, Liébault F, Peteuil C, Jolimet T. 2012. Testing bedload transport equations with consideration of time scales. *Earth Surface Processes and Landforms* **37** : 774–789. DOI: 10.1002/esp.3213
- Robinson RAJ, Slingerland RL. 1998. Origin of fluvial grain-size trends in a foreland basin; the Pocono Formation on the central Appalachian Basin. *Journal of Sedimentary Research* **68** : 473–486. DOI: 10.2110/jsr.68.473
- Vázquez-Tarrío D, Piégay H, Menéndez-Duarte R. 2020. Textural signatures of sediment supply in gravel-bed rivers: Revisiting the armour ratio. *Earth-Science Reviews* **207** : 103211. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103211 [online] Available from: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103211>
- Vázquez-Tarrío D, Tal M, Camenen B, Piégay H. 2019. Effects of continuous embankments and successive run-of-the-river dams on bedload transport capacities along the Rhône River, France. *Science of the Total Environment* **658** : 1375–1389. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.109 [online] Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.109>
- Venditti JG, Nelson PA, Bradley R, Haught D, Gitto A. 2017. Bedforms, structures mobile patches and sediment supply in gravel- bedded rivers. In *Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters* , Tsutsumi D and Laronne J (eds). Wiley-Blackwell: UK; 439–466.
- Viparelli E, Gaeuman D, Wilcock P, Parker G. 2011. A model to predict the evolution of a gravel bed river under an imposed cyclic hydrograph and its application to the Trinity River. *Water Resources Research* **47** : 1–22. DOI: 10.1029/2010WR009164
- Wilcock PR, Crowe JC. 2003. Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering* **129** : 120–128.
- Wright S, Parker G. 2005a. Modeling downstream fining in sand-bed rivers. I: formulation. *Journal Of Hydraulic Research* **43** : 613–620.
- Wright S, Parker G. 2005b. Modeling downstream fining in sand-bed rivers. II: Application. *Journal of Hydraulic Research* **43** : 621–631. DOI: 10.1080/00221680509500382
- Wu W, Wang SSY, Jia Y. 2000. Non-uniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research* **38** : 427–434.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Plan
Rhône
Saône

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

agence
de l'eau
RHÔNE MEDITERRANÉE
CORSE
établissement public de l'État

AVEC LE SOUTIEN DE L'UNION EUROPÉENNE

L'EUROPE S'ENGAGE
pour le Rhône
et la Saône
avec le FEDER

UNION EUROPÉENNE

CNR

EDF

La Région
Occitanie
Pyrénées - Méditerranée

RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR

La Région
Auvergne-Rhône-Alpes

cnrs

EVS
Environnement
Vie Société

cerege
CENTRE EUROPÉEN
DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT
DES GÉOCHIMIES DE L'ENVIRONNEMENT

INRAE

MENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Ifremer

mio
Mediterranean Institute
of Oceanography

ZA
Zone
Atelier
LTER FRANCE BASSIN DU RHÔNE

ohm
Observatoire Hommes-milieux - Vallée du Rhône

LabEx
DRIHM

cnrs

INVESTISSEMENTS
D'AVENIR

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact :

bertrand.morandi@graie.org