



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-03293550v2

HAL Id: hal-03293550

<https://hal.science/hal-03293550v2>

Submitted on 12 Aug 2022

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

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



Observatoire des Sédiments du Rhône

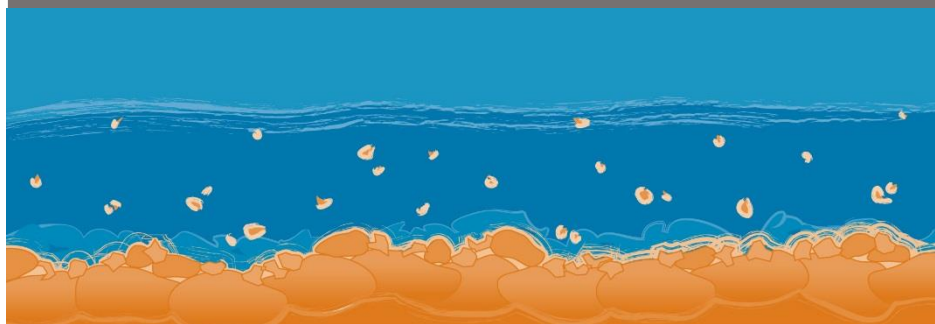
OSR5 2018-2020

Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon version B C4.2/A2.3

Version du 04/2022



Plan Rhône



Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon

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

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 chenal et peut être utilisé pour simuler des scénarios de restauration.

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").

En étudiant et en testant les avantages et les limites des modèles morphodynamiques existants, il est apparu qu'un modèle unique n'était pas adapté à nos multiples besoins et aux données disponibles pour le Rhône. Nous avons donc utilisé un modèle pour l'étude historique (long terme) et un autre pour l'étude du système actuel (court terme). Finalement, les deux modèles ont été utilisés conjointement pour étudier l'évolution historique et la morphodynamique actuelle sur l'ensemble du tronçon. Nous avons utilisé le modèle Spawning Gravel Refresher (SGR, Viparelli et al., 2011), un modèle bien adapté à l'étude de la morphodynamique globale des chenaux basée sur des simulations à long terme (échelle décennale à millénaire), pour étudier l'évolution historique du Rhône. Nous avons utilisé le modèle Basement (ETH, Zurich), un modèle bien adapté aux simulations à court terme (échelle annuelle à plusieurs décennies) pour étudier le fonctionnement actuel du Rhône.

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 débit classé, et les sorties du modèle hydraulique 1D d'un modèle existant (Mage) développé par l'INRAE. Nos simulations historiques 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 19^e 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. La simulation historique part d'une condition initiale avant endiguements, les périodes post-endiguement et post-barrage sont simulées sur les résultats de la période précédente. Pour les simulations actuelles, nous avons utilisé les profils en travers mesurés tout les 500 m. Nous avons réalisé une série de simulations afin d'étudier l'évolution des sédiments réinjectés et les impacts sur le lit à 1 an et à 50 ans post-réinjection.

Les simulations historiques montre des changements très mineurs à cause des endiguements et les barrages dans l'élévation du lit, ce qui est en accord avec les mesures existantes. La distribution granulométrique de la surface du lit montre une tendance à diminuer (et par conséquent des rapports de pavage plus faibles). Les simulations actuelles montrent un lit stable, que les réservoirs limitent de manière significative le passage de la charge de fond, et que les sédiments réinjectés se déplacent très lentement vers l'aval sous le régime hydrologique moyen d'aujourd'hui, en accord avec les mesures RFID.

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

Modélisation morphodynamique, évolution du lit, transport par charriage, Péage de Roussillon

R A P P O R T	6
1. INTRODUCTION	8
1.1. Vue d'ensemble et objectifs	8
1.2. Résumé des travaux antérieurs et des connaissances actuelles	9
1.3. Motivation et justification d'un modèle morphodynamique	9
2. DEFINITIONS	11
3. PORTEE DE L'ETUDE	12
4. METHODOLOGIE	13
4.1. Approche de modélisation	13
4.1.1. Modèles à long terme et à court terme	13
4.2. Analyse historique et approche de modélisation	14
4.2.1. Estimation de la composition historique du lit, de l'apport de sédiments et du flux de sédiments	15
4.2.2. Paramètres du modèle et résumé des simulations	16
4.3. Simulations actuelles	17
4.3.1. Basement configuration et validation du modèle	17
4.4. Configuration générale et données pour les deux modèles	19
4.4.1. Couches	19
4.4.2. Formule de transport du chargement	20
4.5. Données disponible	21
4.5.1. Hydraulique et courbes de durée d'écoulement	21
4.5.2. Distributions granulométriques	22
4.5.3. Géométrie du chenal	23
5. RESULTATS : ANALYSE HISTORIQUE	24
5.1. Période Pré-endiguement (chenal d'équilibre)	24
5.2. Période post-endiguement	26
5.3. Période post- barrage - RCC	29
6. RESULTATS : LE PRESENT	33
6.1. Taux de transport actuels par fraction granulométrique	33
6.2. Réinjection de sédiments	36
7. ANALYSE DE SENSIBILITE	42

7.1. Formule de transport de la charge de lit.....	42
7.2. Coefficients de friction.....	43
7.3. Largeur avant endiguements et après endiguements	44
7.4. Profondeur de la couche active.....	45
8. LIMITES ET INCERTITUDES	45
9. PERSPECTIVES	46
10. REFERENCES	46

R A P P O R T

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.

Notre objectif était d'utiliser les plateformes numériques existantes pour répondre aux besoins immédiats des gestionnaires de rivières en l'absence d'un modèle morphodynamique OSR fonctionnel (en cours à l'INRAE). L'expérience et les résultats de ce travail informeront et aideront à valider le modèle OSR lors de son développement.

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 (INRAE MAGE modèle) 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 servent à valider le modèle et à identifier les forces et faiblesses de ses capacités prédictives.

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 20^e 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, notamment pour réduire le risque d'inondation et 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, notamment celle de savoir si les barrages ont entraîné une augmentation de la taille des sédiments sur le fond 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.

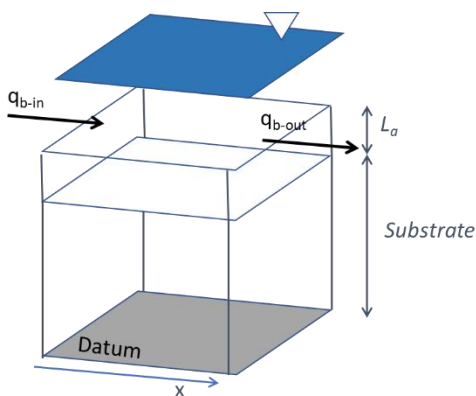


Figure 1 Schéma de la couche de surface et du substrat. La est l'épaisseur de la couche de surface, le substrat désigne une couche de dépôt sous la couche de surface, $q_b\text{-in}$ et $q_b\text{-out}$ sont respectivement les transports de la charge de fond qui entre et sort du volume de contrôle représenté. 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, leur devenir lorsqu'ils atteindront la retenue du barrage suivant, et l'interaction entre les sédiments réinjectés et l'état actuel du lit (par exemple pavé). 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.

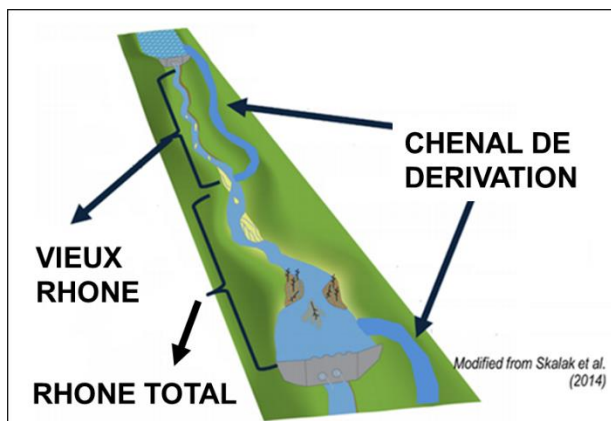


Figure 3 Présentation graphique d'un tronçon unique de barrage à barrage dans le fleuve Rhône

4. METHODOLOGIE

4.1. Approche de modélisation

4.1.1. Modèles à long terme et à court terme

Comme expliqué dans l'introduction, les objectifs de ce travail étaient doubles. Le premier était d'étudier l'*évolution historique* du fleuve Rhône en réponse aux différentes phases de gestion. Le second était de caractériser le flux sédimentaire dans les *conditions actuelles du lit et de l'hydraulique* et comment il serait impacté par une réinjection de sédiments. Avant d'imposer les conditions actuelles à un modèle morphodynamique, nous jugeons qu'il est nécessaire de simuler d'abord l'évolution historique à long terme du chenal pour obtenir une compréhension générale de la morphodynamique.

Les simulations de l'évolution du chenal à long terme et de la dynamique à court terme ont des objectifs, des défis et des exigences de données (conditions initiales et limites) différents. Les simulations historiques à long terme doivent idéalement partir de la représentation la plus précise possible d'un système à l'équilibre (avant gestion) qui est ensuite utilisé pour étudier l'évolution du système dans le temps en réponse à des perturbations successives. Des données historiques (élévation du lit, apport de sédiments, flux de sédiments, composition du lit...), ou en leur absence, un moyen robuste de les estimer, sont nécessaires. Les simulations d'un tronçon simplifié qui exclut les processus locaux sont appropriées. Les simulations à court terme destinées à comprendre le fonctionnement actuel nécessitent une représentation précise du lit et des conditions aux limites (en particulier dans le cas d'un système fragmenté complexe comme le Rhône). Au fur et à mesure que nous avons étudié et testé les avantages et les limites des modèles morphodynamiques existants, il est devenu évident qu'un seul modèle n'était pas adapté à nos multiples besoins et qu'il serait préférable d'utiliser un modèle pour l'étude historique (à long terme) et un autre pour étudier le système actuel (à court terme). Comme nous le verrons dans les sections suivantes, les deux modèles ont finalement été utilisés conjointement pour étudier l'évolution historique et la morphodynamique actuelle sur l'ensemble du tronçon.

Afin d'étudier l'évolution historique du Rhône, nous avons utilisé le modèle Spawning Gravel Refresher (SGR) : https://csdms.colorado.edu/wiki/Model:Morphodynamic_gravel_bed (Viparelli et al., 2011). Le modèle est disponible en Visual Basic sous Excel, Fortran90 ou C. Le code est open source et peut donc être adapté aux besoins spécifiques d'une étude. Le modèle SGR est bien adapté à l'étude de la morphodynamique globale des chenaux basée sur des simulations à long terme (échelle décennale jusqu'à l'échelle millénaire) pour les raisons suivantes :

- Le modèle est mis en place avec une pente et une largeur fixes (sections transversales rectangulaires).
- L'élévation du lit en aval n'est pas fixe et peut être réglée librement.
- La relation de transport de la charge peut être ajustée avec précision.

Le modèle SGR est principalement utilisé pour étudier les changements de pente et les changements dans la distribution granulométrique de la surface et de la subsurface. Ce modèle est moins bien adapté à l'étude des changements locaux du lit et ne dispose que d'options limitées pour configurer des conditions aux limites complexes. Nous avons utilisé le modèle SGR pour étudier :

- Les effets du rétrécissement du chenal (endiguements)
- Les effets des réductions de débit (dérivations)
- Les effets de la réduction de l'apport en sédiments (barrages)

Pour les simulations actuelles, nous avons utilisé le modèle Basement : <https://basement.ethz.ch/> (ETH, Zurich). Ce modèle est bien adapté aux simulations à court terme (échelle de temps annuelle jusqu'à plusieurs décennies). Il est basé sur un code numérique bien établi capable de simulations morphodynamiques et est bien adapté à l'étude d'un large éventail de systèmes fluviaux. 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 des instructions détaillées pour l'utilisation du modèle. Le modèle BASEMENT est un logiciel libre qui n'est pas open source. 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.
- Il est bien équipé pour gérer plusieurs types de conditions aux limites.
- Le modèle 1D peut être utilisé avec les profils en travers mesurés.
- 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, hydroélectricité, extraction de sédiments, réinjections de sédiments, réaménagement de chenaux, etc. Il permet un large éventail de conditions limites (barrage, déversoir, confluence, affluent, réinjection, etc.).
- 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 est capable de réaliser des simulations 1D et 2D.

Les principales limites du modèle Basement qui l'empêchent d'être bien adapté aux simulations à long terme sont l'impossibilité de modifier le code source et la difficulté d'obtenir une condition d'équilibre en raison d'une élévation fixe du lit en aval (le lit n'est pas libre de s'ajuster) et d'une capacité limitée à calibrer l'équation de la charge sédimentaire. Par conséquent, dans cette étude, nous avons utilisé le modèle Basement pour étudier :

- Taux de transport actuels par fraction granulométrique
- Effets de retenue (barrages-réservoirs)
- Réinjection de sédiments

Les deux modèles utilisés dans cette étude peuvent simuler des mélanges de sédiments (tailles de grains multiples) et les deux modèles sont publics et librement disponibles en ligne.

4.2. Analyse historique et approche de modélisation

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. 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 4 montre le calendrier avec les périodes de simulation et les conditions d'équilibre supposées.

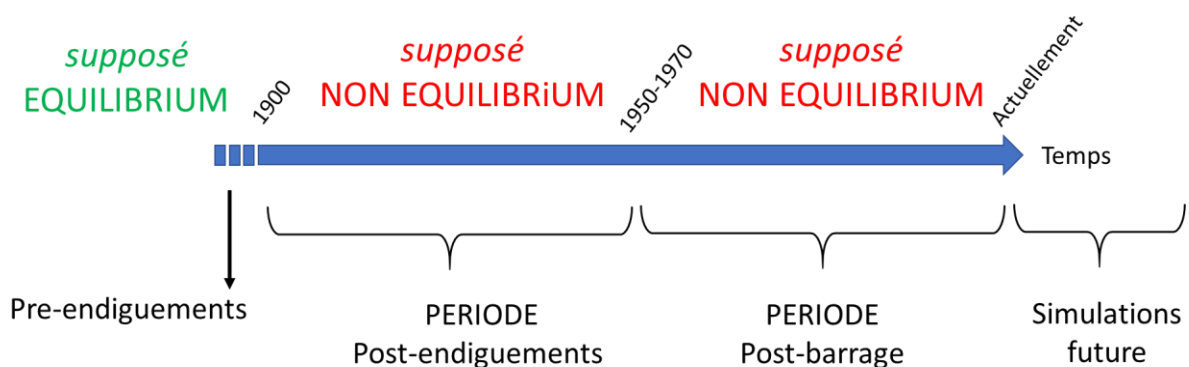


Figure 4 Vue d'ensemble des différentes périodes impactant le lit du Rhône

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

Des conditions initiales et limites spécifiques sont nécessaires pour faire fonctionner les modèles numériques. Seules des données minimales sont disponibles sur la surface du lit et la composition de la subsurface (IRS, 2000) et il n'y a pas de mesures existantes de l'apport de sédiments ou du flux de sédiments (charge). Nous avons donc dû estimer ces données pour l'analyse historique du Rhône. Pour ce faire, nous avons utilisé une combinaison d'étapes de modélisation analytique et numérique en utilisant les deux modèles (Figure 5) qui étaient en accord avec nos hypothèses précédentes. Nous détaillons ces étapes ici.

Pour commencer, une simulation d'équilibre a été réalisée à l'aide de Basement. Une telle simulation ne nécessite pas un apport de sédiments à définir à la limite amont puisque par définition il est égal à la capacité de transport et donc calculé par le modèle. Cette simulation a été réalisée dans les conditions d'un lit actuel (élévation du lit, largeur moyenne, GSD de surface actuelle) et d'un hydrogramme pré-barrage (régime d'écoulement non perturbé). Le résultat de cette simulation était le taux de transport de la charge de fond 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 $2585 \text{ m}^3/\text{an}$ ($8,2\text{e-}05 \text{ m}^3/\text{s}$). Nous avons supposé que les fractions granulométriques de la charge actuelle du lit dans un régime

d'écoulement non perturbé étaient représentatives des fractions granulométriques de la subsurface historique et de l'apport sédimentaire.

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 d'équilibre (pré-endiguements).

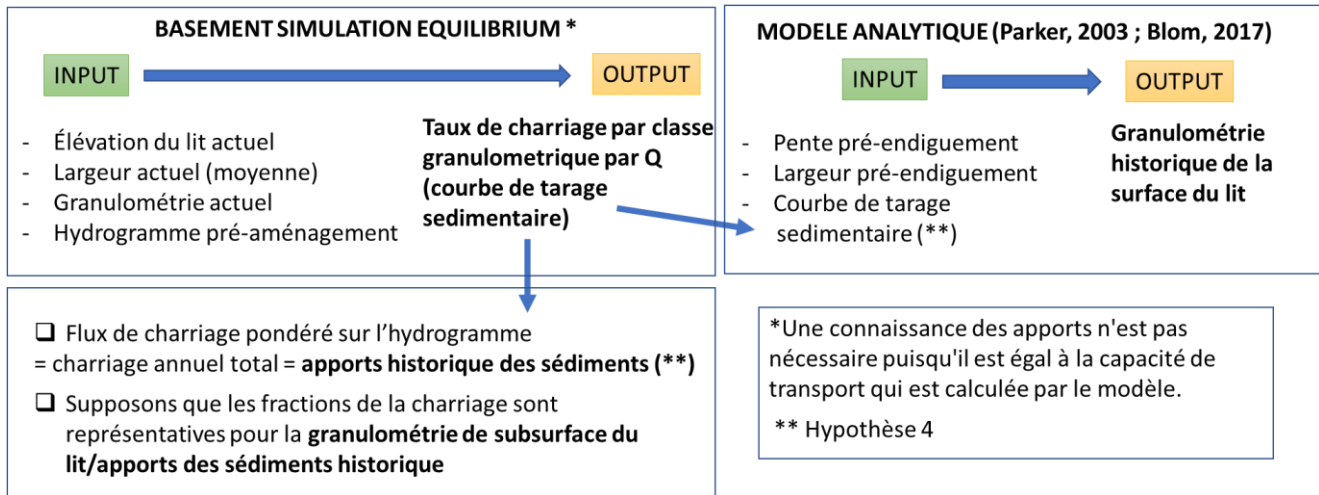


Figure 5 Aperçu des étapes utilisées pour estimer les données historiques

4.2.2. Paramètres du modèle et résumé des simulations

Le tableau 1 résume les simulations effectuées pour chaque période historique à l'aide du modèle SGR. Toutes les simulations numériques ont consisté en une grille 1D avec des sections rectangulaires de largeur fixe. Seule la limite de l'entrée peut être modifiée dans le modèle SGR (hydrogramme du débit + apport de sédiments). La formule de transport de charge de Wilcock et Crowe a été sélectionnée (voir 4.4.2) et ensuite ajustée (en ajustant un coefficient dans le nombre de Shields de référence afin d'atteindre l'équilibre (voir Viparelli et al. (2011) pour les détails).

La distribution granulométrique était composée de 11 classes de grains - un choix fait par le modélisateur qui dépend du modèle utilisé et des données disponibles. L'apport de sédiments était égal à $2585 \text{ m}^3/\text{an}$ ($8.2 \text{ e-}05 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) pour les simulations pre-endiguement et post-endiguement. Nous avons supposé que l'apport de sédiments était nul dans la simulation après le barrage, suite à notre analyse des taux de transport actuels qui montrait qu'aucun sédiment grossier ne traversait les réservoirs du barrage (section 6.1.).

Dans la période post-endiguement, la largeur du chenal a été réduite par rapport à la période pré-endiguement. Étant donné que les barrages affectent plusieurs paramètres - le débit, la largeur du chenal et l'apport en sédiments, nous avons effectué une série de simulations post-barrage dans lesquelles nous avons modifié une seule variable à la fois. Le changement dans l'apport sédimentaire après le barrage est analysé séparément avec le modèle de base dans la section 6.

Tableau 1 Résumé des paramètres et des simulations effectuées pour chaque période pour les simulations historiques avec le modèle SGR

Période	Simulations	Largeur (m)	Élévation initiale du lit	Hydraulique	DG de la surface initiale	L'apport en sédiments
Pré-endiguement (<1897)	jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint	300	Pente fixe basée sur le profil en long de 1897 (Parrot, 2015)	Pré-barrage	Estimé (voir 4.4.1)	2585 m ³ /an
Post-endiguement (1897-1977)	80 ans : jusqu'à la construction du barrage en amont	230	Etat du lit d'équilibre pré-endiguement	Pré-barrage	Composition du lit d'équilibre pré-endiguement.	2585 m ³ /an
Post-barrage_1 (1972-2022)	50 ans	RCC 150	État final du lit à la fin de la simulation post-endiguement	Post-barrage	Composition finale du lit à la fin de la simulation post-endiguement	0 m ³ /an
Post-barrage_2a, 2b, 2c (1972-2022)	50 ans	RCC 2a : 230 2b : 150 2c : 230	État final du lit à la fin de la simulation post-endiguement	2a : Post-barrage 2b : Pré- barrage 2c : Pré-barrage	Composition finale du lit à la fin de la simulation post-endiguement	2a : 2585 m ³ /an 2b : 2585 m ³ /an 2c : 0 m ³ /an

4.3. Simulations actuelles

4.3.1. Basement configuration et validation du modèle

Comme on le verra dans les résultats, les changements historiques du lit dans les simulations ont été minimes. En tant que tel, nous avons considéré qu'il était approprié de procéder à l'utilisation du Basement avec les conditions actuelles du lit pour effectuer des simulations à court terme. Les élévations de l'eau à différents débits dans Basement ont été calibrée en utilisant les résultats du modèle 1D Mage. Nous soulignons que les simulations à long terme ne sont pas fiables en l'absence d'une charge sédimentaire validée.

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 4.4.1). Ces données 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).

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 "debit 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 confluence, un déversoir, des réinjections de sédiments... 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.

Dans un premier temps, toutes les structures hydrauliques ont été intégrées dans le modèle. Le modèle commence juste en aval du barrage de St Pierre de Bœuf (PK52.5) et reçoit le débit entrant dans le RCC (Q_{in_rcc}) à cette limite amont (Figure 6). A la confluence avec le canal (PK64), on définit un débit hydraulique entrant (Q_{in_canal}) égal au débit passant par le canal. À la limite aval (PK82), on définit un débit hydraulique sortant (Q_{out_canal}) égal au débit s'écoulant vers le canal en aval ; le débit restant s'écoule par-dessus le barrage ($Q_{out_barrage}$). Les valeurs de Q_{in_rcc} , Q_{in_canal} et Q_{out_canal} sont basées sur les courbes de durée d'écoulement après le barrage et sur la répartition du débit fournie par le modèle Mage (voir 4.5.1).

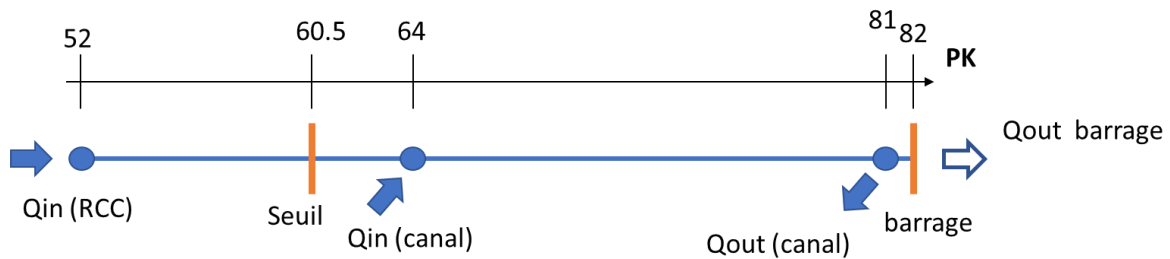


Figure 6 Représentation schématique de la configuration du modèle pour la période post-barrage.

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 7 montre les lignes d'écoulement des modèles Mage et Basement pour les débits simulés les plus faibles et les plus élevés, indiquant un calibrage réussi.

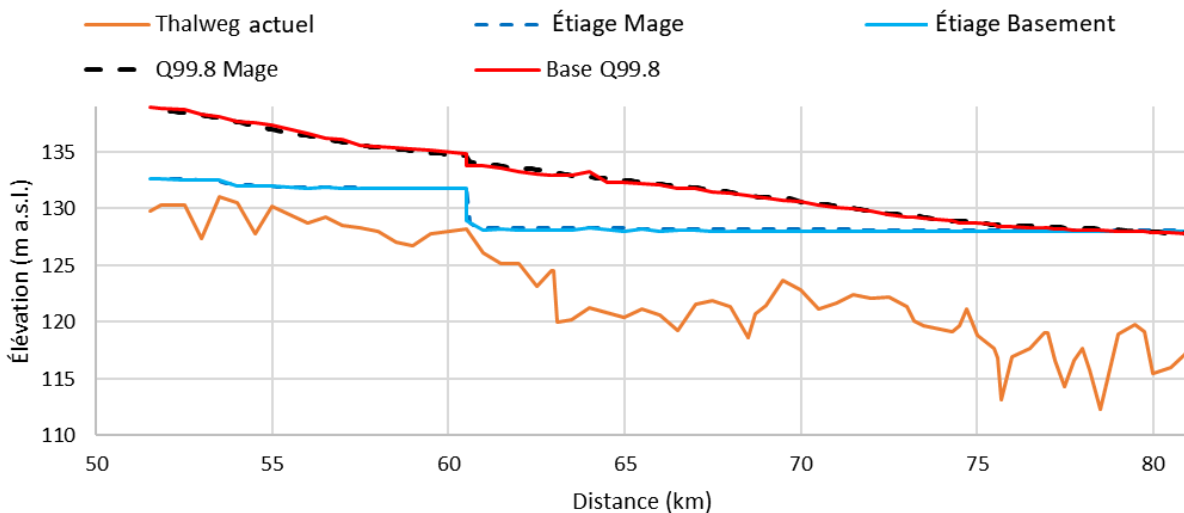


Figure 7 Lignes de débit de Mage et Basement pour les débits simulés les plus faibles et les plus élevés.

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 $85 \text{ m}^3/\text{s}$. 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.

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. Nous extrayons le changement d'élévation du lit local, le changement de la distribution granulométrique de la surface et de la subsurface et le transport du lit par classe granulométrique par débit.

4.4. Configuration générale et données pour les deux modèles

4.4.1. 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 du Basement consiste donc en une structure verticale, comme le montre la Figure 8. 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 8 est constituée d'eau claire. Une approche similaire est utilisée pour le modèle SGR avec 1 couche de surface et 1 couche de subsurface.

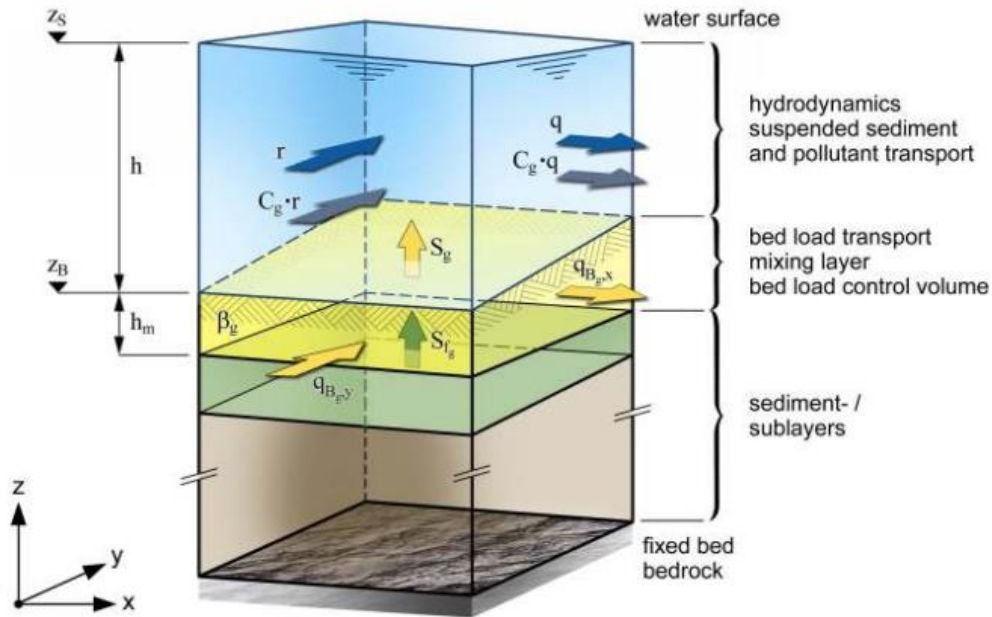


Figure 8 Discrétisation verticale d'une seule cellule de calcul dans Basement (source manuel Basement)

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.

4.4.2. 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 7.1) et déterminé que l'équation de Wilcock et Crowe (ci-après dénommée WC) donnait les meilleurs résultats. WC est également disponible dans le modèle SGR

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.***

4.5. Données disponible

4.5.1. 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 9). 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 9; 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.

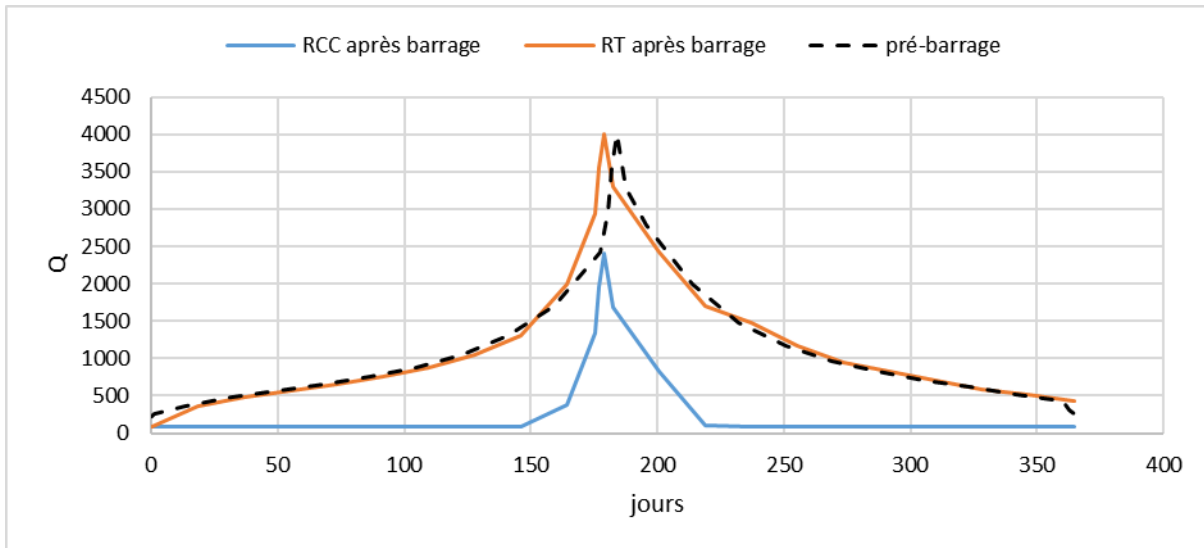


Figure 9 Courbe de durée de débit réorganisée, appelée hydrogramme "post-barrage" pour RCC et RT et courbe de durée de débit réorganisée sans l'impact des barrages, appelée hydrogramme "pré-barrage".

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 7.2) a montré que des changements mineurs n'affectent pas les résultats.

4.5.2. 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 10A 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 10B 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 4.2), 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 10C 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.

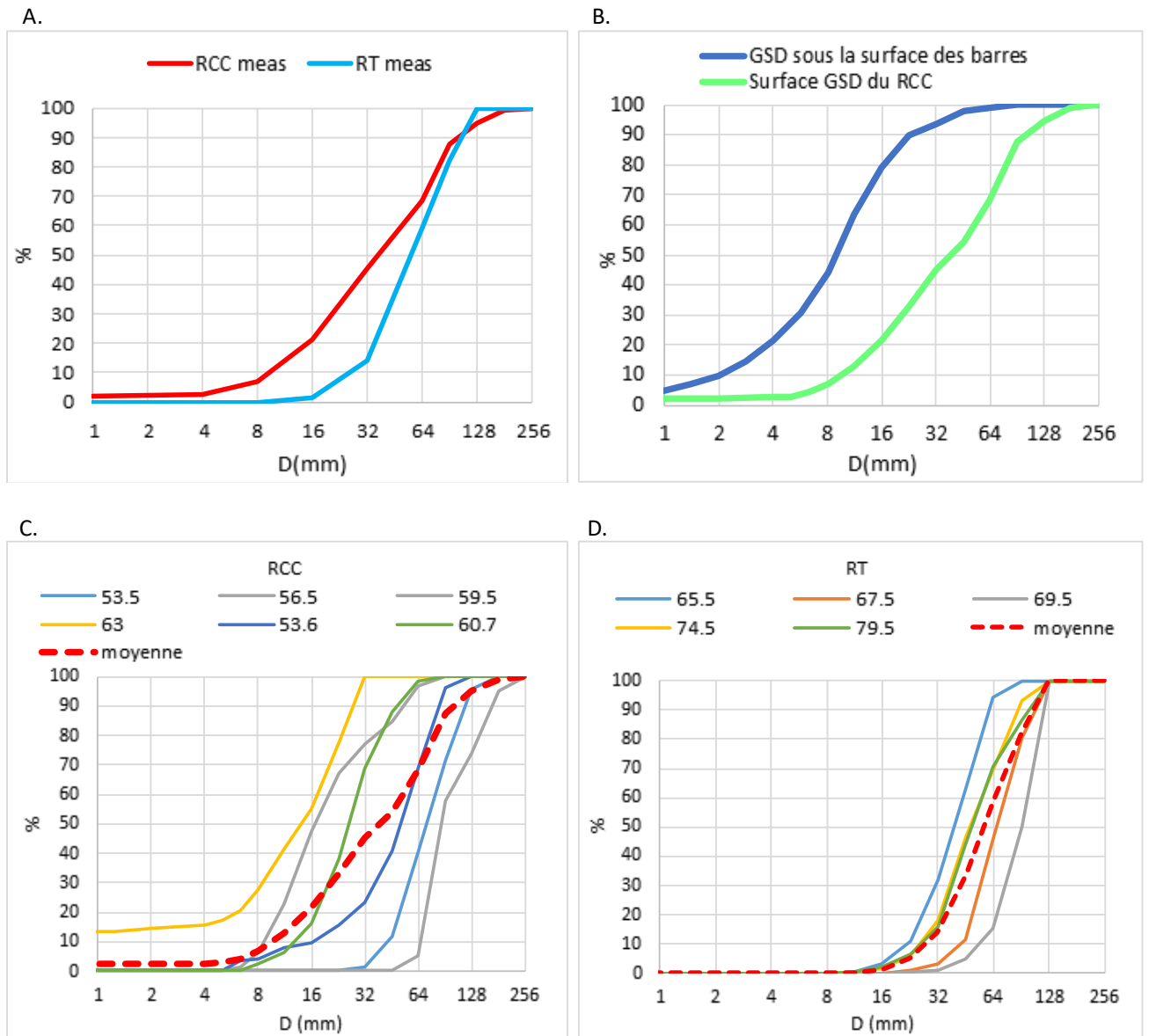


Figure 10 Distribution granulométrique moyenne pour RCC et RT basée sur des échantillons mesurés (A), DG moyenne de la sub-surface des bancs comparée à la DG moyenne de la surface de RCC (B), toutes les distributions granulométriques mesurées pour RCC (C) et RT (D) y compris la moyenne sur tous les échantillons (la légende indique la localisation dans PK).

4.5.3. 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). Comme on peut le voir dans Figure 11 la largeur est très variable le long du tronçon. 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.

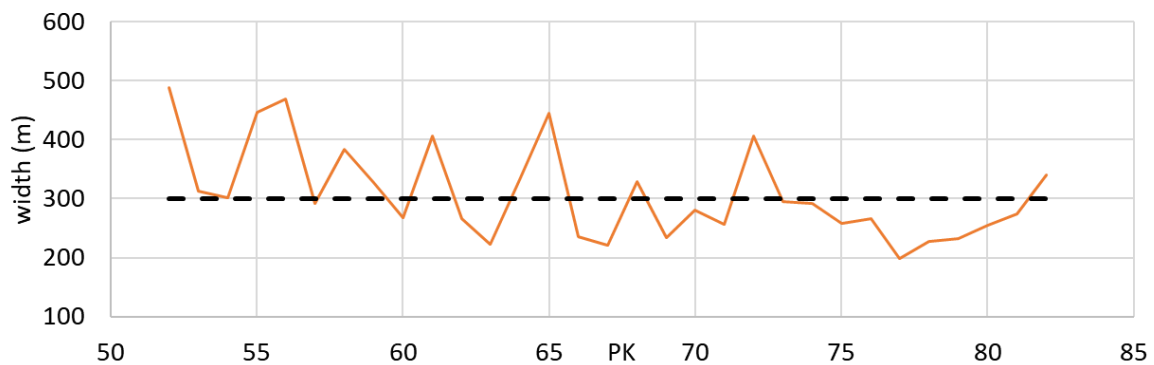


Figure 11 Largeur mesurée avant les endiguements (carte de l'Etat Major) (ligne orange) et moyenne sur l'ensemble du bief (ligne noire intermittente)

5. RESULTATS : ANALYSE HISTORIQUE

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

Comme nous l'avons vu dans la section 4, afin de définir les conditions initiales nécessaires pour simuler l'évolution du tronçon pendant la période post-endiguements, 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 analytiques et de modélisation afin d'estimer la composition historique du lit et les apports sédimentaires (voir section 4.2.1) pour lesquels aucune donnée n'est disponible. Nous rappelons que ces simulations n'avaient pas pour but de reproduire précisément le Rhône pendant la période de pré-endiguement ni d'étudier en détail le chenal pendant cette période.

Pour commencer, nous comparons notre DG historique estimée de la surface du lit (section 4.2.1, ligne pointillée verte dans la Figure 12) et la DG de la subsurface (ligne pointillée rouge) avec les mesures actuelles. Étant donné que seules les mesures de la D50 et de la D90 de la subsurface (barre) étaient disponibles, la DG complète de la subsurface a été estimée à l'aide de Bedloadweb. La Figure 12 montre que la DG historique estimée de la surface (basée sur la pente et la largeur moyennes estimées à partir de données historiques, d'un hydrogramme pré-barrage et de taux d'apport de sédiments estimés) est pratiquement identique à la DG moyenne mesurée du lit actuel. La DG historique estimée de la subsurface est plus grossière que la DG moyenne de la subsurface de la barre mais proche de l'échantillon de subsurface de la barre le plus grossier (en particulier le D50 et le D90). Cela présente un rapport de pavage de 2,6, une valeur qui se situe dans la plage normale pour une pavage mobile dans les rivières à lit de gravier naturel. Compte tenu du nombre limité de mesures de subsurface, nous considérons qu'il s'agit d'un bon résultat et qu'il confirme notre hypothèse selon laquelle la DG de subsurface des barres est une approximation raisonnable de la charge historique.

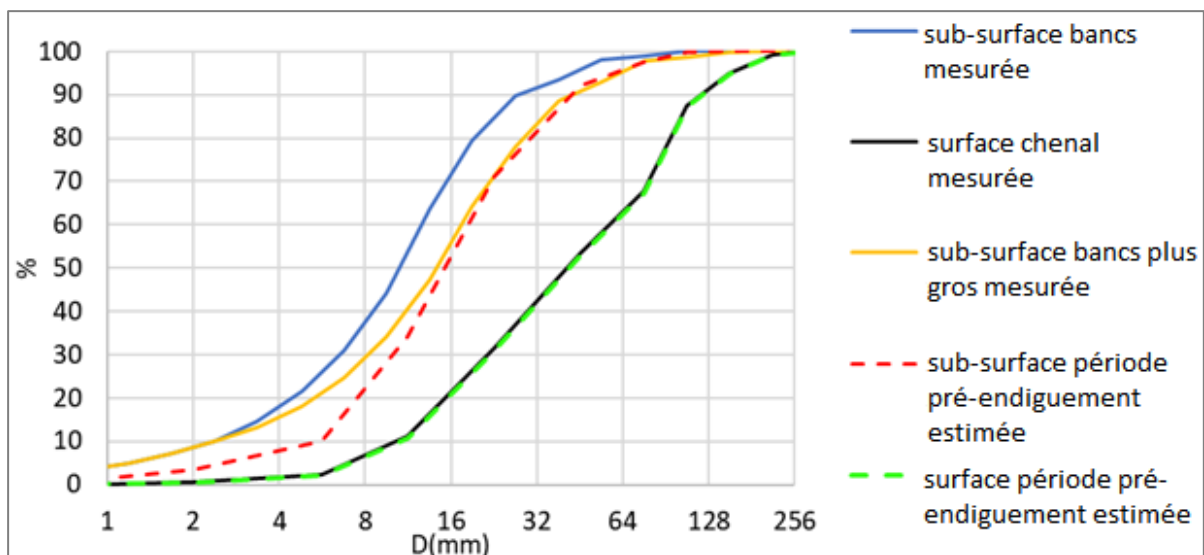


Figure 12 Estimation de la DG de surface et de sub-surface pour le chenal pré-endiguements comparée à la DG de surface mesurée et à la DG de sub-surface des bancs.

Nos estimations historiques du DG ont été mises en œuvre dans le modèle SGR et une simulation a été effectuée jusqu'à l'équilibre (40 000 ans) afin de les affiner (Figure 13). La DG de la surface et de la subsurface montre un léger grossissement au cours de la simulation d'équilibre (Figure 14) et un rapport de pavage de 3,1 à la fin de celle-ci.

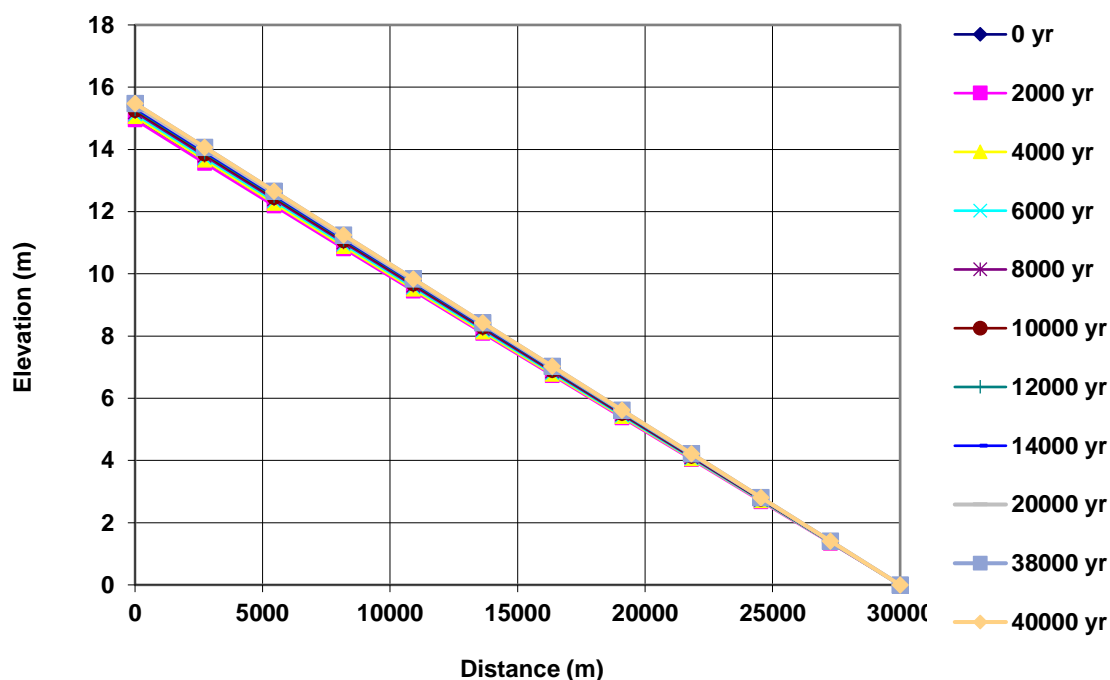


Figure 13 Elévation du lit de la rivière avant endiguements à partir d'une simulation à long terme.

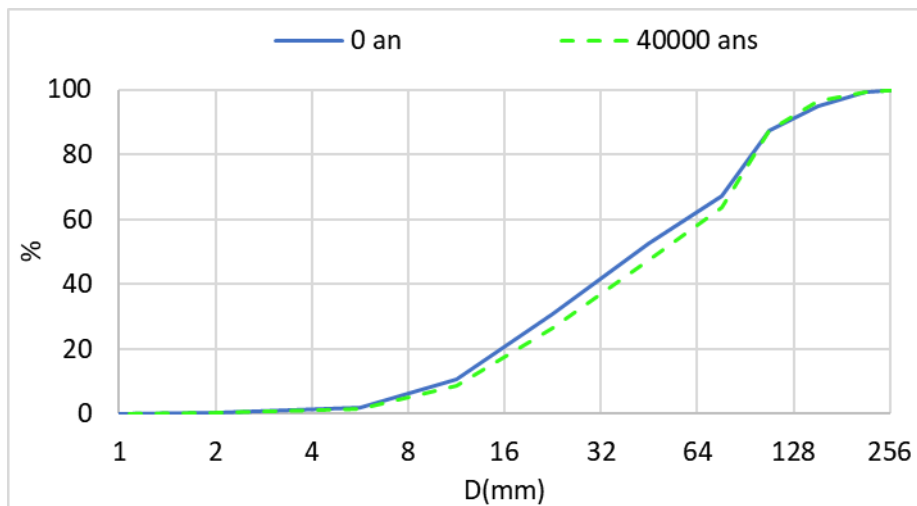


Figure 14 Evolution de DG pré-endiguement à partir d'une simulation à long terme

La somme de ces résultats confirme que les étapes d'analyse et de modélisation que nous avons utilisées pour estimer le flux historique de sédiments et la composition du lit pour le chenal avant l'endiguement (équilibre) constituent une approche appropriée pour déterminer les conditions initiales nécessaires pour simuler la période post-endiguement.

5.2. Période post-endiguement

Une fois que les conditions d'équilibre du lit avant la mise en place de la digue ont été déterminées, nous avons procédé à la simulation de la période de 80 ans après la mise en place de la digue en utilisant les conditions d'équilibre comme conditions initiales (composition du lit et élévation du lit) et une largeur de chenal réduite (230 m par rapport à 300 m ; Tableau 1).

Figure 15 montre l'évolution de l'élévation du lit au cours de la simulation de la période post-endiguement. Nous avons comparé les résultats avec l'élévation du lit mesurée en 1897 et immédiatement avant la construction des barrages (1969 - 1974 ; Figure 15). Bien que la simulation montre une légère réduction de la pente du lit au cours de la période post-endiguements, les profils sont bien dans la gamme des mesures de terrain, et nous considérons donc cela comme une bonne validation du modèle. De plus, les profils mesurés le long d'un tronçon élargi (PK40) confirment une légère réduction de la pente du lit (Figure 17).

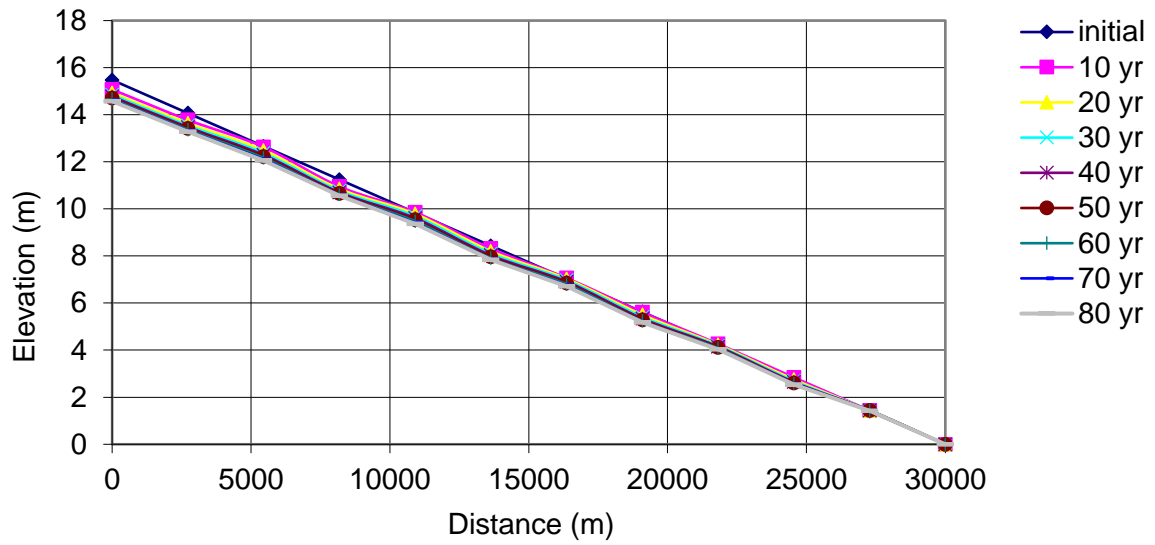


Figure 15 Élévation du lit au cours d'une simulation de la période post-endiguement.

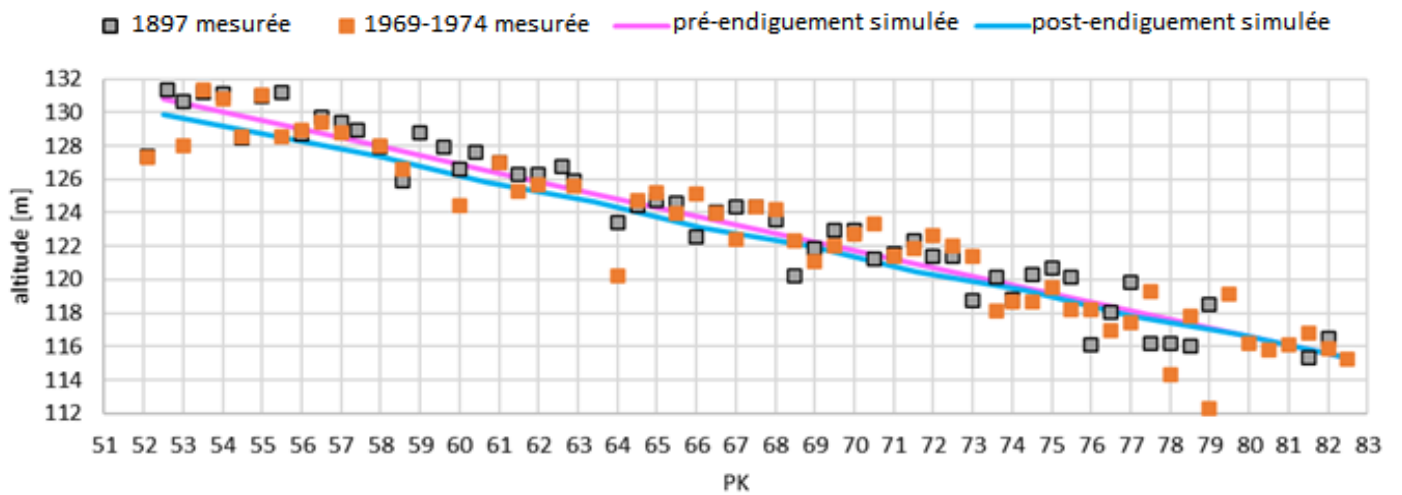


Figure 16 Thalweg mesuré en 1897 (début de la période post-endiguement) et 1969-1974 (fin de la période post-endiguement) et simulations au début et à la fin de la période post-endiguement.

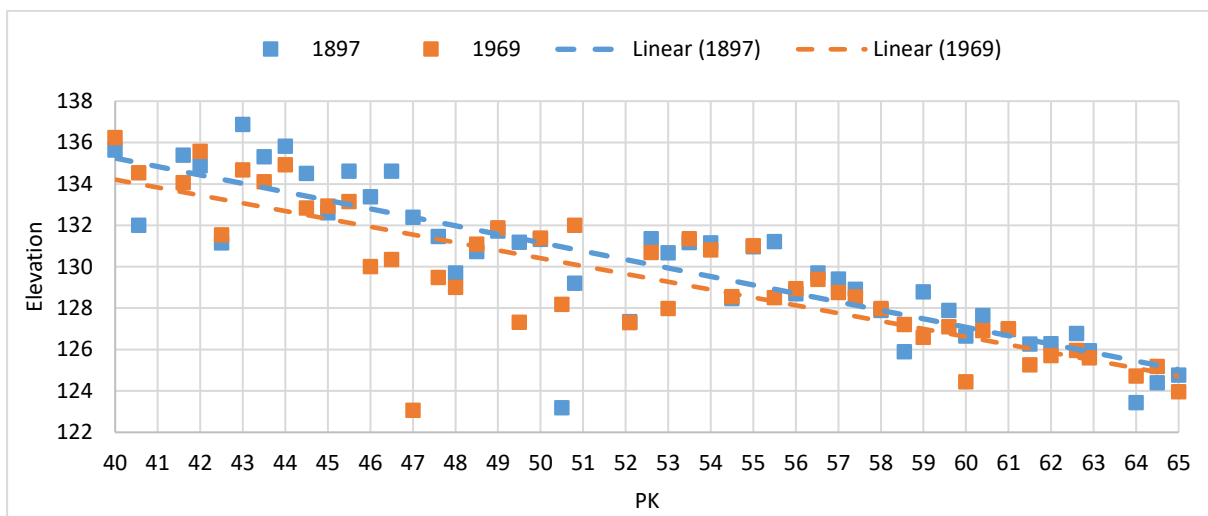


Figure 17 profils mesurés le long d'un tronçon élargi de PK40 à PK65

La distribution de la taille des grains est disponible à chaque nœud du modèle SGR (qui dans notre modèle était tous les 2,7 km). Figure 18A montre la distribution granulométrique de la surface du lit à différents endroits le long du chenal (2,7 km, 13,6 km et 27,3 km en aval, représentant respectivement l'amont, le milieu et l'aval du tronçon) à la fin de la période post-endiguements, comparée à la distribution moyenne de la surface pré-endiguements et aujourd'hui. Les distributions montrent un DG plus fine au cours de la période post-endiguements. Figure 18B confirme que cette diminution de DG était plus importante vers l'aval. Les raisons pour cette faible diminution de DG par rapport à la période pré-endiguement doivent être étudiées plus en détail.

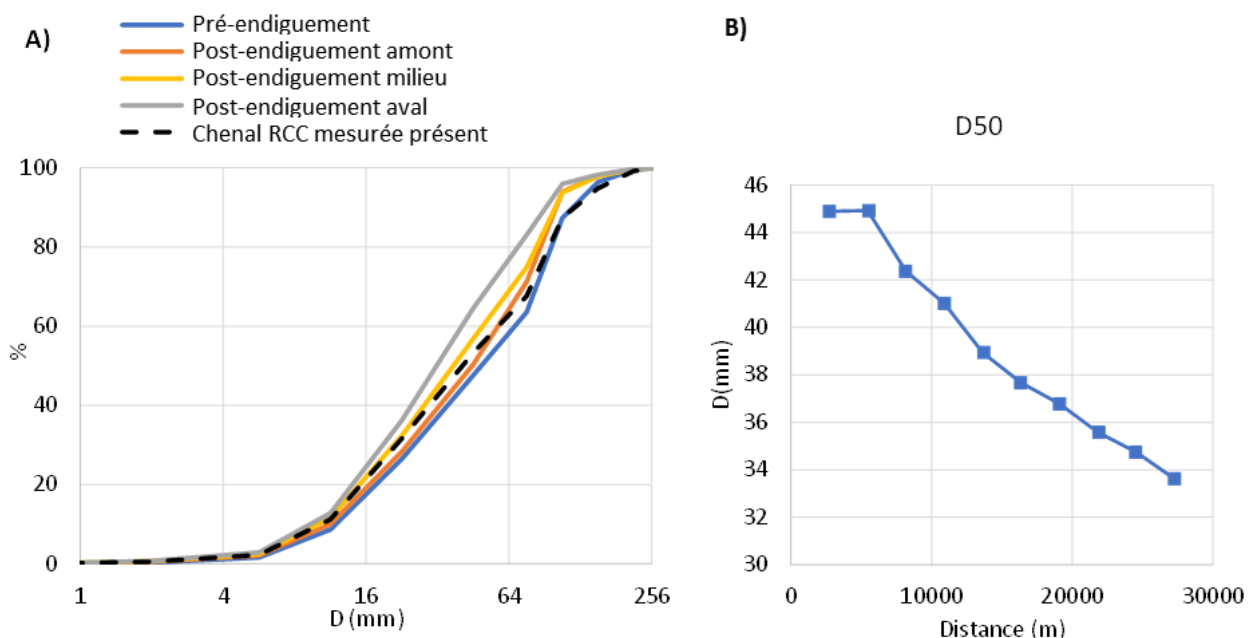


Figure 18 (A) Distributions de la taille des grains de surface le long du chenal à différentes périodes (B) D50 le long du bief à la fin de la période post-endiguement

En résumé, notre simulation de la période post-endiguements est en bon accord avec les profils en long mesurés au début (années 1900) et à la fin de cette période (années 1970). La simulation montre

une réduction mineure de la pente du lit et une petite diminution de DG de la surface du lit qui augmente dans la direction de l'aval.

5.3. Période post- barrage - RCC

La période post-barrage correspond à 50 ans entre la construction du barrage et aujourd'hui. Comme il a été mentionné précédemment, la limite aval dans le modèle SGR ne peut pas être modifiée. Ainsi, l'effet de la zone de rétention du barrage en aval ne peut être modélisé, ce qui rend le modèle SGR inadapté à la simulation de la Rhône Total. L'impact du barrage aval sur le lit actuel est modélisé en utilisant Basement et présenté dans la section 6.1.

Pour le RCC, la composition et l'élévation finales du lit issues de la simulation post-endiguement ont servi de conditions initiales pour la période post-barrage. Un hydrogramme réduit et une largeur de chenal réduite ont été imposés en réponse au barrage (Tableau 1). De plus, l'apport de sédiments a été réduit à zéro, conformément aux résultats montrant l'absence de transport de sédiments à travers le réservoir (présentés dans la section 6.1.).

Figure 19 montre l'évolution de l'élévation du lit au cours de la simulation de la période post-barrage. Elle montre une incision mineure en amont mais globalement très peu de changement sur la période de 50 ans. Ce résultat a été validé avec les changements de l'élévation du lit mesurée immédiatement avant la construction des barrages (1969 - 1974) et récemment (2007) (Figure 20). Il montre que la pente du lit à la fin de la simulation après barrage est dans la dispersion des mesures de terrain. Notez que l'incision du lit dans les mesures entre PK 64 et 70 est le résultat de l'extraction localisée de sédiments. (Parrot, 2015).

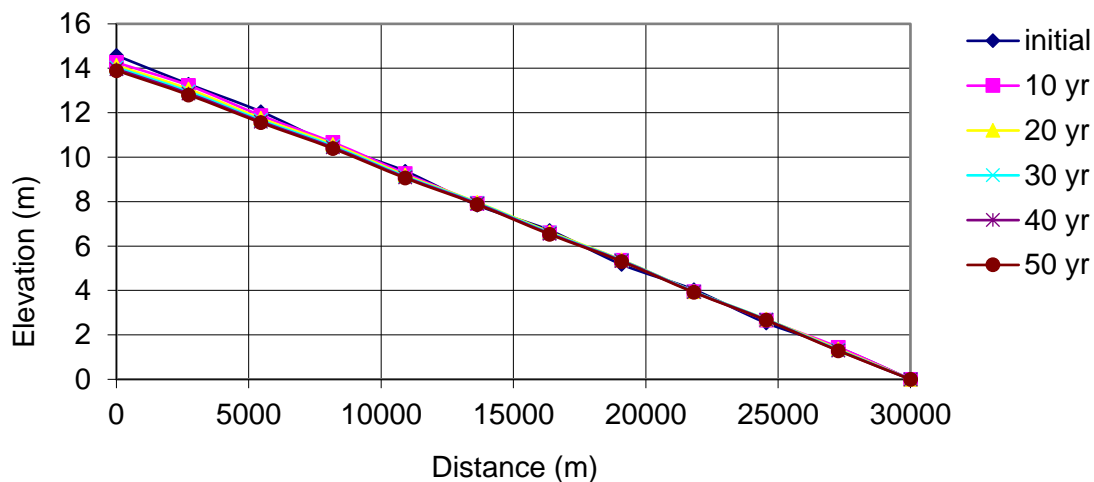


Figure 19 Élévation du lit tout au long de la simulation de la période post-barrage

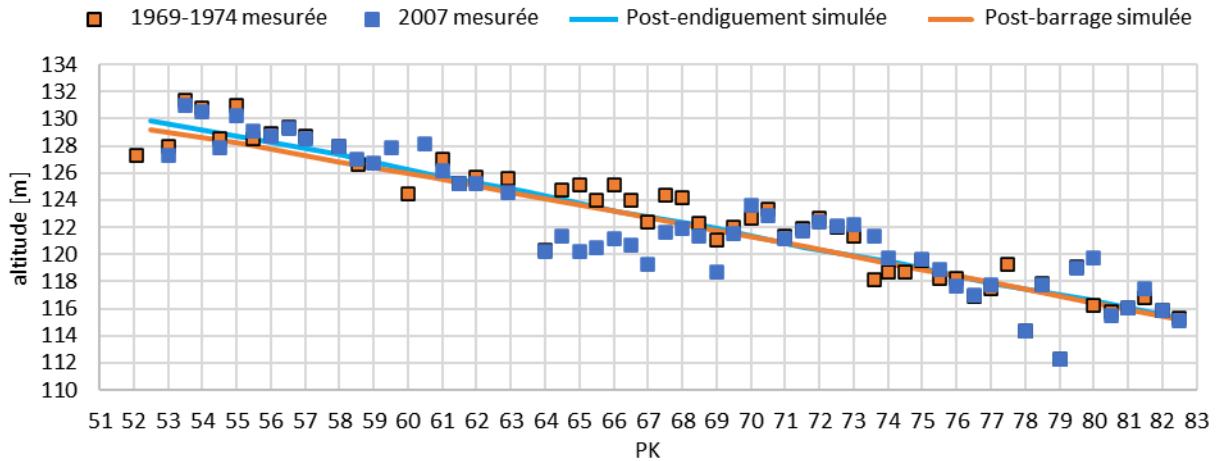


Figure 20 Élévation du lit mesurée et simulations au début et à la fin de la période post-barrage

Figure 21 montre la granulométrie de surface à la fin de la période post-barrage. Les résultats montrent que les tendances observées dans la période post-endiguements – le diminution de la DG de la surface du lit qui a augmenté vers l'aval - ont continué pendant la période post-barrage. Dans la Figure 22, la surface du lit simulée (en amont et en aval) est comparée aux mesures du lit actuel le long du chenal (ainsi que la moyenne). La DG de la surface du lit modélisée se situe dans la grande variabilité des mesures. Néanmoins, nous proposons deux hypothèses pour expliquer pourquoi une certaine diminution de la DG a pu se produire après le barrage (la D50 moyenne est passée de 40 mm à 25 mm) et qui méritent une étude plus approfondie :

Hypothèse 1 : Résultat de l'utilisation d'une formule de transport (Wilcock & Crow) qui n'est pas bien adaptée aux très faibles débits (Recking, 2013).

Hypothèse 2 : Après la construction du barrage, le chenal se comporte comme un système qui ressemble à un régime éphémère ; les flux intermédiaires (c'est-à-dire ceux qui sont typiquement responsables du développement d'une armure mobile) sont pour la plupart éliminés. Les faibles débits imposés la plupart du temps par les barrages ne donnent pas lieu à un transport actif qui ne se produit que lors de débits élevés brefs et peu fréquents (par exemple Hassan et al., 2006).

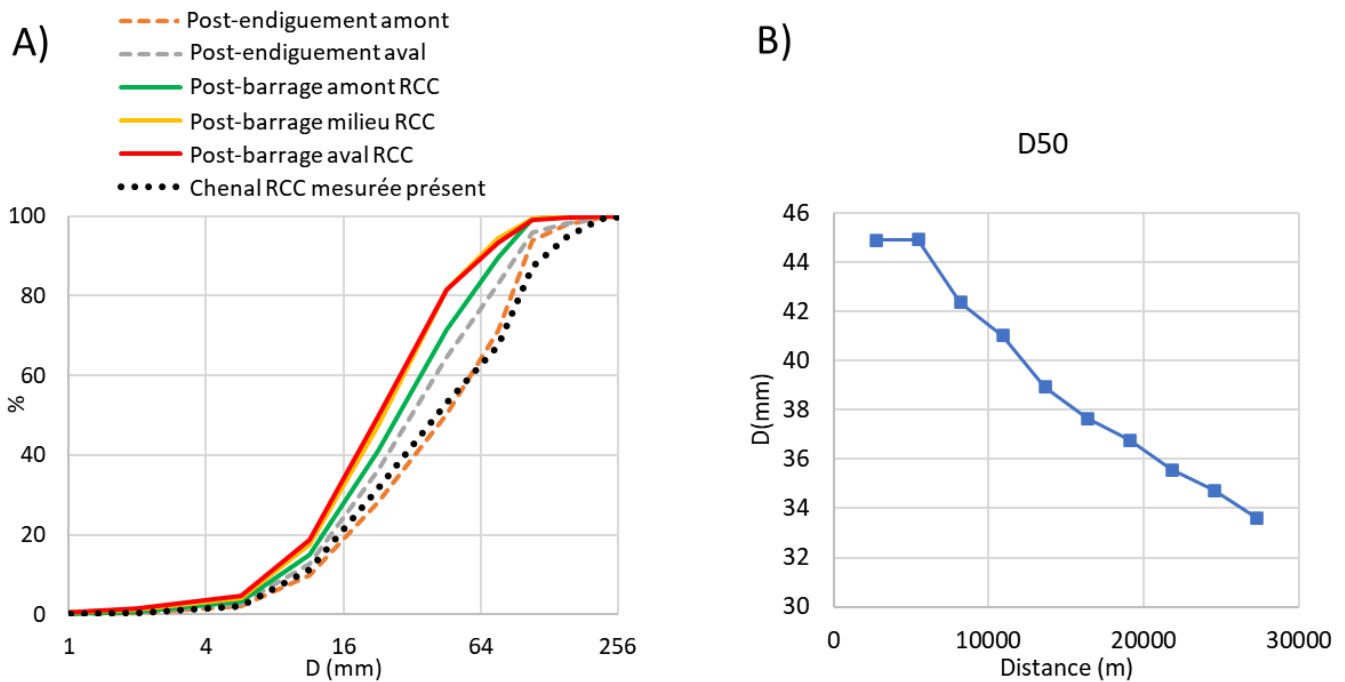


Figure 21 (A) Distributions de la taille des grains de surface à différents moments et endroits le long du chenal. (B) D50 le long de la longueur du bief à la fin de la période post-barrage.

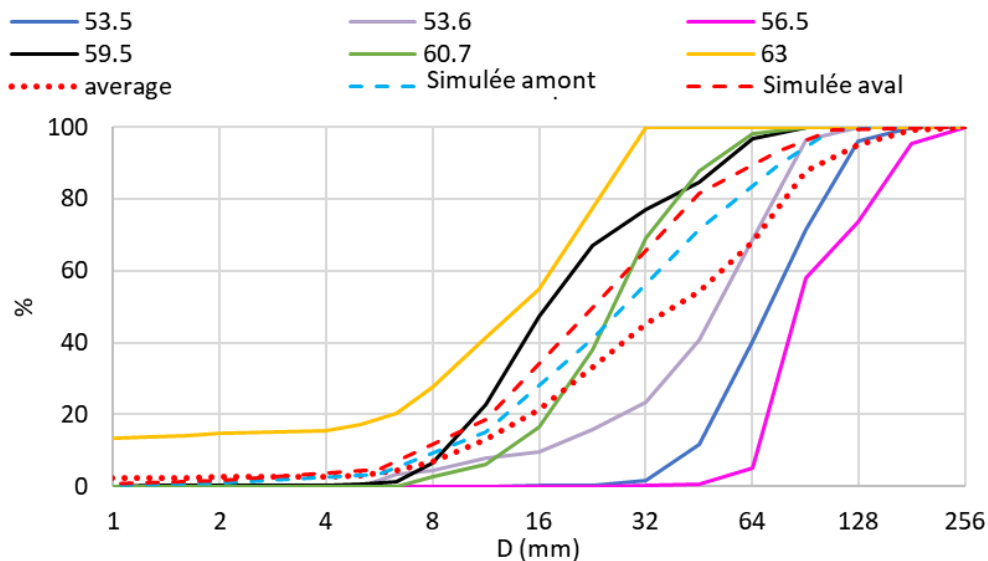


Figure 22 Distribution de la taille des grains de surface mesurée, moyenne et à différents endroits (valeurs PK) et en amont et en aval du bief à la fin de la simulation post-barrage.

Comme les barrages ont eu un impact simultané sur plusieurs variables (hydrologie, largeur, apport de sédiments, section 4.2.2), nous avons effectué des simulations dans lesquelles nous avons fait varier une seule de ces variables à la fois (respectivement désignées par Q, largeur et apport dans les séries, Tableau 1) afin d'étudier leurs effets individuels. Les impacts de ces trois changements post-barrage sur l'élévation du lit et le DG sont présentés dans les Figures 23 et 24.

On constate qu'une réduction du débit seule n'affecte pas la pente du lit mais entraîne une diminution de la granulométrie. Le rétrécissement du chenal seul conduit à une forte réduction de la pente mais à aucun changement de la granulométrie. Enfin, une réduction de l'apport en sédiments entraîne à elle seule une faible diminution de la pente du lit et une diminution de la granulométrie. L'absence

d'un changement significatif de la pente et seulement une très légère incision en amont lorsque les trois paramètres sont modifiés en même temps (Figure 19) par rapport au changement significatif de la pente en réponse à un changement uniquement de la largeur ou de l'apport de sédiments (Figure 23) suggère que la réduction du débit agit pour atténuer l'impact d'un changement de la largeur ou de l'apport de sédiments. L'apparition de la pente en réponse à une réduction prédominante du débit confirme l'hypothèse posée plus haut d'un changement de régime.

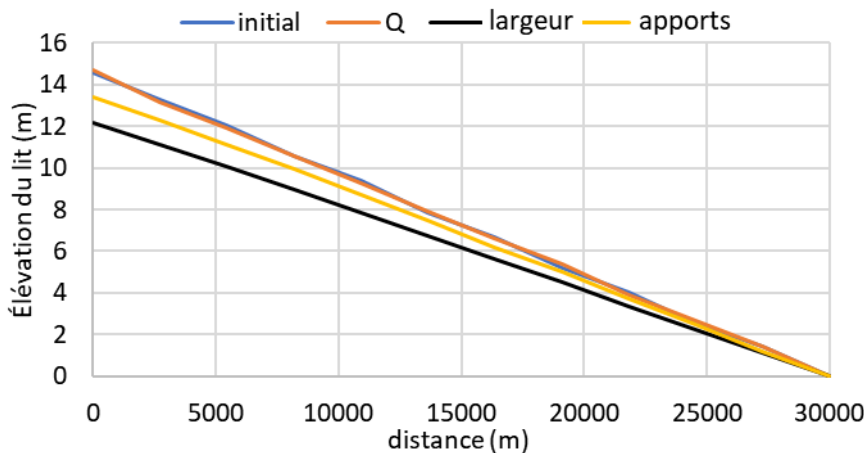


Figure 23 Élévation du lit mesurée à la fin de la période post-barrage pour chaque scénario par paramètre.

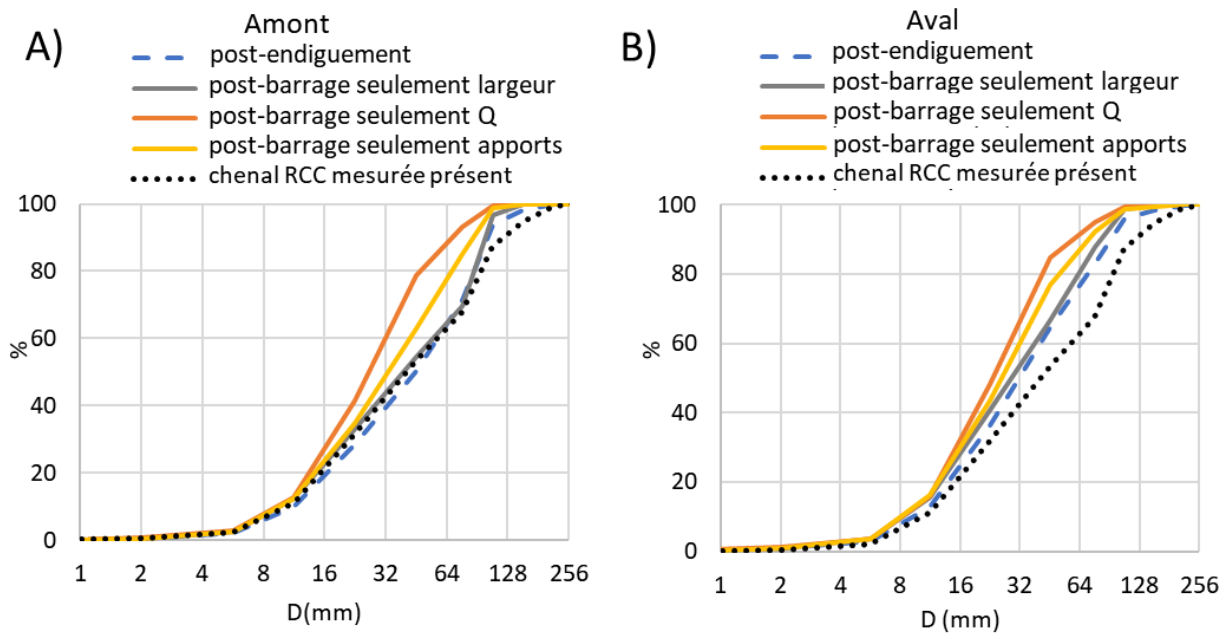


Figure 24 Distribution granulométrique mesurée de la surface à la fin de la période post-barrage pour les simulations dans lesquelles une seule variable a été modifiée à la fois.

Le rapport de pavage pour le lit simulé post-barrage est de 1,8 et 1,4 en amont et en aval respectivement. Ces valeurs sont inférieures à de nombreux ratios basés sur des mesures (Parrot, 2015) listés dans le tableau ci-dessous.

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

<i>PK</i>	<i>Taux de pavage</i>
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

En résumé, notre simulation de la période post-barrage montre des changements très mineurs dans l'élévation du lit, ce qui est en accord avec les mesures effectuées immédiatement avant la construction du barrage (années 1970) et aujourd'hui (2007). La distribution granulométrique de la surface du lit montre une tendance à diminuer (et par conséquent des rapports de pavage plus faibles). Deux hypothèses ont été proposées pour expliquer ce résultat. L'analyse de l'impact individuel des trois paramètres affectés par le barrage (débit, largeur et apport sédimentaire) confirme que la diminution de la DG est dû à une modification du débit, en accord avec nos hypothèses.

6. RESULTATS : LE PRESENT

Les résultats de l'analyse historique présentés dans la section précédente ont montré que les changements dans la morphologie du chenal au cours de la période post-endiguements et post-barrage étaient très faibles, ce qui suggère que le chenal est stable. En tant que tel, nous avons considéré qu'il était valide de simuler le lit actuel en utilisant des données actuelles (profils en travers, DG) plutôt que de se baser sur les simulations historiques. Cependant, étant donné qu'il n'existe pas de données permettant de calibrer les taux de transport, nous ne considérons pas que cela soit adéquat pour les simulations à long terme (historiques ou futures). Les analyses présentées ici sont basées sur des simulations à court terme (annuelles), à l'exception des réinjections, que nous avons simulées jusqu'à 50 ans, afin d'avoir une idée générale de la façon dont le lit pourrait évoluer.

6.1. Taux de transport actuels par fraction granulométrique

Nous avons commencé par analyser les volumes annuels de transport par fraction granulométrique sur le tronçon (Figure 25) sur la base d'un hydrogramme annuel moyen. Dans cette simulation, nous avons imposé un apport sédimentaire d'équilibre dans lequel l'apport est déterminé automatiquement par le modèle sur la base du taux de transport dans la première cellule. Une distribution granulométrique moyenne mesurée à la surface du lit a été utilisée pour le RCC et pour le RT. En général, les volumes totaux de transport à travers le tronçon prédits par le modèle sont très faibles (égaux à 42 m³ par an). On constate que la fraction granulométrique de 16-32 mm prédomine dans le RCC (en amont de la confluence) tandis que la fraction granulométrique de 32-64 mm est la plus dominante dans le RT (en aval de la confluence). Immédiatement en amont du seuil (PK60.5), le taux

de transport chute de manière significative en raison de l'effet de 'backwater' du réservoir. Les taux de transport chutent également de manière significative dans le réservoir du barrage, PK72 jusqu'à la fin du bief.

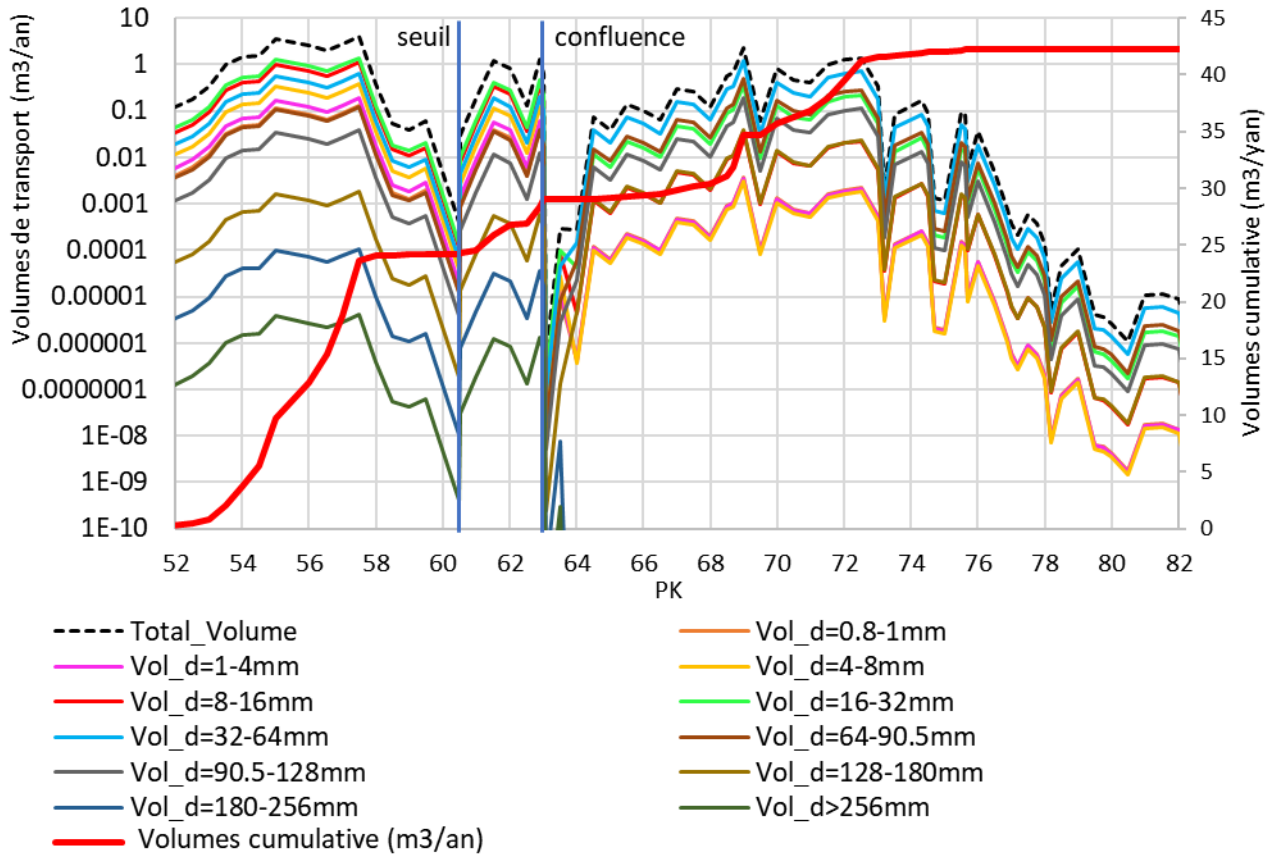


Figure 25 Volumes annuels de transport de charges par classe de grains et cumulés sur le lit actuel

Pour étudier plus en détail la capacité de transport à travers le réservoir, nous avons simulé un débit constant équivalent à Q10 - le débit le plus important de notre hydrogramme et nous avons examiné les taux de transport fractionnels (Figure 26). Nous pouvons voir que le transport de la charge de fond, même à ce débit élevé, est insignifiant dans le réservoir. Ensuite, nous avons simulé l'évolution du lit actuel sur 5 ans avec le même débit constant et avec l'apport de sédiments déterminé dans notre analyse historique (section 4.2.1 ; 2585 m³ /an). Nous voyons que ces sédiments ne sont pas transportés à travers le bief (Figure 26). Ce résultat indique que le débit post-barrage n'est pas capable de transporter beaucoup de sédiments. Sur la base de ces deux résultats, nous avons conclu qu'un apport de sédiments nul est une hypothèse raisonnable pour les simulations historiques post-barrage (section 5). Figure 28 est le changement de l'élévation du lit après 50 ans sans apport de sédiments et montre que le lit est très stable.

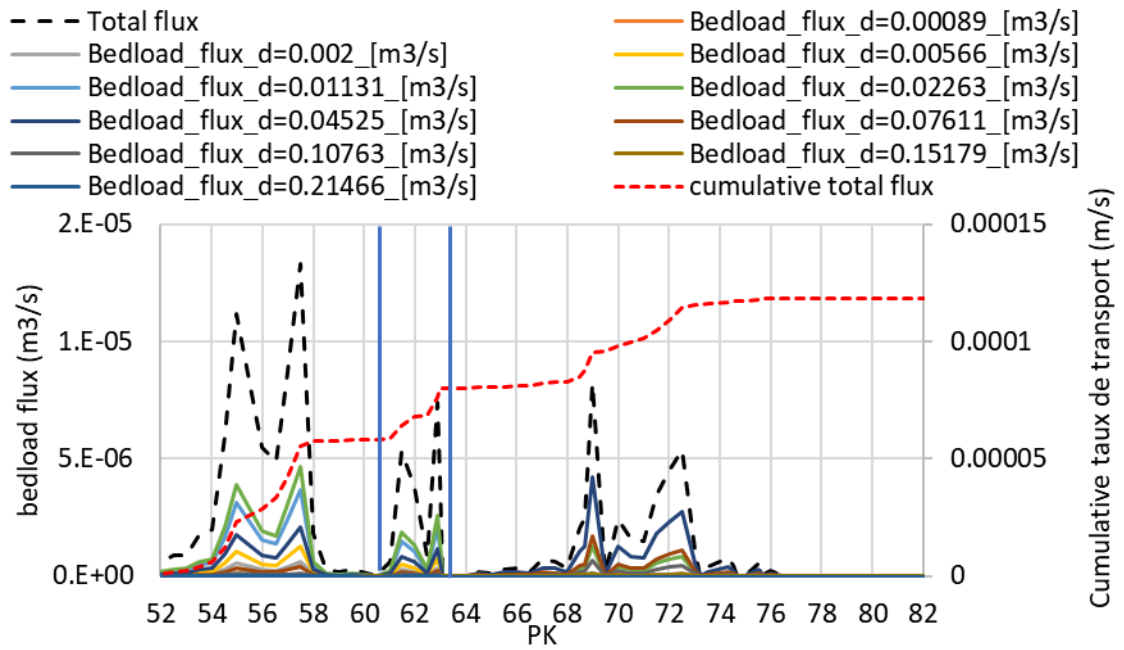


Figure 26 Transport fractionné pour Q10 pour le lit actuel

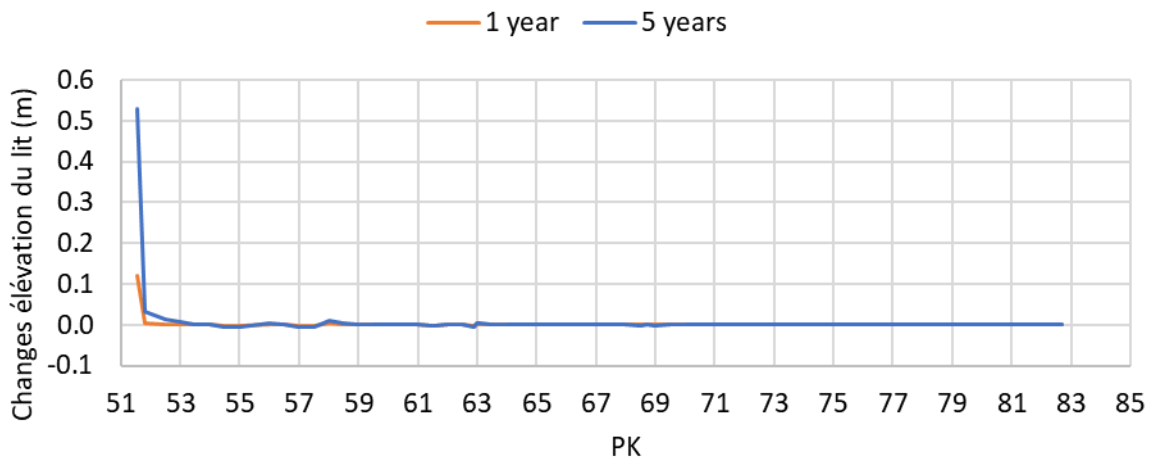


Figure 27 Evolution du lit actuel avec un apport de sédiments avant barrage après 1 an et 5 ans

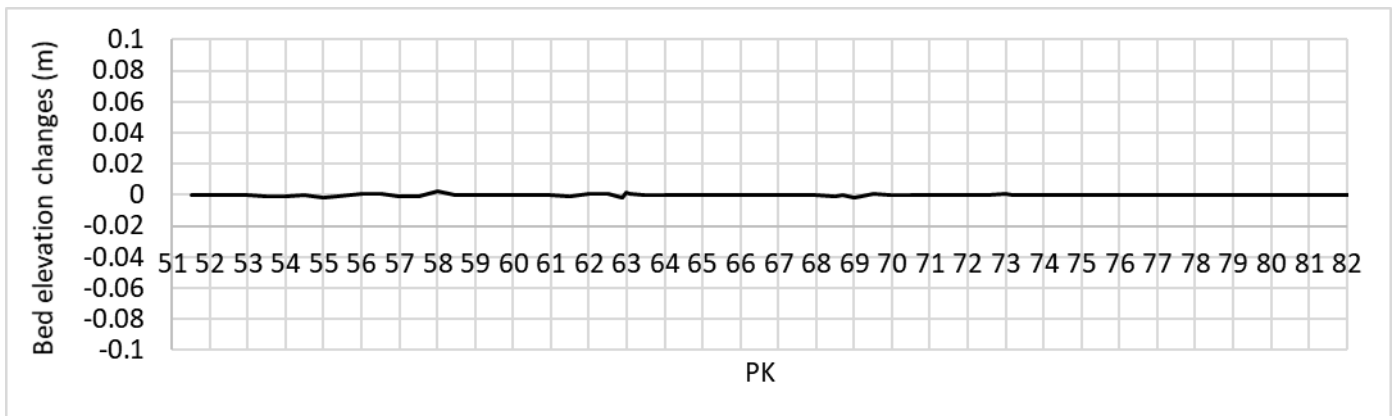


Figure 28 Élévation du lit après 50 ans de simulation

En résumé, nous avons utilisé le modèle Basement pour analyser le transport du lit dans le bief dans les conditions actuelles (hydrologie, profils en travers, DG). Le volume annuel estimé pour ce tronçon est très faible ($42 \text{ m}^3 / \text{an}$). Les fractions granulométriques dominantes transportées dans le RCC et le RT sont respectivement de 16-32 mm et 32-64 mm. Notre simulation montre que les effets de 'backwater' du déversoir et du barrage aval ont un impact important sur les capacités de transport, même pour des débits élevés. Ceci nous a amené à conclure qu'il est raisonnable de supposer un apport nul de sédiments dans le bief pour notre simulation historique post-barrage. Une simulation sur 50 ans sans apport de sédiments montre que le lit actuel est très stable. Pour l'instant, aucune donnée n'est disponible pour valider ces résultats.

6.2. 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 m^3 (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 m^3 de sédiments sans porosité dans le modèle. Nous avons également simulé un volume de réinjection beaucoup plus important de 50000 m^3 afin d'étudier ses impacts. Nous avons reconstruit une distribution granulométrique moyenne du matériau réinjecté à partir de quatre échantillons collectés par la CNR. La Figure 29 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 beaucoup plus fin que la surface du lit et se rapproche de la distribution des sédiments dans la subsurface des barres.

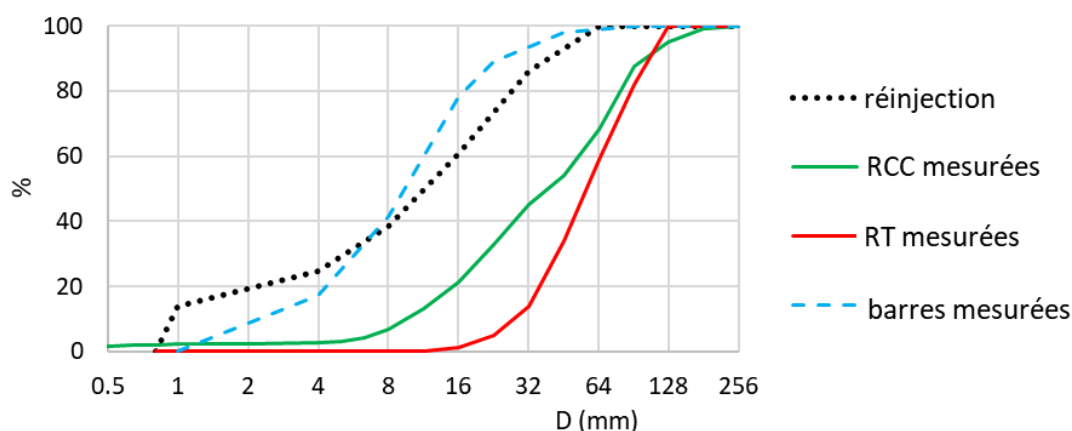


Figure 29 Granulométrie du matériau réinjecté comparée aux données simulées et mesurées dans le lit et les bancs.

Les réinjections simulées ont été implémentées à PK52.5, immédiatement en aval du barrage, comme dans le cas de la réinjection réelle. Etant donné que notre modèle est unidimensionnel, la réinjection a été répartie uniformément sur le profil en travers dans le lit mineur (Figure 30). Basement implémente automatiquement une réinjection sous la forme d'une pyramide avec une élévation maximale au niveau du site de dépôt qui se rétrécit vers la section transversale immédiatement en amont et en aval (étant donné notre espacement de profil en travers de 500 m, la réinjection s'est étendue sur environ 1 km de long).

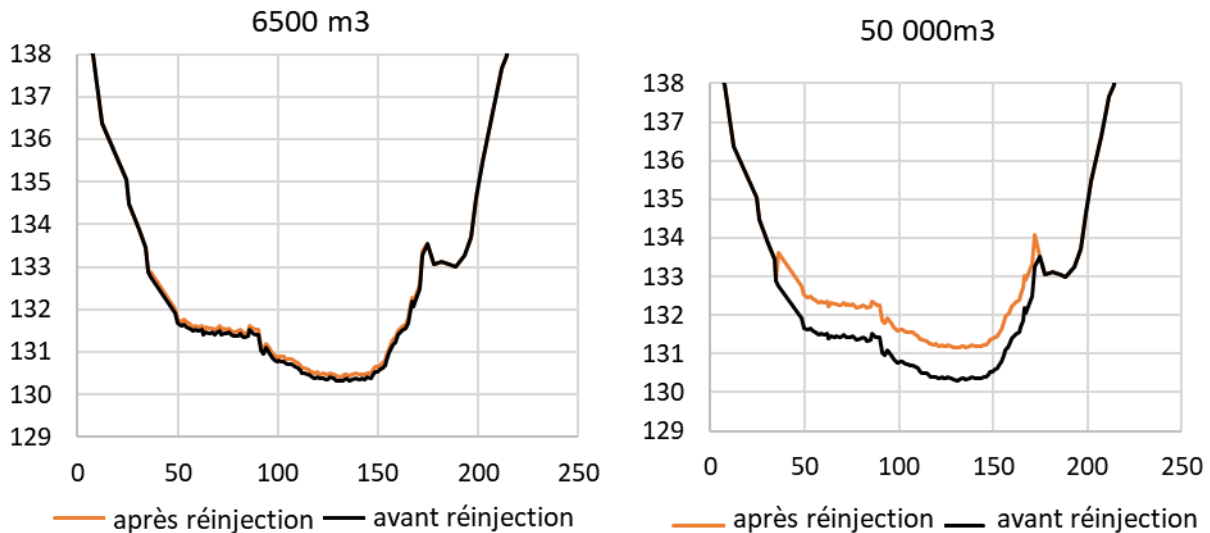


Figure 30 Profil en travers au niveau de PK52.5 (où se trouvait la réinjection) avant et après que les volumes de réinjection simulés aient été uniformément distribués dans le profil

Résultats et discussion

Figure 31 montre la différence d'élévation du lit immédiatement après la réinjection ("début") et après 1 et 50 ans par rapport à l'élévation du lit avant la réinjection (6500 m³ et 50000 m³ en A et B respectivement). Elle montre que si une partie des sédiments s'est propagée en aval, la pile de sédiments est toujours largement en place même après 50 ans (pour les deux volumes). La Figure 32 est un graphique du changement annuel relatif de l'élévation du lit sur différentes périodes (c'est-à-dire le changement total sur la période normalisée par le nombre d'années écoulées). Elle montre que la majorité du déplacement des sédiments se produit au cours de la première année suivant la réinjection et diminue au cours des années suivantes. Après la première décennie suivant la réinjection, très peu de sédiments continuent à être déplacés. Les deux figures montrent que la plupart des sédiments sont redéposés immédiatement en aval de la réinjection. Des changements égaux ou supérieurs à 0,5 cm sont observés jusqu'à PK54,5 pour la réinjection de 6500 m³ et PK57 pour la réinjection de 50000 m³, respectivement 2 et 4,5 km en aval du point de réinjection.

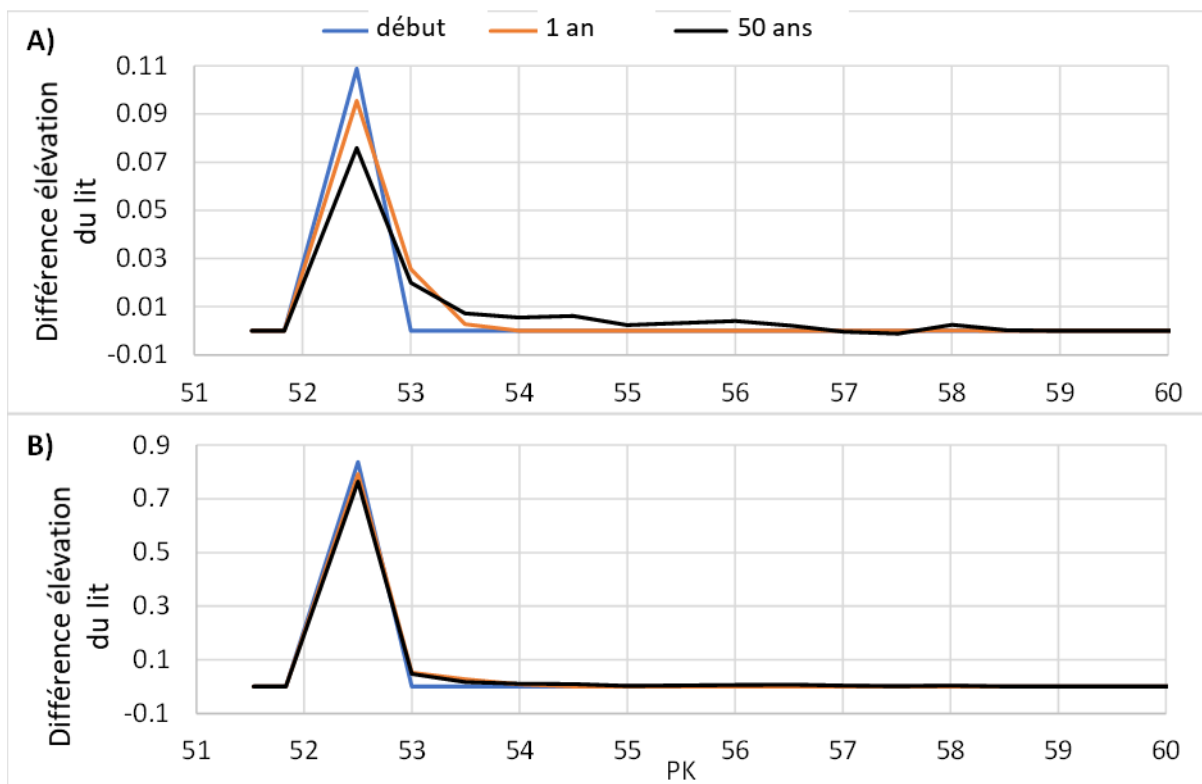


Figure 31 Différence d'élévation du lit après 50 ans pour A) 6500 m3 et B) 50000m3

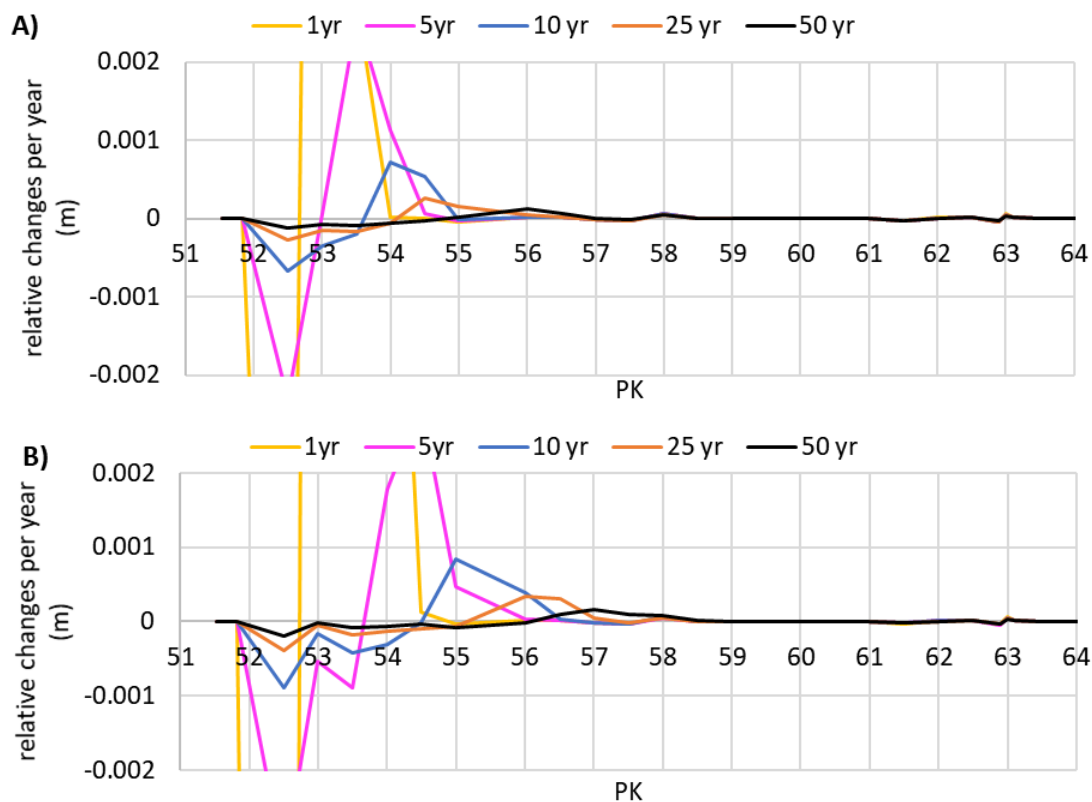


Figure 32 Différence relative de l'élévation du lit après 50 ans pour A) 6500 m3 et B) 50000m3

Figure 33 montre la distribution granulométrique de la surface du lit à 1 km en aval de la réinjection, où le dépôt le plus important a été observé (Figures 31 et 32), à différents moments après la réinjection par rapport à l'état initial du lit. Pour la réinjection de 6500 m³ (Figure 33A), on constate que la diminution de la DG se produit au cours de la première année et se poursuit jusqu'à la dixième année. Après 50 ans, un léger augmentation de la DG par rapport à l'année 10 est observé. Une tendance similaire est observée pour le volume de réinjection de 50 000 m³ (Figure 33B), cependant, l'augmentation de la DG se produit plus tôt, la distribution granulométrique la plus fine apparaissant à l'année 1. Ces résultats indiquent qu'après une phase initiale de diminuer la DG, le lit redevient progressivement plus grossier et retrouve son pavage mobile d'origine. Néanmoins, même après 50 ans, le lit est toujours plus fin qu'il ne l'était avant la réinjection (Figure 34).

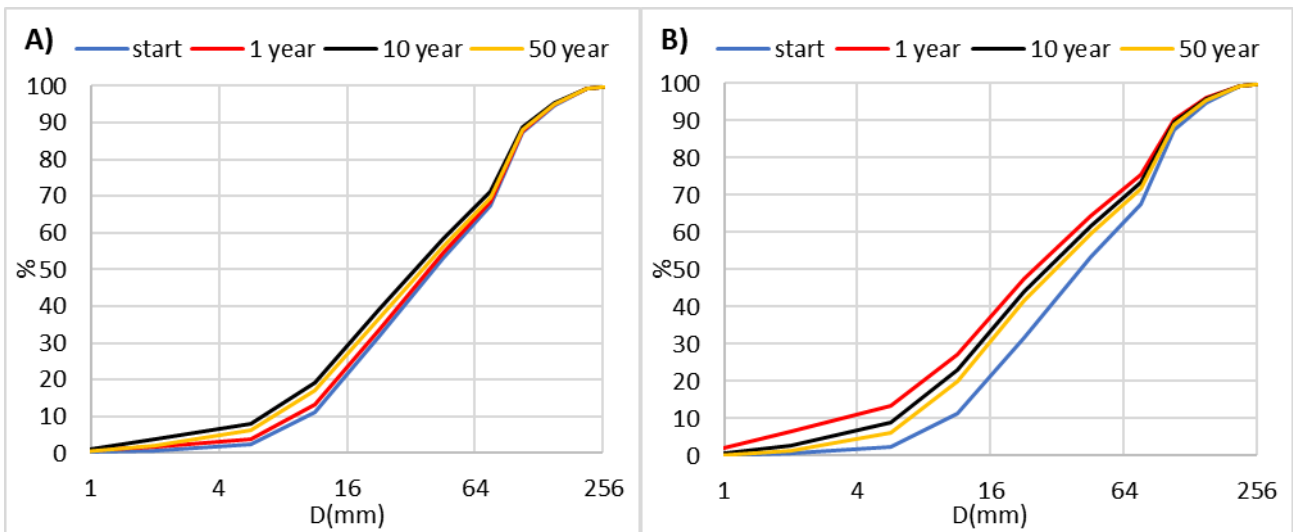


Figure 33 Changement dans la distribution granulométrique pour A) 6500 m³ et B) 50000m³.

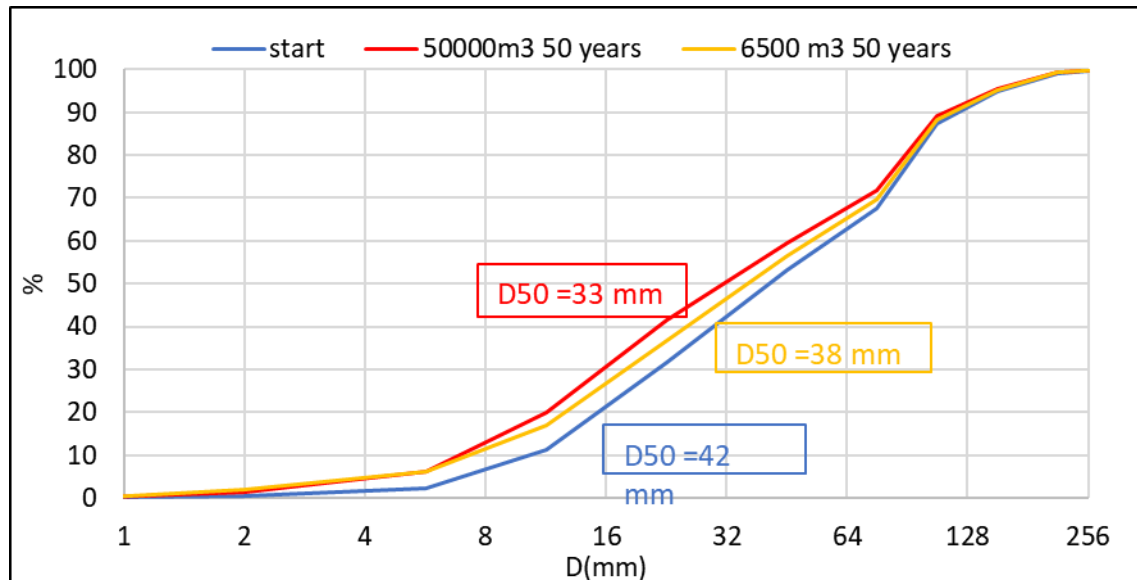


Figure 34 Évolution de la D50 après 50 ans post-réinjection.

Pour avoir une idée du débit nécessaire à la mobilisation du pieu de réinjection, nous avons comparé le flux total de charriage à différents débits (Figure 35). Le taux de transport à Q99,8% (c'est-à-dire 99,8% du temps où le débit est inférieur à cette valeur) sans réinjection est inclus pour comparaison.

Nous observons une réduction rapide des taux de transport pour les débits inférieurs à Q99,8% (2400 m³/s dans le RCC). A Q95% (830 m³/s dans le RCC) le taux de transport est négligeable et nous pouvons supposer que les sédiments issus de la réinjection sont immobiles. En résumé, les sédiments réinjectés sont transportés aux débits les plus élevés, comparé à un transport de sédiments nul sans réinjection, mais les taux de transport des sédiments réinjectés chutent très rapidement à des débits plus faibles.

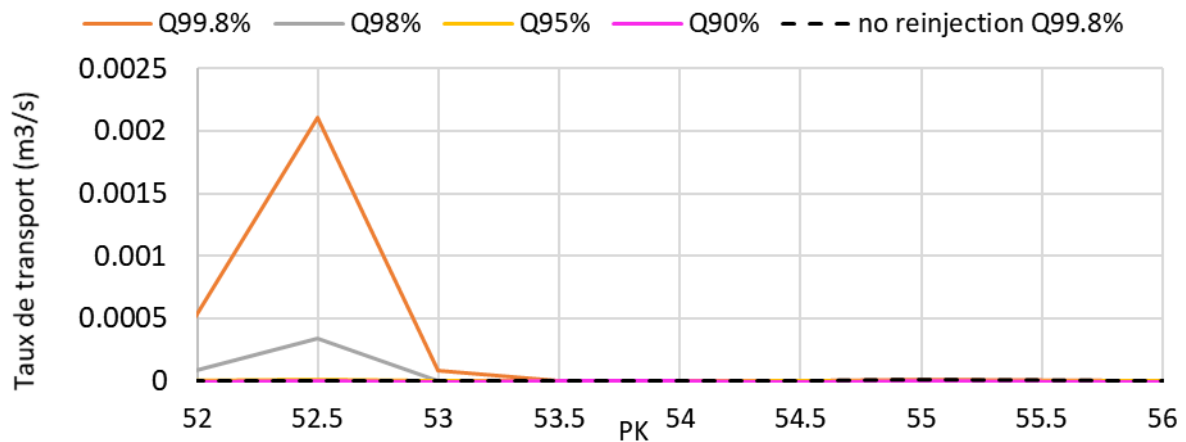


Figure 35 Flux de charriage total pour différents Q au cours de la première année après réinjection, comparé au flux de charriage total le plus élevé sans réinjection (ligne intermittente).

Ensuite, nous avons simulé l'impact de la réinjection en utilisant l'hydrogramme post-réinjection mesuré sur 7 mois (les mesures ont été effectuées par Geopeka dans le RCC). Pour ces données mesurées, le débit détourné vers le canal en période d'étiage est inconnu. Cependant, comme il n'y a pas eu de mouvement des sédiments réinjectés pour les débits inférieurs à 100 m³/s, nous avons ignoré tous les débits < 100 m³/s. Pour les débits plus élevés, nous avons supposé qu'un débit maximal était détourné vers le canal. L'élévation du lit à la fin de la simulation de 7 mois est montrée en Figure 36. Les changements d'élévation du lit sont visibles jusqu'au PK54 - 1,5 km en aval du point de réinjection. Le graphique montre que davantage de sédiments sont retirés de la pile de sédiments (réduction de 2 cm au PK 52,5) par rapport à un hydrogramme moyen d'un an (pile réduite de 1,3 cm, Figure 31A) en raison de crues plus importantes et multiples au cours de cette période de 7 mois. Le suivi RFID (Geopeka, 2019) a montré que les débits de l'ordre de 1000 m³/s n'ont pas transporté beaucoup de sédiments, en accord avec nos résultats. 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 bancs sont considérés) et un déplacement maximal de 1,8 km a été mesuré. Les propagations moyenne et maximale sont du même ordre de grandeur que les résultats de notre modélisation.

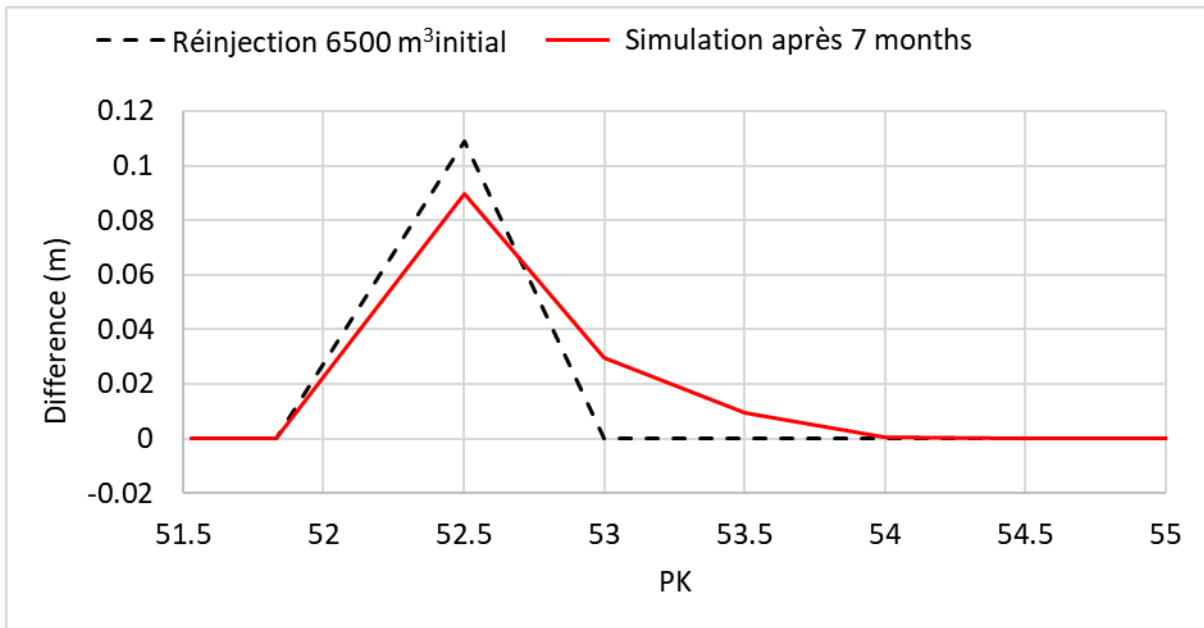


Figure 36 changements dans l'élévation du lit 7 mois après la réinjection de 6500 m³ avec l'hydrogramme mesuré

Dans un travail mené en parallèle à ce travail (action A2.4 in Vazquez-Tarrio et al., 2021), Daniel Vazquez-Tarrio a développé un modèle statistique d'estimation du déplacement des traceurs (appelé ici modèle VT). Figure 37 montre une comparaison des deux approches pour les mêmes conditions hydrauliques et de réinjection (6500 m³, DG actuel) après 1 an (A) et après 50 ans (B). Le modèle VT prédit un déplacement plus important vers l'aval, surtout à long terme. Nous supposons que les différences entre les deux modèles proviennent de l'interaction morphodynamique entre la réinjection et le lit du chenal qui n'est pas prise en compte dans le modèle VT. De plus, le modèle VT est basé sur la formule de transport du charriage de Recking qui prédit un transport moyen de 7780 m³/an, bien plus important que les 42 m³/an estimés par la formule de Wilcock & Crowe dans le Basement.

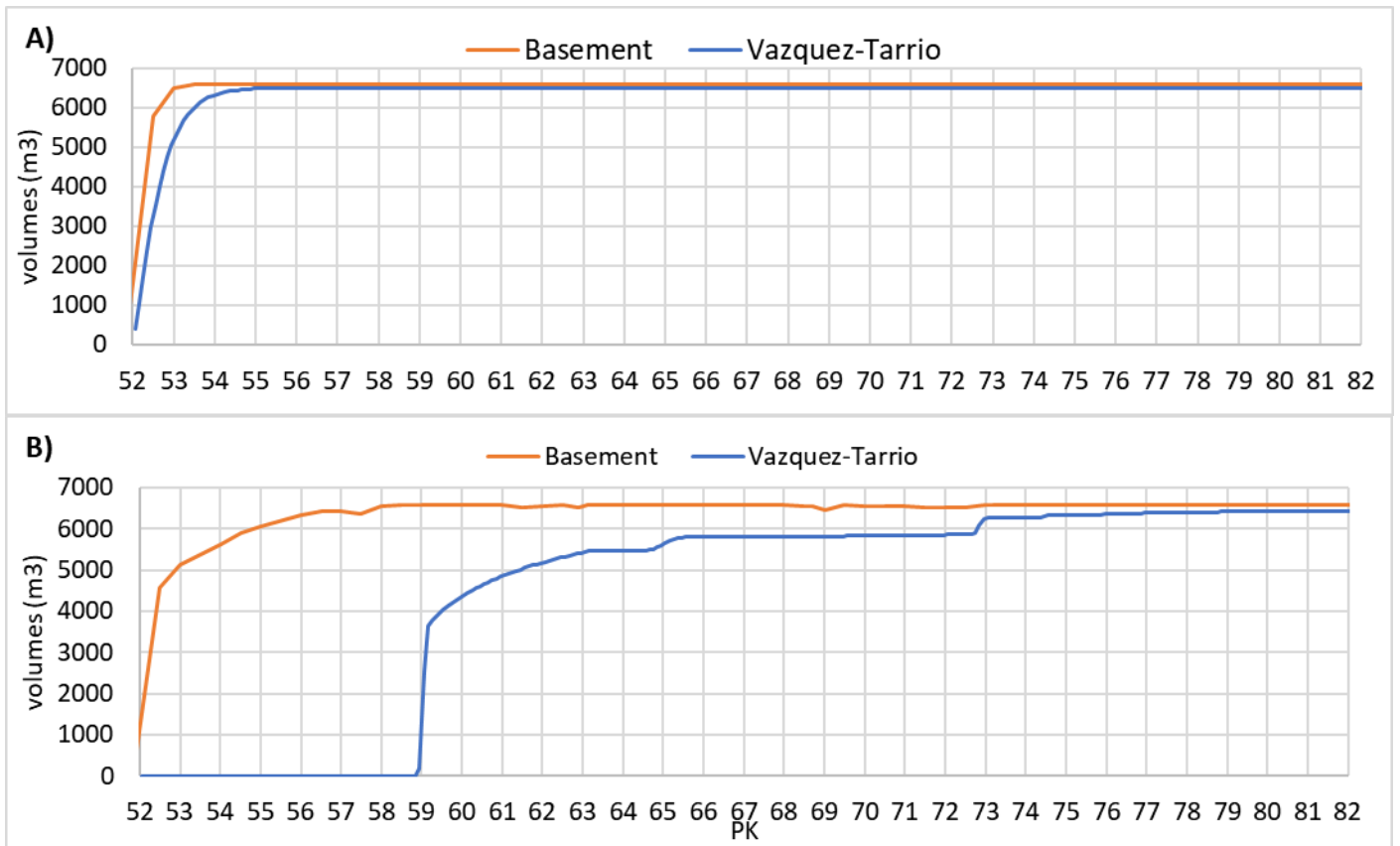


Figure 37 A) Volumes transportés 1 an après réinjection (6500 m³) comparant deux modèles et B) Volumes transportés 50 ans après réinjection

En résumé, les simulations d'une réinjection de sédiments avec une DG plus fine que le lit et similaire à la subsurface mesurée des barres montrent un certain déplacement vers l'aval qui se produit principalement dans les premières années suivant la réinjection. Cinquante ans après la réinjection, la plupart des sédiments sont encore en place. En aval de la réinjection, la surface du lit diminue la DG dans un premier temps, puis s'augmente. Seuls des débits très élevés, supérieurs à Q95%, sont capables de remobiliser les sédiments réinjectés. Les tendances observées dans les simulations sont du même ordre de grandeur que celles observées à partir du suivi RFID. Les simulations du Basement prédisent un transport vers l'aval moins important que le modèle VT, cependant aucune des deux prédictions ne peut être considérée comme valide sans plus de données. Ces simulations démontrent qu'un modèle morphodynamique 1D est un outil utile pour étudier le devenir général des réinjections. Cependant, des simulations 2D sont nécessaires pour étudier en détail les modèles de dépôt locaux.

7. ANALYSE DE SENSIBILITE

7.1. Formule de transport de la charge de lit

Comme expliqué au point 4.4.2, 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 les options 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 38) 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.

La Figure 38 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 début du transport de charriage se produit 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. Enfin, les simulations à long terme utilisant les formules de Wilcock et Crowe, Parker et Wu ont donné lieu à des tendances similaires en matière d'élévation du lit et de DG. 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 (Dépret et al., 2017a), nous avons procédé à l'utilisation de la formule de Wilcock et Crowe pour estimer le transport du lit dans cette étude.

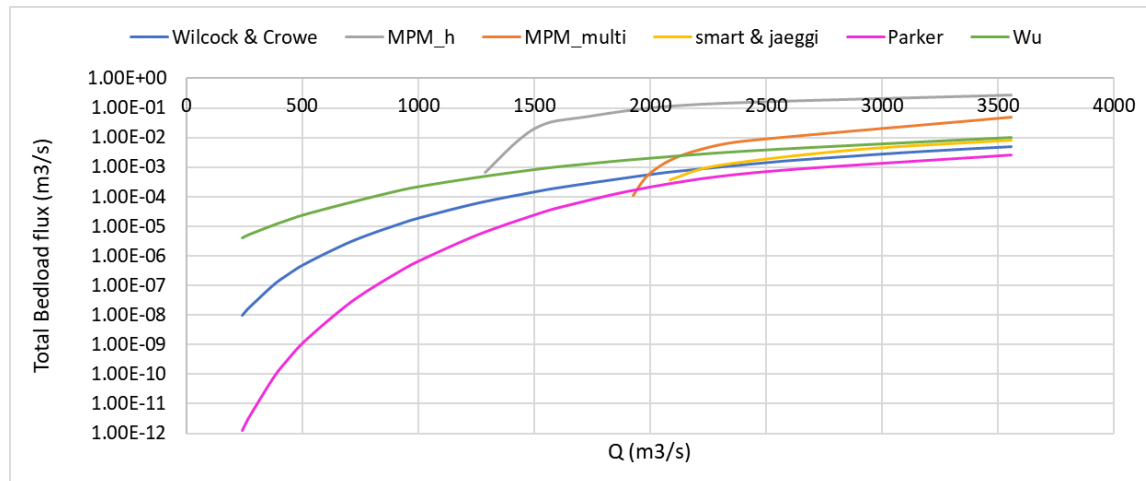


Figure 38 Courbes d'évaluation utilisant une variété de formules de transport de charges en Basement

7.2. 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-endiguements (75 ans) avec différentes valeurs de Strickler. La Figure 39 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.

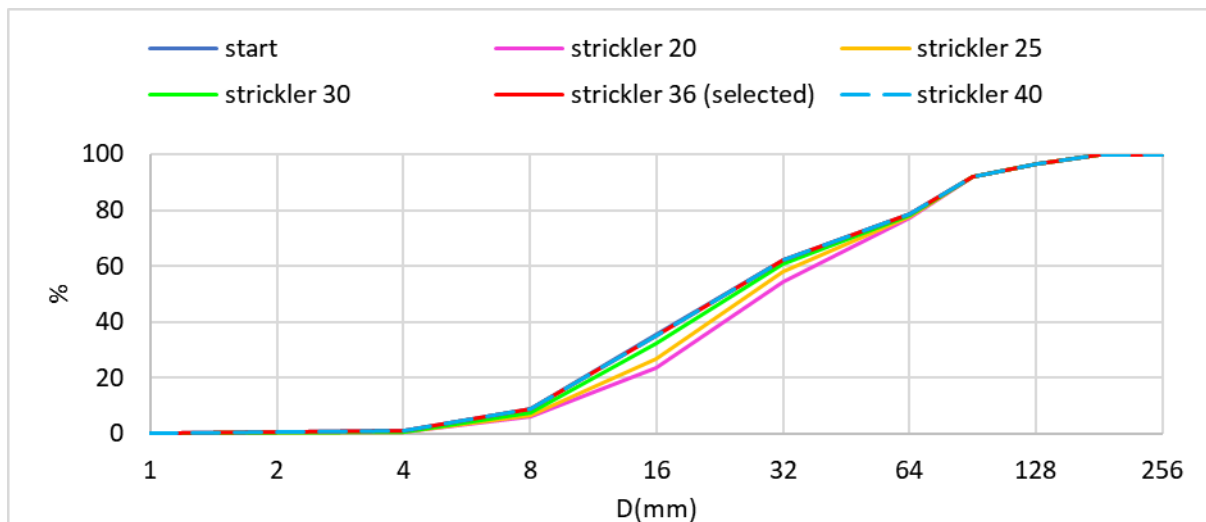


Figure 39 Test de sensibilité pour différentes valeurs de Strickler sur la distribution granulométrique

7.3. 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 4.5.3) 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 dans le 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 qu'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 40. 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.

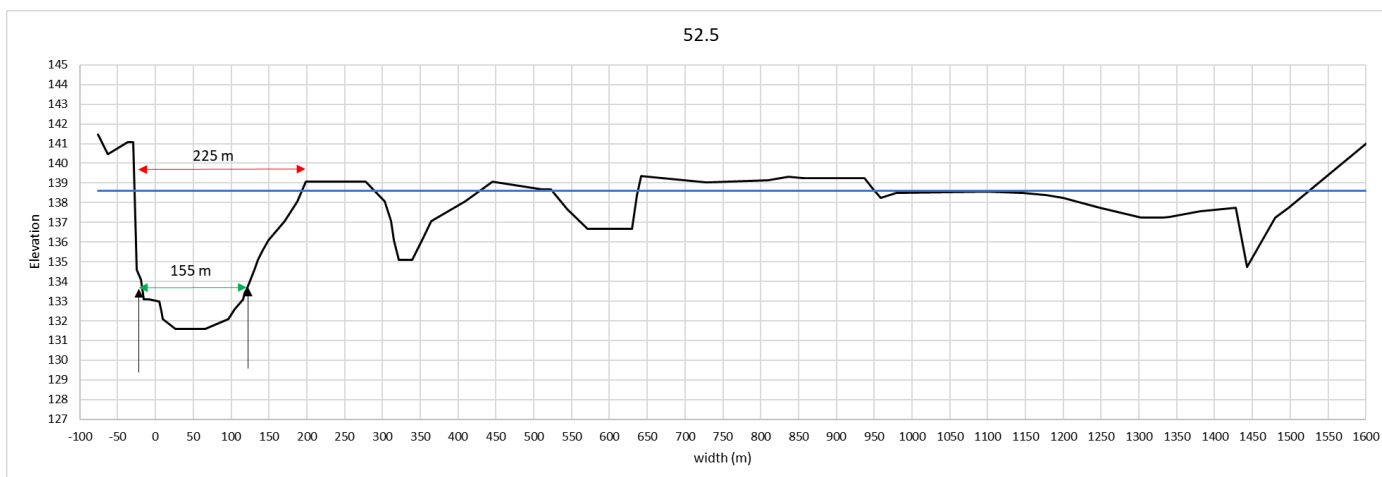


Figure 40 Résultat du modèle Mage 1D sur 1897 sections transversales. Le niveau d'eau est égal à un débit Q2.

7.4. 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.

8. LIMITES ET INCERTITUDES

Les travaux menés dans le cadre de cette étude présentent 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 et de données relatives à l'apport de sédiments et aux taux de transport du lit.

Le rapport EGR (2000) ne fournit que quelques valeurs globales limitées de D50 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 de granulométrie disponible pour le Rhône 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.

9. PERSPECTIVES

La prochaine étape de ce travail est de construire un modèle pour un deuxième tronçon du Rhône basé sur le protocole développé ici afin de continuer à étudier les avantages et les limites des modèles et de comparer les tendances entre les deux tronçons. Les résultats de ce travail doivent être validés au fur et à mesure que d'autres données deviennent disponibles (RFID, bathymétrie, mesures de flux...).

10. 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°RMRSRTR74* : 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, Piégay H, Cassel M, Noirot B, Bultingaire L, Yousefi S, Michel K, Dugué V, Camenen B. 2017a. Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Miribel-Jonage. Rapport de l'Observatoire des Sédiments du Rhône
- Dépret T, Riquier J, Piégay H. 2017b. 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
- 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.
- 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 [online] Available from: <http://www.graie.org/>
- 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 130 years: 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 Chneal sur le long-terme. OSR4

Recking A. 2013. An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **118** : 1264–1281. DOI: 10.1002/jgrf.20090

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

Vazquez-Tarrio D, Cassel M, Piégay H, Depret T, Arnaud F, Mouquet-Noppe C, Michel K, Noirot B, Vaudor L, Mora C. 2021. Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges: validation des estimations de charriage par des observations in situ

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.

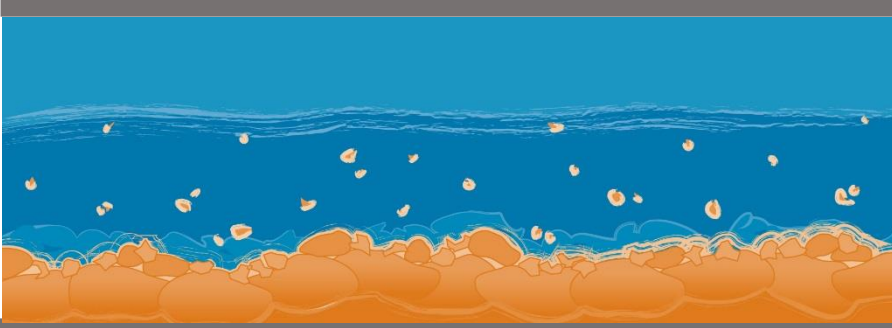
Viparelli E, Gaeuman D, Wilcock P, Parker G. 2011. A model to predict the evolution of a gravel bed river under an imposed cyclic hydrograph and its application to the Trinity River. *Water Resources Research* **47** : 1–22. DOI: 10.1029/2010WR009164

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



Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact :

agathe.chateaminois@graie.org