



HAL
open science

**Modélisation morphodynamique 1D du secteur
Donzère-Mondragon. OSR6 | Axe C - Action C3 |
Rapport scientifique final**

Alyssa Serlet, Michal Tal

► **To cite this version:**

Alyssa Serlet, Michal Tal. Modélisation morphodynamique 1D du secteur Donzère-Mondragon. OSR6 | Axe C - Action C3 | Rapport scientifique final. [Rapport de recherche] Aix-Marseille Université (AMU). 2022. hal-03750540

HAL Id: hal-03750540

<https://hal.science/hal-03750540>

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

The background of the cover is a photograph of a wide, rocky riverbank. The foreground is filled with numerous smooth, rounded stones in various shades of grey, tan, and brown. In the middle ground, a calm river flows, bordered by a dense line of green trees. The sky is a clear, bright blue with a few wispy clouds. A large, semi-transparent white wave-like graphic is overlaid on the image, framing the title text.

Modélisation morphodynamique 1D du secteur Donzère-Mondragon

Modélisation morphodynamique 1D du secteur Donzère-Mondragon

Rapport scientifique final

Version 13 avril 2022

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6ème programme d'action

Axe C – Développer des méthodes pour restaurer la qualité physique et chimique et évaluer les effets des actions

Action C3 – Evaluation de la durabilité et de la continuité sédimentaire à la suite d'opérations de recharge sédimentaire

Personnes impliquées

Alyssa Serlet (Aix-Marseille Université, CEREGE UMR 7330) ; Michal Tal (Aix-Marseille Université, CEREGE UMR 7330)

Pour citer ce rapport

Serlet, A., Tal, M. (2022). *Modélisation morphodynamique 1D du secteur Donzère-Mondragon*. Rapport scientifique final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. 32 p.

L'OSR est un dispositif animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter
Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)



Résumé

Ce travail constitue la continuation du travail de modélisation morphodynamique 1D démarré dans l'OSR5 en appliquant le même protocole au tronçon de Donzere Mondragon (DZM). Le travail comprend une étude de l'évolution historique en réponse à différentes phases de gestion (endiguements et barrages) et la caractérisation du flux sédimentaire actuel et des réponses aux réinjections de sédiments. Deux modèles morphodynamiques ont été utilisés ; le modèle "Spawning Gravel Refresher" adapté aux simulations à long terme pour étudier l'évolution historique, et le modèle "Basement" adapté aux simulations actuelles à court terme. Les résultats de ce tronçon sont comparés à ceux de Péage de Roussillon (OSR 5).

L'analyse historique montre que les endiguements et les barrages n'ont pas induit de changements majeurs dans le lit. Le taux estimé de transport de la charge de fond à partir d'une simulation basée sur les conditions actuelles de l'hydraulique et du lit été de 5415 m³/an. Nous soulignons la nécessité des mesures afin de valider les estimations et d'affiner les méthodes. Les taux de transport dans les réservoirs des barrages en aval des deux tronçons étaient insignifiants, ce qui suggère qu'aucune charge de fond n'est transportée à travers le barrage (c.-à-d. que l'apport de sédiments grossiers est nul). Comme PDR, DZM montre qu'une capacité très limitée à transporter les sédiments réinjectés vers l'aval dans le cadre de l'hydrologie annuelle moyenne actuelle. Les simulations ont confirmé que seuls des débits très importants sont capables de mobiliser les sédiments réinjectés (supérieurs à Q90%).

Globalement, les résultats montrent une bonne superposition avec les données mesurées, et des tendances similaires sont observées entre DZM et PDR. Compte tenu de l'absence de données historiques et de la simplification faite dans le modèle 1D, les résultats des simulations sont cohérents avec les mesures disponibles et suggèrent que les modèles fonctionnent correctement.

Mots-clés

Rhône ; Observatoire ; Sédiments ; Modélisation morphodynamique, évolution historique du lit, transport charriage, réinjections, Donzère-Mondragon

Table des matières

1. Contexte	5
2. Site d'étude	6
3. Méthodologie	7
3.1 Paramètres du modèle et résumé des simulations.....	9
3.2 Données disponibles	10
3.2.1 <i>Hydraulique et courbes de durée d'écoulement</i>	10
3.2.2 <i>Distributions granulométriques</i>	10
3.2.3 <i>Géométrie du chenal</i>	11
4. Résultats : analyse historique	12
4.1 Période pré-endiguement (chenal d'équilibre).....	12
4.2 Période post-endiguement.....	14
4.3 Période post-barrage – RCC	16
5. Résultats : le présent	21
5.1 Taux de transport actuels par fraction granulométrique.....	21
5.2 Réinjection de sédiments	24
5.2.1 <i>Configuration et validation du modèle</i>	24
5.2.2 <i>Résultats et discussion</i>	24
6. Discussion	28
6.1 Evolution historique	28
6.2 Dynamique actuelle.....	29
7. Perspectives	30
8. Bibliographie	30

1. Contexte

Le travail présenté dans ce rapport est une continuation directe du travail effectué dans l'OSR5 (Serlet & Tal, 2021) pour construire et valider un modèle morphodynamique 1D pour des tronçons clés du Rhône. Dans l'OSR5, nous avons établi un protocole pour modéliser l'évolution historique et le fonctionnement actuel du Rhône. Le tronçon du Péage de Roussillon (PDR) a servi de test pour développer notre approche de modélisation. Dans l'OSR6, notre travail s'est concentré sur l'affinement de la méthode développée dans l'OSR5 et sur son application au tronçon de Donzère-Mondragon (DZM). Les tronçons PDR et DZM ont été choisis en coordination avec la CNR en raison de leur fort potentiel de restauration ainsi que des données disponibles provenant des réinjections de sédiments effectuées récemment et du traçage RFID. Pour éviter toute confusion, une version mise à jour du rapport OSR5 (version B) a été soumise dans laquelle l'approche finale de modélisation est décrite en détail. Dans ce rapport, nous ne fournissons qu'un bref résumé des méthodes avant de présenter les détails du site d'étude DZM et les résultats pour ce bief. À la fin de ce rapport, nous comparons brièvement les principaux résultats pour les deux tronçons.

Pour rappel, les objectifs des travaux menés dans le cadre de l'OSR5/6 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 de voir 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 afin d'obtenir une compréhension générale de la morphodynamique.

Comme décrit en détail dans le rapport OSR5, les objectifs, les défis et les exigences en matière de données (conditions initiales et limites) pour étudier l'évolution à long terme du chenal diffèrent de ceux requis pour la dynamique à court terme. Les simulations historiques à long terme devraient idéalement commencer à partir de la représentation la plus précise possible d'un système en 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 visant 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 et complexe comme le Rhône).

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 basés 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.

Les deux modèles sont capables de simuler des mélanges de sédiments (granulométrie multiple) et sont tous deux disponibles gratuitement :

SGR : https://csdms.colorado.edu/wiki/Model:Morphodynamic_gravel_bed (11)

Basement : <https://basement.ethz.ch/>

Ce travail s'appuie fortement sur les données OSR disponibles qui comprennent la bathymétrie historique et actuelle, les distributions granulométriques, les courbes de durée d'écoulement et les sorties de modèle hydraulique 1D d'un modèle existant (Mage) développé par INRAE. Les périodes pré-endiguement, post-endiguement et post-barrage ont été simulées séparément. Chaque période a été validée avec toutes les données disponibles pour cette période. Les périodes suivantes ont été simulées sur la base des résultats de la période qui la précède. Afin d'estimer les paramètres historiques pour lesquels aucune donnée n'est disponible (apport de sédiments, distribution granulométrique en surface et en subsurface du lit du chenal), nous avons utilisé une approche analytique (Blom et al., 2017; Parker & Sutherland, 1990) couplée à une modélisation numérique utilisant Basement (voir le rapport OSR5 pour plus de détails).

2. Site d'étude

Le tronçon d'étude, Donzère-Mondragon (DZM) est compris entre le barrage de Donzère en amont (PK 171.5 en service depuis 1952) et le barrage de Caderousse en aval (PK 213.1 en service depuis 1975). Le tronçon a une longueur d'environ 40 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 (PK 201) 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 (Figure 1).

L'Ardèche rejoint le Rhône au PK 192. Dans le RCC, un total entre 3 200 000 et 3 900 000 m³ a été extrait pour l'exploitation des sédiments entre 1969 et 1991, la majorité en aval de la confluence avec l'Ardèche (PK 192 -201 ; Laval et al., 2021).

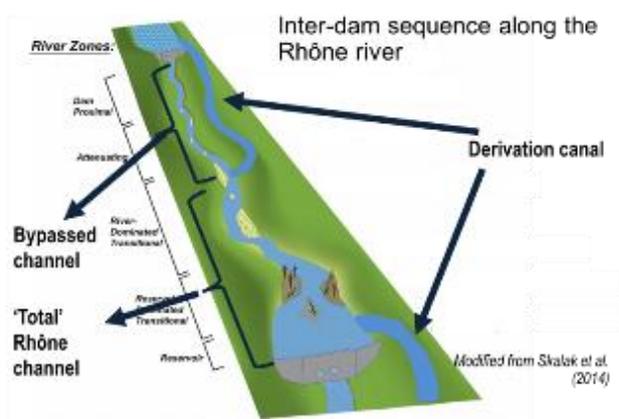


Figure 1 Schéma d'un tronçon typique du Rhône entre deux barrages

3. Méthodologie

Pour une description complète du protocole suivi et les justifications, il faut se référer au rapport OSR 5 (Serlet & Tal, 2021). Nous reprenons ci-dessous seulement les principaux aspects.

Nous avons utilisé le modèle SGR pour l'étude historique :

- 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)

Nous avons utilisé le modèle Basement pour étudier le système actuel :

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

Compte tenu des multiples phases de travaux sur le chenal réalisées tout au long du 20e 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 distribution granulométrique (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 & Nelson, 2018)
4. La charge sédimentaire transportée estimée dans les conditions du lit actuel sous 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 pré-endiguements du lit était de définir l'état initial de la période post-endiguements. Une étude de la période 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 2 résume la chronologie des périodes historiques du Rhône et les simulations qui leur correspondent.

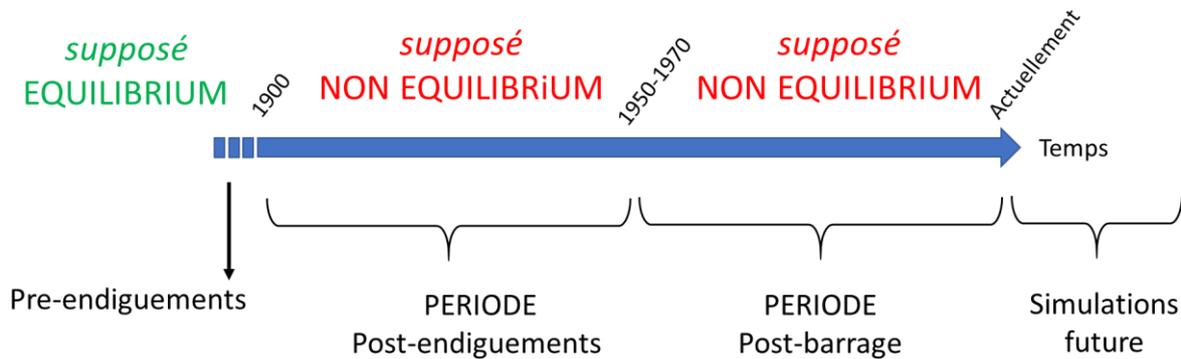


Figure 2 Vue d'ensemble des différentes périodes impactant le lit du Rhône

Toutes les structures hydrauliques ont été intégrées dans le modèle Basement. Le modèle commence juste en aval du barrage de Donzère (PK172) et reçoit le débit entrant dans le RCC (Q_{in_rcc}) à cette limite amont (Figure 3). A la confluence avec le canal (PK201), on définit un débit hydraulique entrant (Q_{in_canal}) égal au débit passant par le canal. Un autre apport hydraulique est défini au niveau de l'affluent de l'Ardèche (PK192). À la limite aval (PK212), 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.

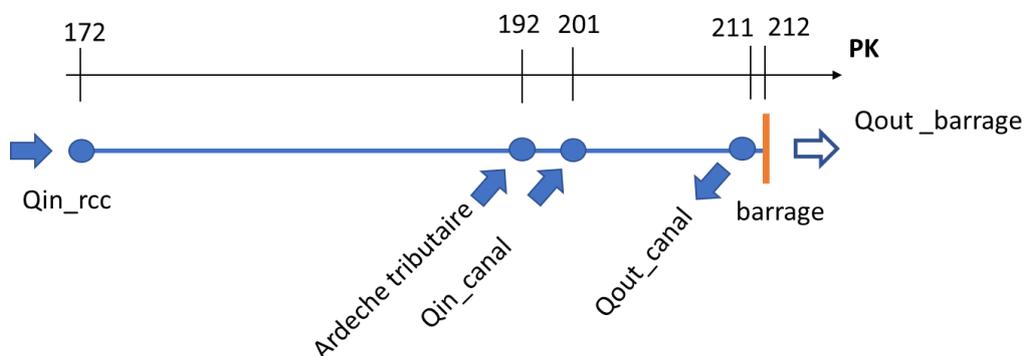


Figure 3 Représentation schématique de la configuration du modèle pour la période post-barrage

3.1 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 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 11093 m³ /an (3.518E-04 m³.s⁻¹) pour les simulations pré-endiguement et post-endiguement. Suite à notre analyse des taux de transport actuels qui montrait qu'aucun sédiment grossier ne traversait les réservoirs du barrage (section 5), nous avons supposé un apport de sédiments nul dans la simulation post- barrage,

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 5.

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 (<1907)	jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint	440	Pente fixe basée sur le profil en long de 1907 (Parrot, 2015)	Pré-barrage	Estimé	11093 m ³ /an
Post-endiguement (1907-1952)	45 ans : jusqu'à la construction du barrage en amont	270	Etat du lit d'équilibre pré-endiguement	Pré-barrage	Composition du lit d'équilibre pré-endiguement.	11093 m ³ /an
Post-barrage_1 (1952-2022)	70 ans	RCC 190	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 (1952-2022)	70 ans	RCC 2a : 270 2b : 190 2c : 270	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 : 11093 m ³ /an 2b : 11093 m ³ /an 2c : 0 m ³ /an

3.2 Données disponibles

3.2.1 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 4). 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 (OSR4 report I.4, 2017; Vázquez-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.

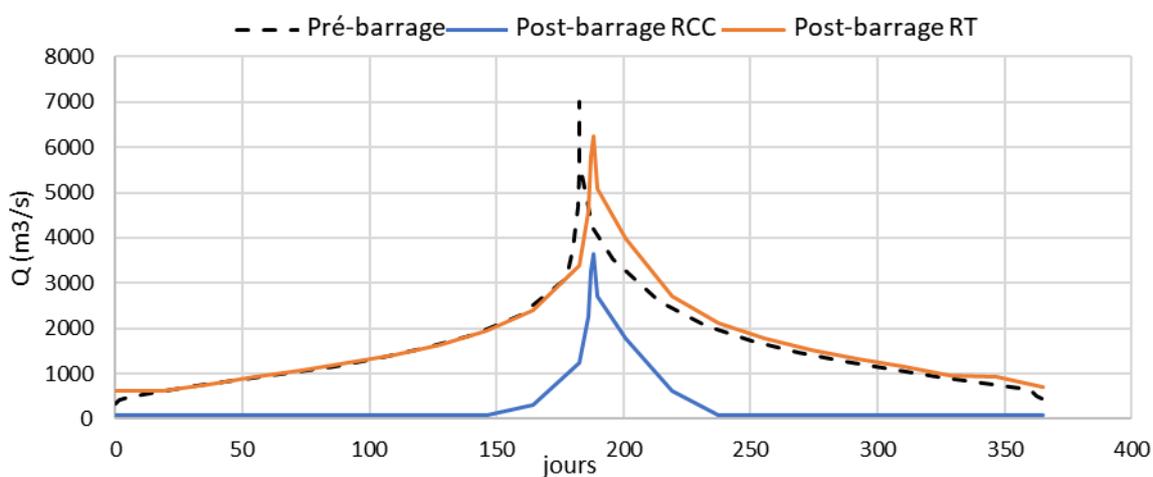


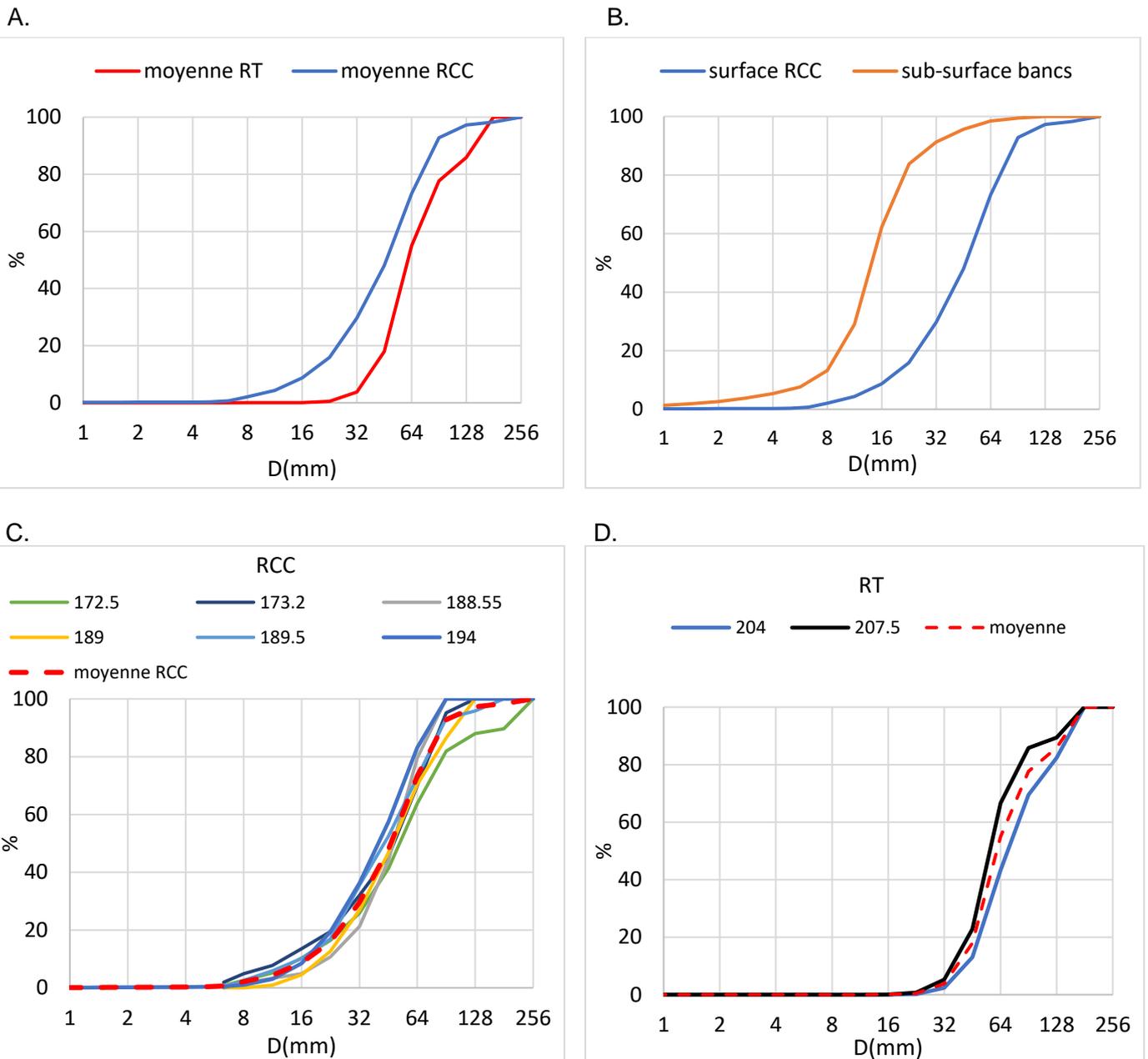
Figure 4 Courbe de durée de débit réorganisée, appelée hydrogramme "post-barrage" pour RCC et RT et courbe de durée de débit réorganisée sans l'impact des barrages, appelée hydrogramme "pré-barrage"

On a utilisé les mêmes coefficients de friction (Strickler) et la même largeur du lit mineur éclairé dans le tronçon DZM que ceux utilisés dans le modèle MAGE. Nous avons émis l'hypothèse que les coefficients de friction n'ont pas changé historiquement, une analyse de sensibilité en OSR5 a montré que des changements mineurs n'affectent pas les résultats.

3.2.2 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, Parrot, 2015). La Figure 3A montre la distribution granulométrique moyenne dans les sous-tronçons RCC et RT du DZM, calculée sur l'ensemble des échantillons collectés. Une distribution plus fine est observée pour le RCC. La Figure 3B 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, 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 (2013b). Les Figure 3C 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. Il n'y avait que 2 échantillons pour le RT puisque ce tronçon ne fait que 12 km de long.



3.2.3 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 5 la largeur est très variable le long du tronçon. Nous avons également utilisé des profils en travers 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 DZM) ont été exportées du modèle Mage.

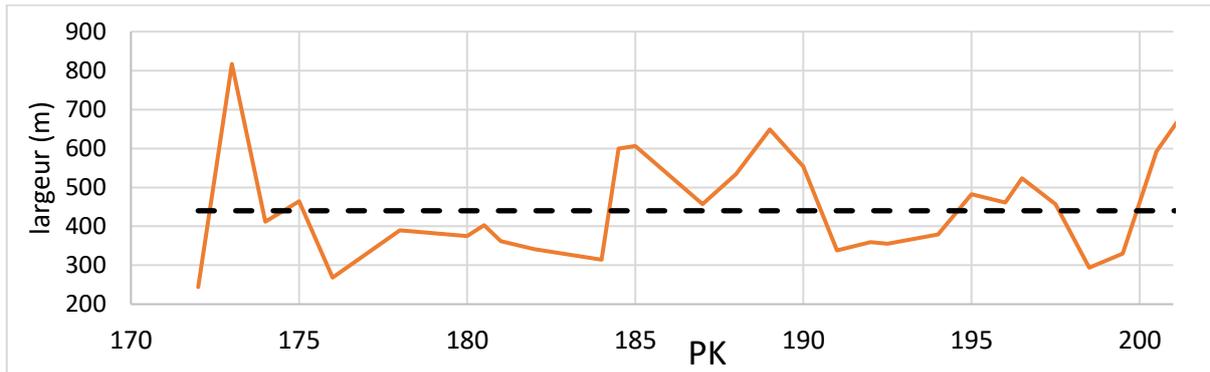


Figure 5 Largeur mesurée avant les endiguements (carte de l'Etat Major) (ligne orange) et moyenne sur l'ensemble du bief (ligne noire intermittente)

4. Résultats : analyse historique

4.1 Période pré-endiguement (chenal d'équilibre)

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 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 6) 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 6 montre que la distribution estimée est proche des échantillons mesurés dans la subsurface des bancs. La DG historique estimée est donc légèrement plus grossière que ce à quoi nous nous attendions si l'on considère notre hypothèse selon laquelle la DG de subsurface des bancs est une approximation raisonnable de la charge historique et le subsurface du chenal. Les résultats montrent que la DG de surface estimée est plus grossière que la DG de subsurface estimée avec un rapport de pavage de 1.8, une valeur indiquant un faible pavage mobile pour les rivières à lit de gravier naturel.

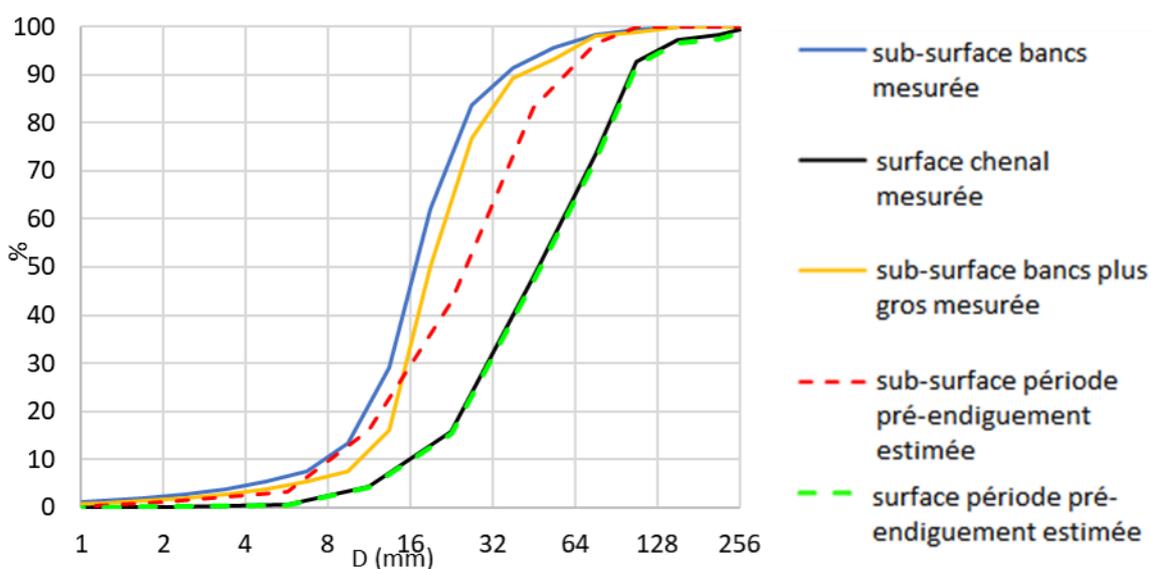


Figure 6 Estimation de la DG de surface et de sub-surface pour le chenal pré-endiguements comparée à la DG de surface mesurée et à la DG de sub-surface des bancs.

Nos estimations historiques du DG ont été mises en œuvre dans le modèle SGR et une simulation a été effectuée jusqu'à l'équilibre (2000 ans) afin de les affiner (Figure 7). La DG de la surface ne montre aucun changement significatif au cours de cette simulation. À la fin du cycle d'équilibre, le taux de pavage reste de 1.8.

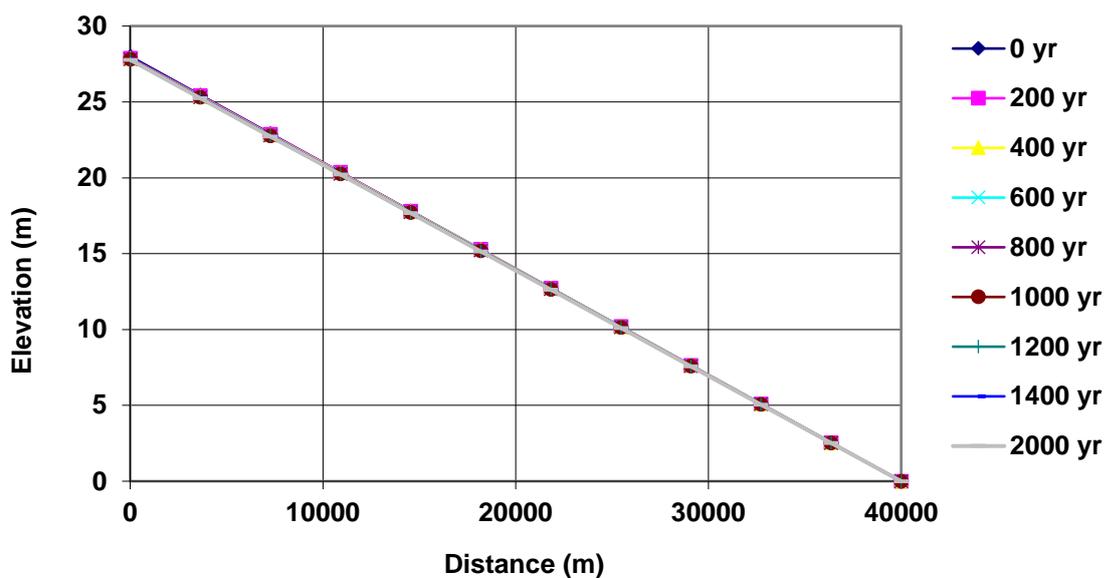


Figure 7 Élévation du lit de la rivière avant endiguements à partir d'une simulation à long terme.

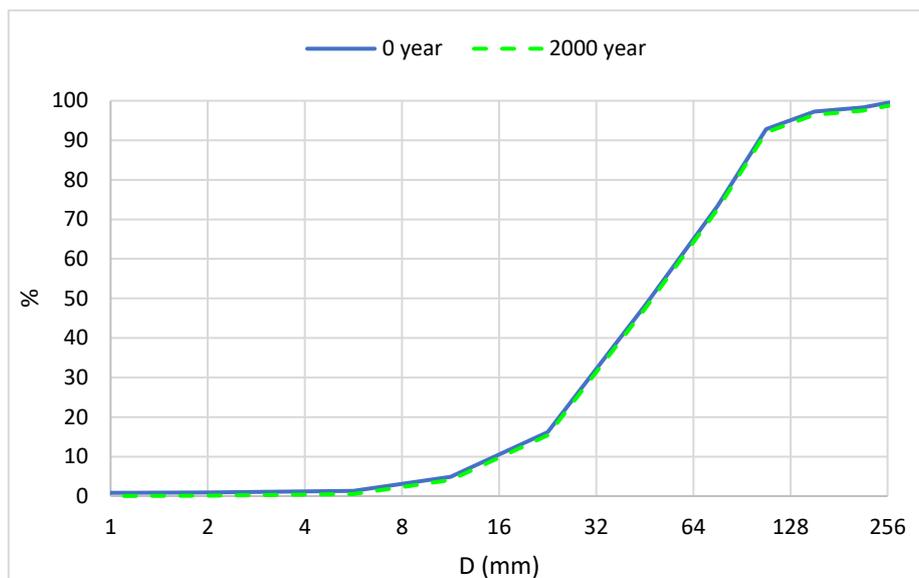


Figure 8 Evolution de DG pré-endiguement à partir d'une simulation à court terme et d'une simulation à long terme

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.

4.2 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 45 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 (440 m par rapport à 270 m ; Tableau 1).

Figure 9 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 1907 et immédiatement avant la construction des barrages (1953 ; Figure 10). Bien que la simulation montre une légère réduction de la pente du lit (en amont) au cours de la période post-endiguement, 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 (PK150) confirment une légère réduction de la pente du lit (Figure 11).

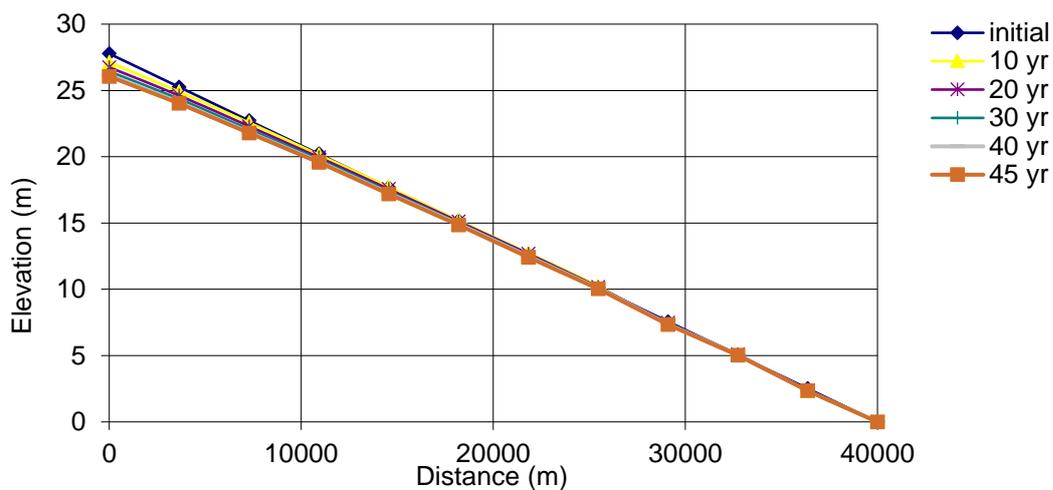


Figure 9 Élévation du lit au cours d'une simulation de la période post-évidement.

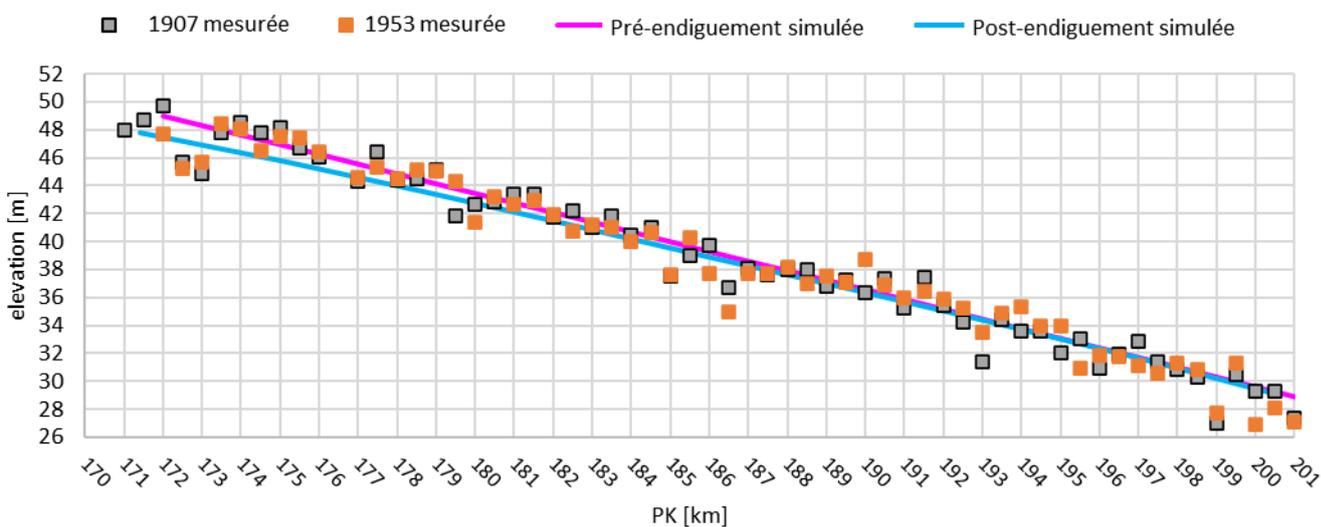


Figure 10 Thalweg mesuré en 1907 (début de la période post-évidement) et 1953 (fin de la période post-évidement) et simulations au début et à la fin de la période post-évidement.

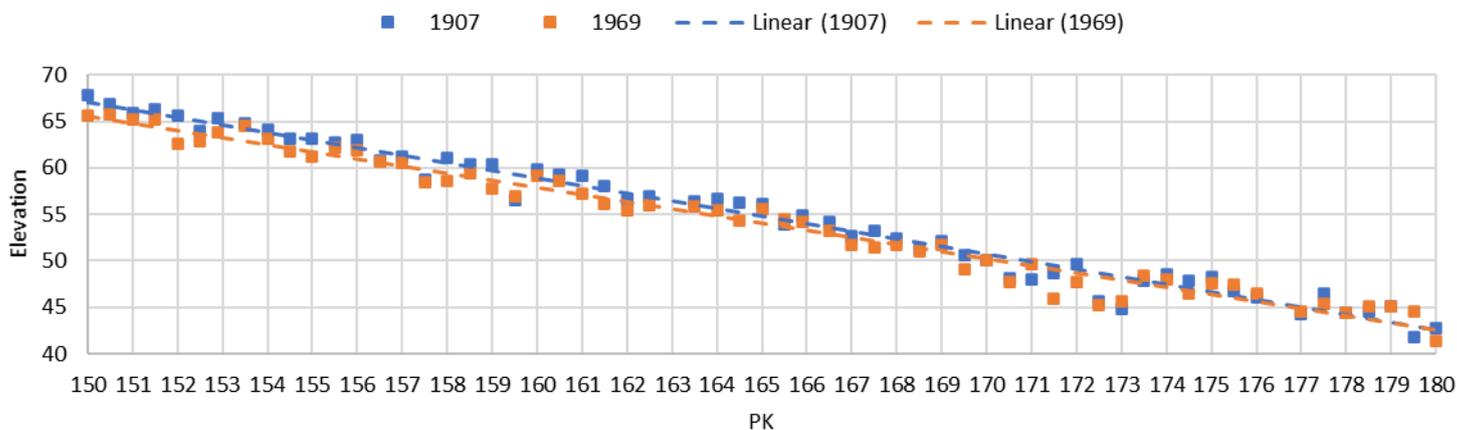


Figure 11 profils mesurés le long d'un tronçon élargi de PK150 à PK180

La distribution de la taille des grains est disponible à chaque nœud du modèle SGR (qui dans notre modèle était tous les 3.6 km). Figure 12A montre la distribution granulométrique de la surface du lit à différents endroits le long du chenal (3.6 km, 18 km et 36.7 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 un peu plus fine au cours de la période post-endiguements. Figure 12B montre cette diminution de DG légèrement plus forte en amont.

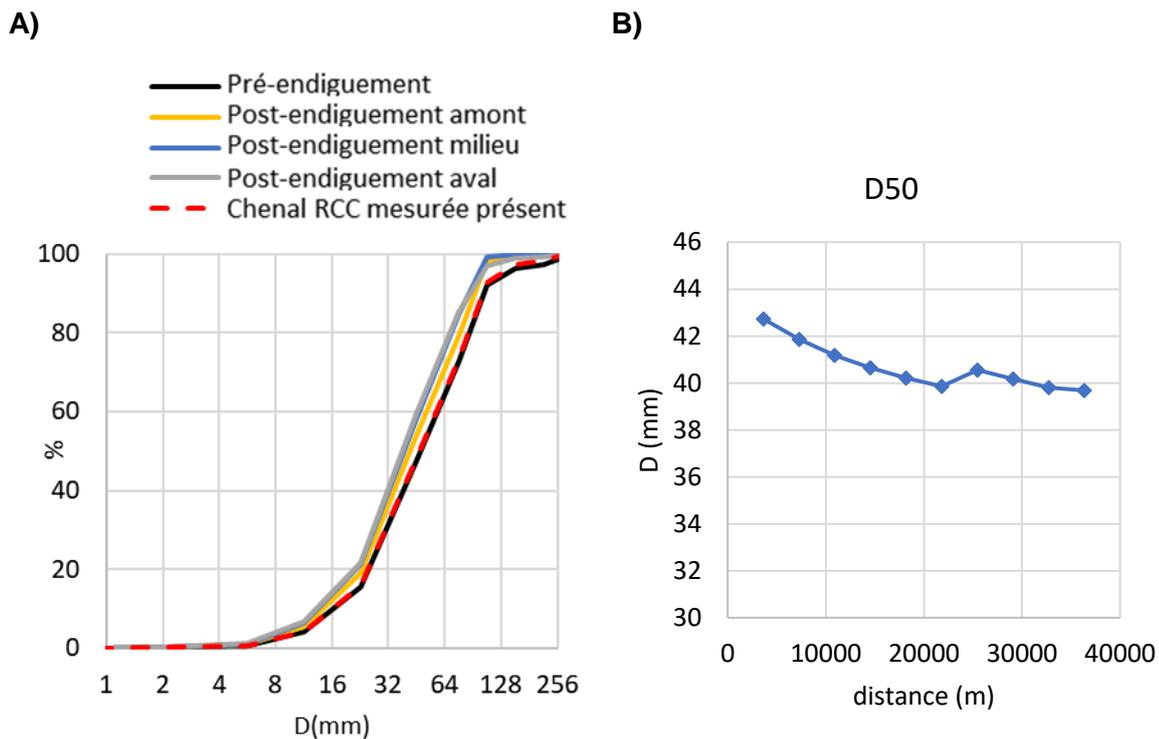


Figure 12 (A) Distributions de la taille des grains de surface le long du chenal à différentes périodes (B) D50 le long du bief à la fin de la période post-endiguement

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 1950). La simulation montre une réduction mineure de la pente du lit et une petite diminution de DG de la surface du lit.

4.3 Période post-barrage – RCC

La période post-barrage correspond à 70 ans entre la construction du barrage et aujourd’hui. 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 5.

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 5.).

Figure 13 montre l'évolution de l'élévation du lit au cours de la simulation de la période post-barrage. Elle montre très peu de changement sur la période de 70 ans. Ce résultat a été validé avec les changements de l'élévation du lit mesurée immédiatement avant la construction des barrages (1953) et récemment (2007) (Figure 14). 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 190 et 200 est le résultat de l'extraction localisée de sédiments. (Parrot, 2015).

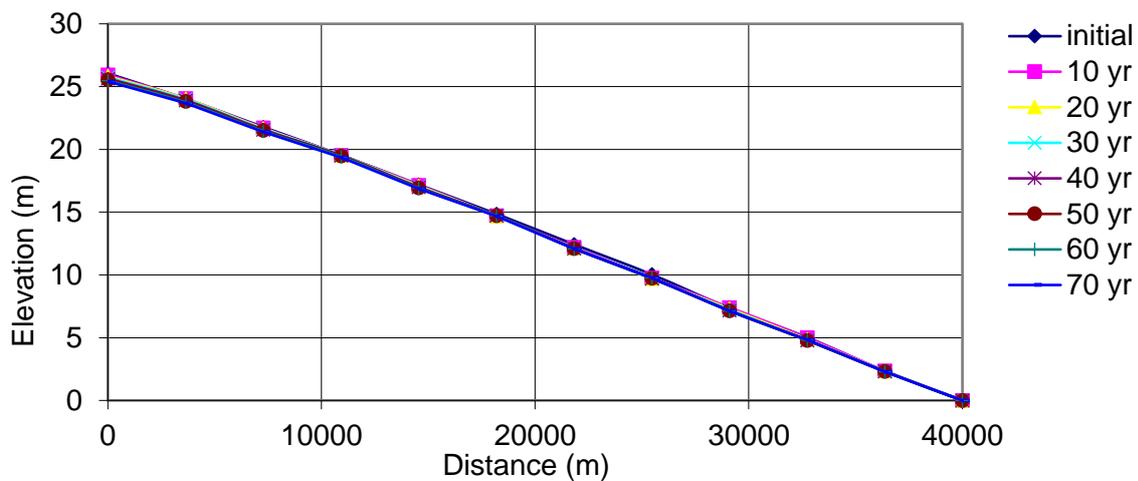


Figure 13 Élévation du lit tout au long de la simulation de la période post-barrage

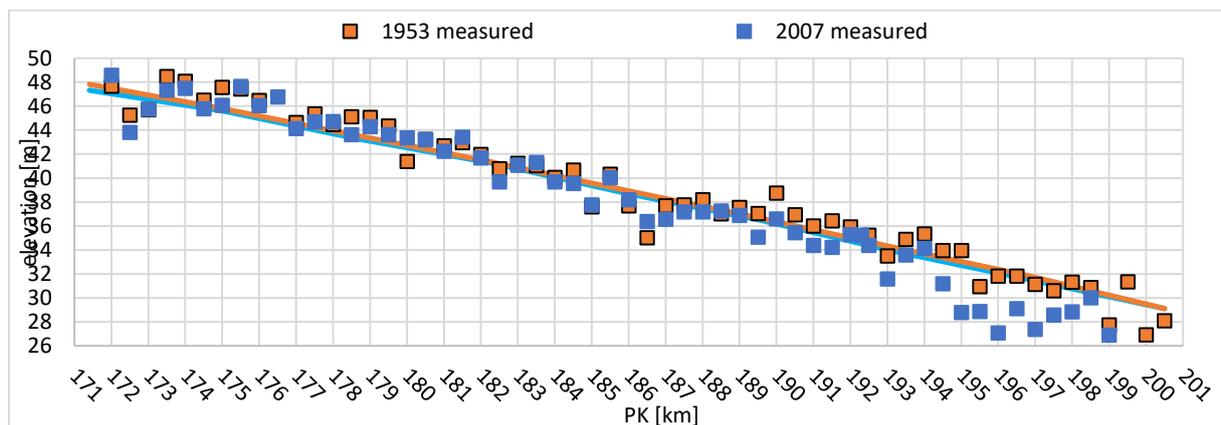


Figure 14 Élévation du lit mesurée et simulations au début et à la fin de la période post-barrage

Figure 15A montre la granulométrie de surface à la fin de la période post-barrage. Une très légère diminution de la taille des sédiments est observée en amont, ou le D50 change de 43 à 40 mm. Le changement montre plutôt une unification de la DG sur l'ensemble du tronçon (Figure 15B).

Dans la Figure 16, 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 simulé se situe du côté le plus fin de la gamme d'échantillons.

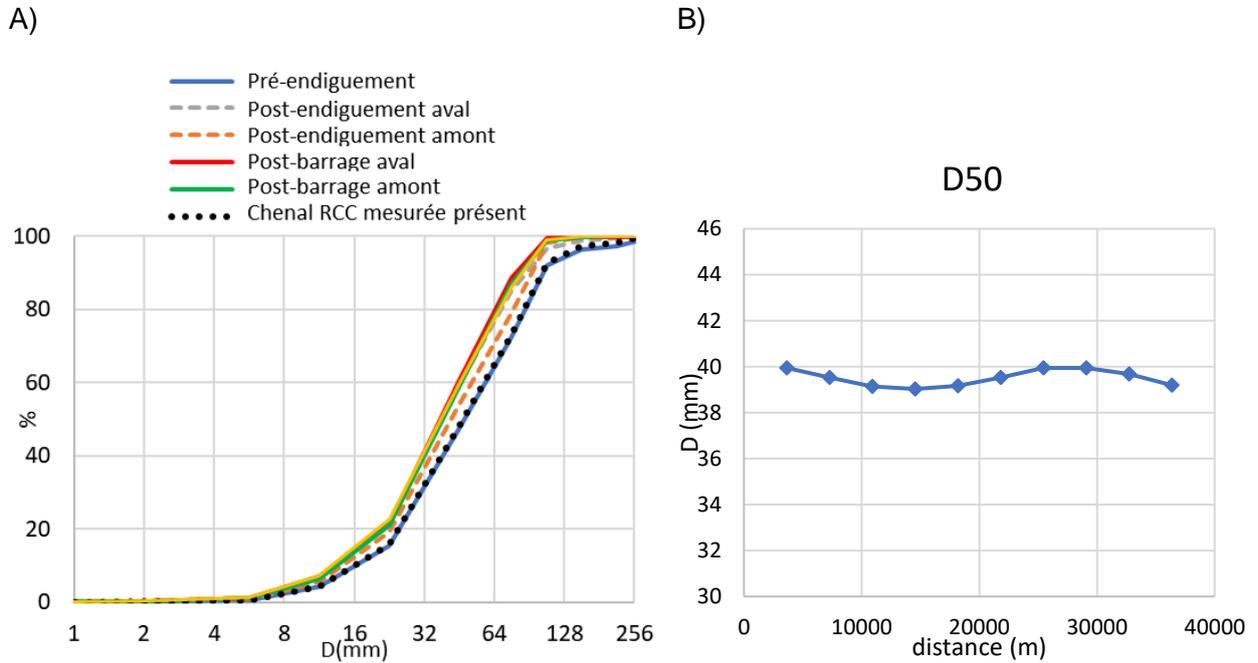


Figure 15 (A) Distributions de la taille des grains de surface à différents moments et endroits le long du chenal. (B) D50 le long de la longueur du bief à la fin de la période post-barrage.

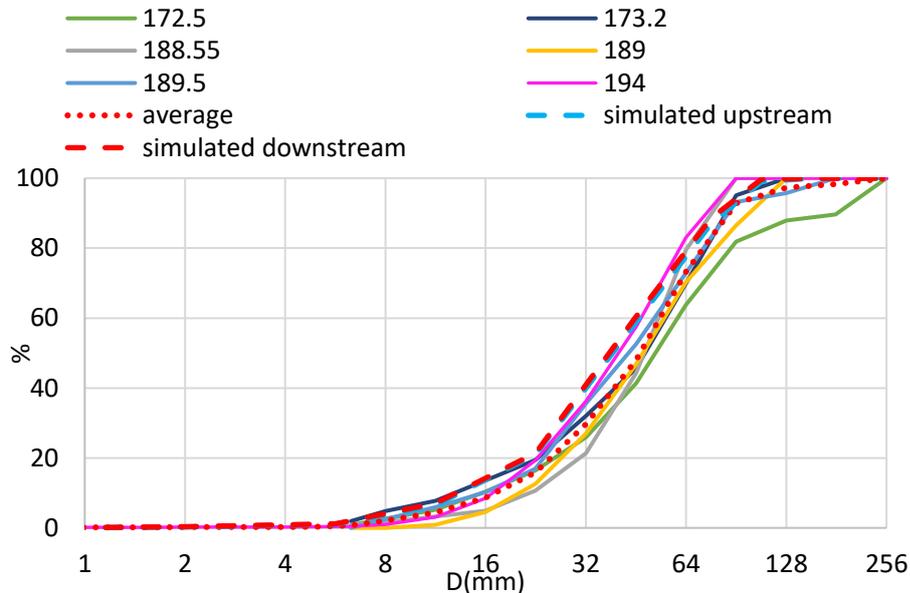


Figure 16 Distribution de la taille des grains de surface mesurée, moyenne et à différents endroits (valeurs PK) et en amont et en aval du bief à la fin de la simulation post-barrage.

Comme les barrages ont eu un impact simultané sur plusieurs variables (hydrologie, largeur, apport de sédiments, section 3.1), 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 Figure 17 et Figure 18.

On constate qu'une réduction du débit seule n'affecte pas la pente du lit, mais entraîne une légère 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 aucun changement de la granulométrie. L'absence d'un changement significatif de la pente lorsque les trois paramètres sont modifiés en même temps (Figure 13) par rapport au changement significatif de la pente en réponse à un changement uniquement de la largeur ou de l'apport de sédiments (Figure 17) suggère que la réduction du débit agit pour atténuer l'impact d'un changement de la largeur ou de l'apport de sédiments.

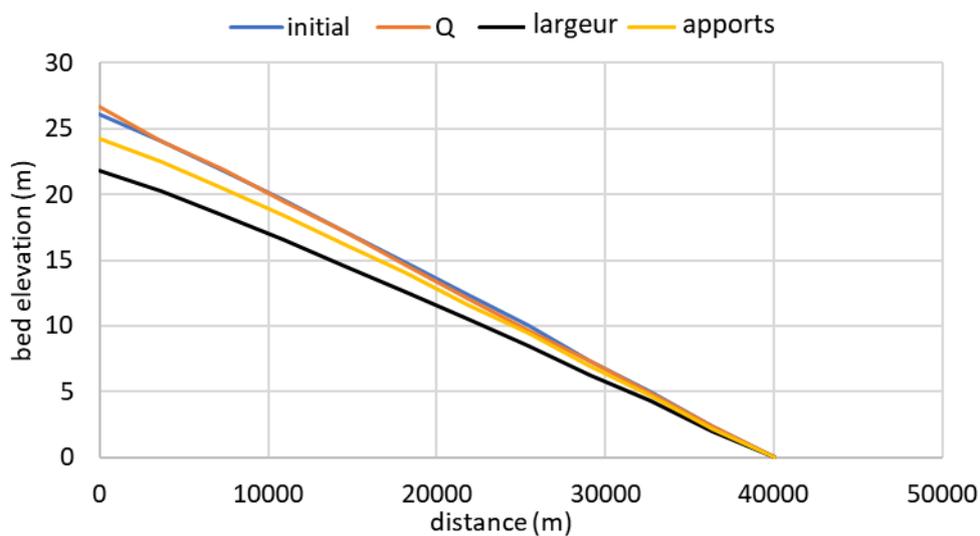


Figure 17 Élévation du lit mesurée à la fin de la période post-barrage pour chaque scénario par paramètre

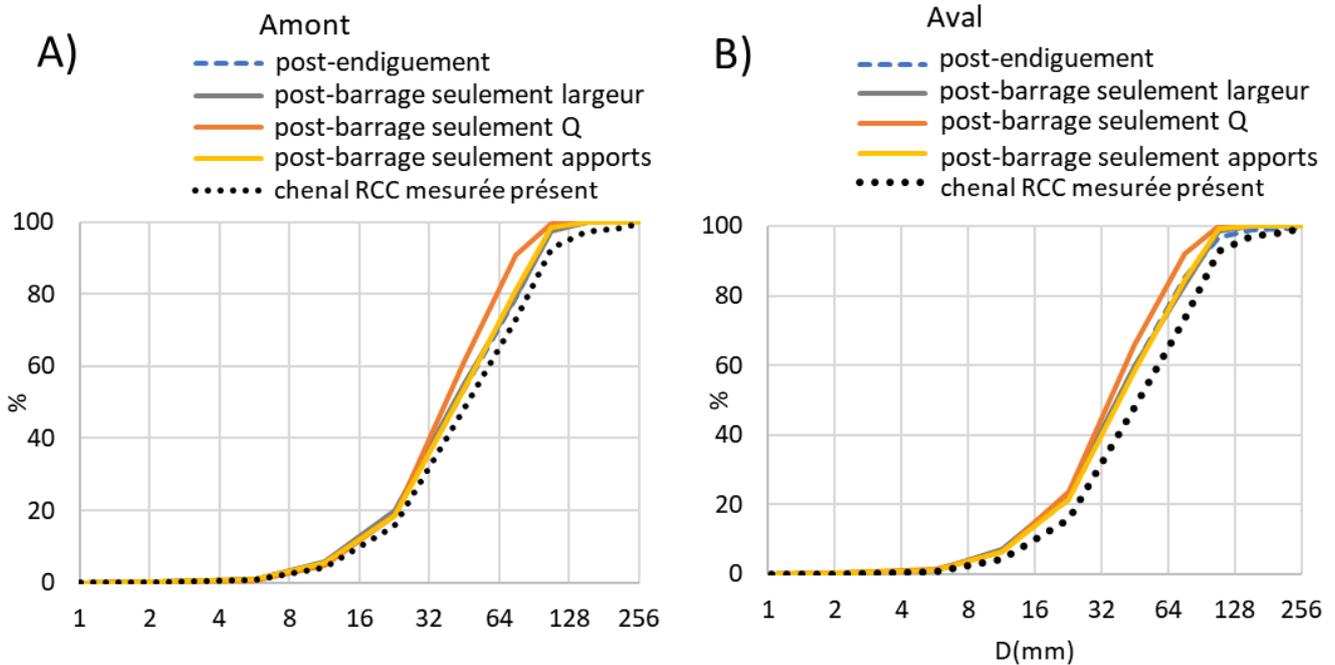


Figure 18 Distribution granulométrique mesurée de la surface à la fin de la période post-barrage pour les simulations dans lesquelles une seule variable a été modifiée à la fois.

Le rapport de pavage pour le lit simulé post-barrage est 1.5. Cette valeur est inférieure aux ratios basés sur des mesures (Parrot, 2015) listés dans le tableau ci-dessous.

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

PK	Armour ratio
172,5	3,9
173,2	4,2
188,6	4,8
189	3,4
189,5	2,7
<i>Moyen</i>	3,8

En résumé, notre simulation de la période post-barrage ne montre pas des changements significatifs dans l'élévation du lit, ce qui est en accord avec les mesures effectuées immédiatement avant la construction du barrage (années 1950) et aujourd'hui (2007). La DG aussi montre une stabilité sur la période post-barrage. Alors que le DG se situe du côté plus fin des données mesurées, le taux de pavage est inférieur à ceux mesurés.

5. Résultats : le présent

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.

5.1 Taux de transport actuels par fraction granulométrique

Nous avons commencé par analyser les volumes annuels de transport par fraction granulométrique sur le tronçon (Figure 19) 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. Les volumes totaux de transport à travers le tronçon prédits par le modèle sont 5415 m³ par an. On constate que la fraction granulométrique de 32-64 mm prédomine dans le RCC (en amont de la confluence) tandis que la fraction granulométrique de 64-90.5 mm est la plus dominante dans le RT (en aval de la confluence). Les taux de transport chutent significativement dans le réservoir du barrage, PK200 jusqu'à la fin du bief.

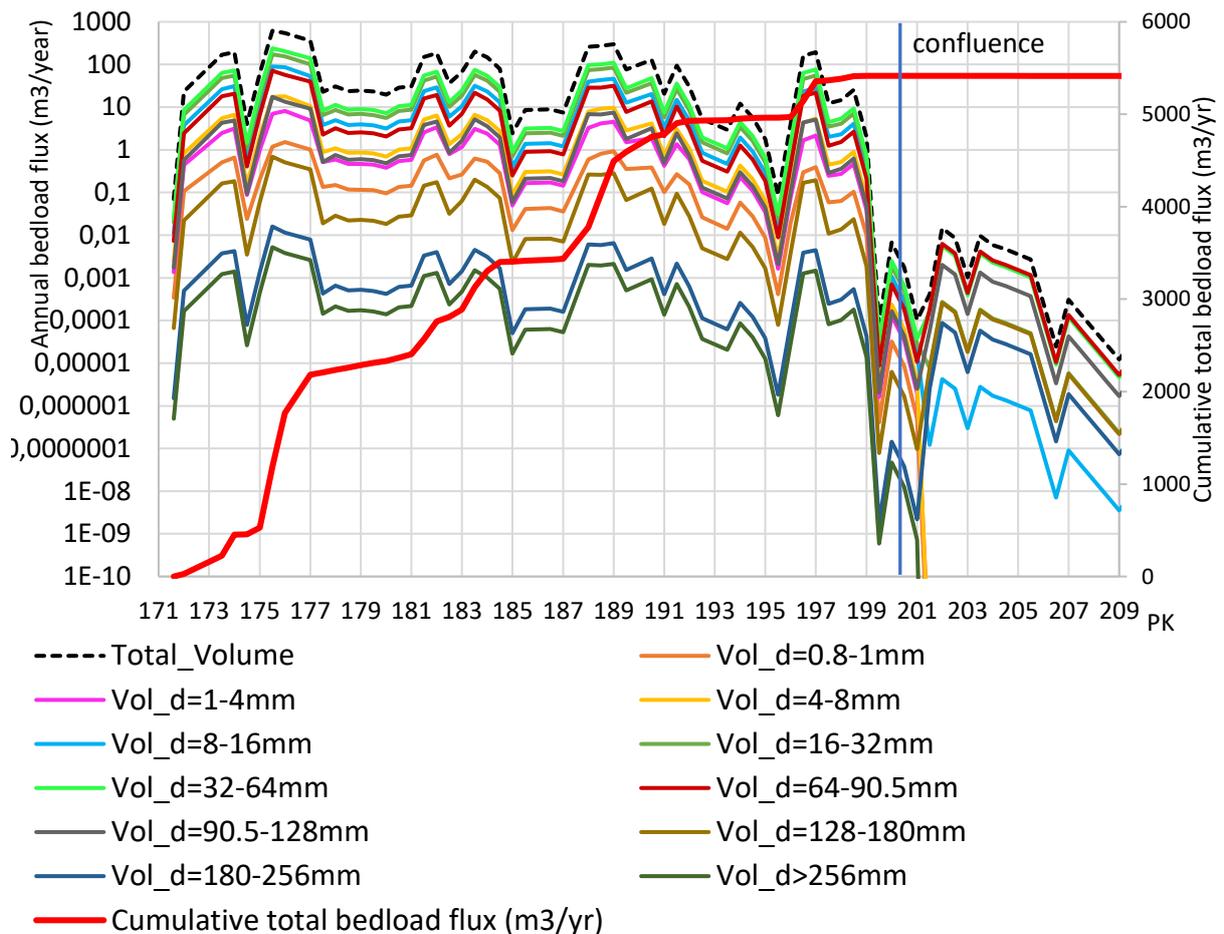


Figure 19 Volumes annuels de transport de charges par classe de grains et cumulés sur le lit actuel

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 20). 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 (Tableau 1; 11093 m³/an). Nous voyons que ces sédiments ne sont pas transportés à travers le bief. 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 4). Figure 21 montre le changement de l'élévation du lit après 50 ans sans apport de sédiments et indique de très petits changements.

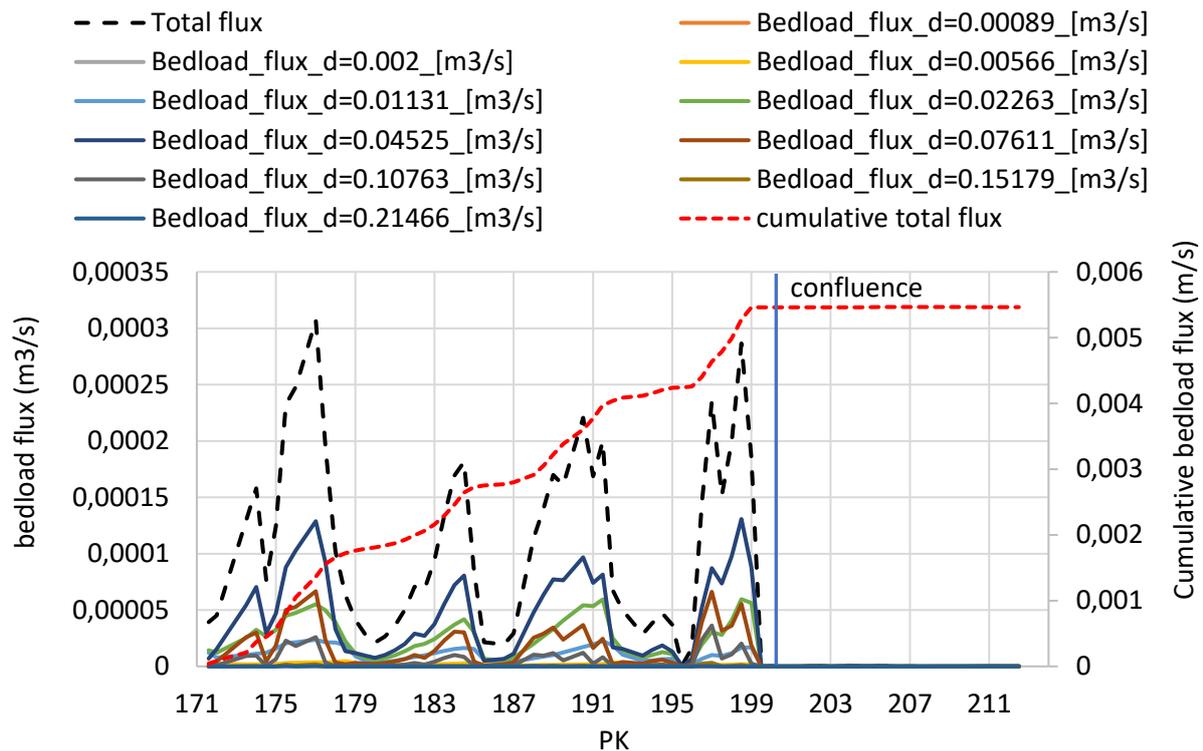


Figure 20 Transport fractionné pour Q10 pour le lit actuel

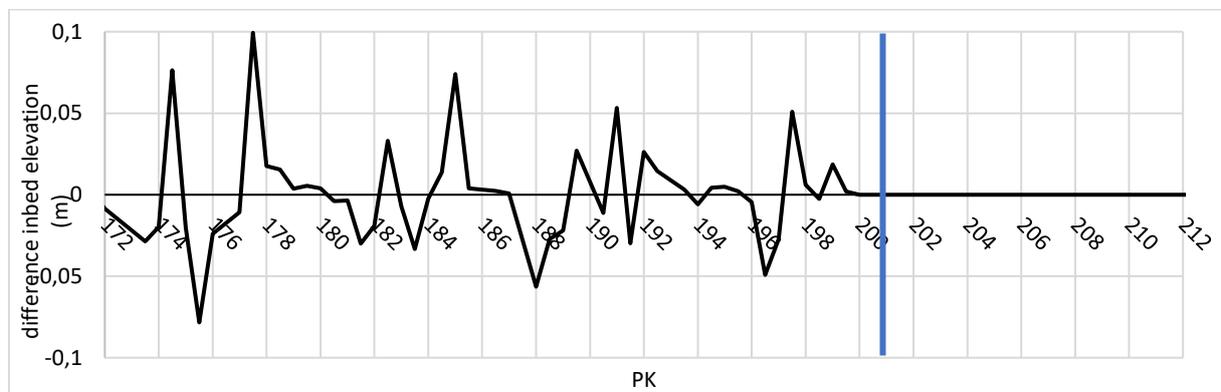


Figure 21 Élévation du lit après 50 ans de simulation

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 (5415 m³ /an). Les fractions granulométriques dominantes transportées dans le RCC et le RT sont respectivement de 32-64 mm et 64-90.5 mm. Notre simulation montre que les effets de ‘backwater’ du barrage aval a 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 presque stable. Pour l'instant, aucune donnée n'est disponible pour valider ces résultats.

5.2 Réinjection de sédiments

5.2.1 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 à PK173.5. Ces simulations sont basées sur le volume et la distribution granulométrique de la réinjection réalisée dans PDR (rapport OSR5). Cela est pour deux raisons – premièrement est le manque des données sur la réinjection dans DZM, deuxièmement c'est que cela permet de comparer l'évolution des deux réinjections. Sur la base d'une porosité estimée à 25% (typique des rivières à lit de gravier, par exemple Bui et al. (2019); Frings et al.(2008)), nous avons introduit un volume de 6500 m³ de sédiments sans porosité dans le modèle. Nous avons également simulé un volume de réinjection beaucoup plus important de 50000 m³ afin d'étudier ses impacts. Les réinjections simulées ont été implémentées immédiatement en aval du barrage. Étant donné que notre modèle est unidimensionnel, la réinjection a été répartie uniformément sur le profil en travers dans le lit mineur (Figure 22). 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).

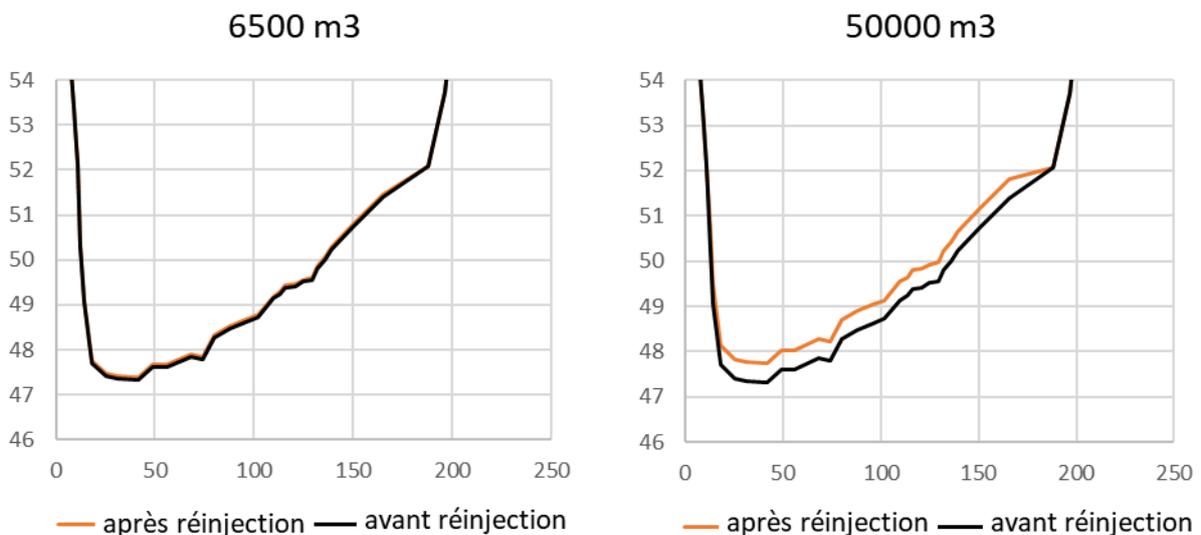


Figure 22 Profil en travers au niveau de PK173.5 avant et après que les volumes de réinjection simulés aient été uniformément distribués dans le profil

5.2.2 Résultats et discussion

Figure 23 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). Les sédiments se propagent en aval, et dans le cas de la réinjection de 6500m³, ils sont complètement enlevés, tandis que pour les 50000 m³, tous les sédiments n'ont pas bougé même après 50 ans. La Figure 24 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.

En comparaison avec l'élévation du lit après 50 ans sans réinjection (Figure 23), la réinjection de 6500 m³ montre un dépôt légèrement plus élevé dans les zones de dépôt en aval du point de réinjection (environ 2,5 cm au PK 174,5, 1 km en aval du point de réinjection). La même chose est visible avec la réinjection de 50 000 m³, qui présente une couche plus épaisse de dépôts supplémentaires (7 cm par exemple au PK 174,5, 1 km en aval du point de réinjection, 1,8 cm au PK 177,5, 4 km en aval du point de réinjection).

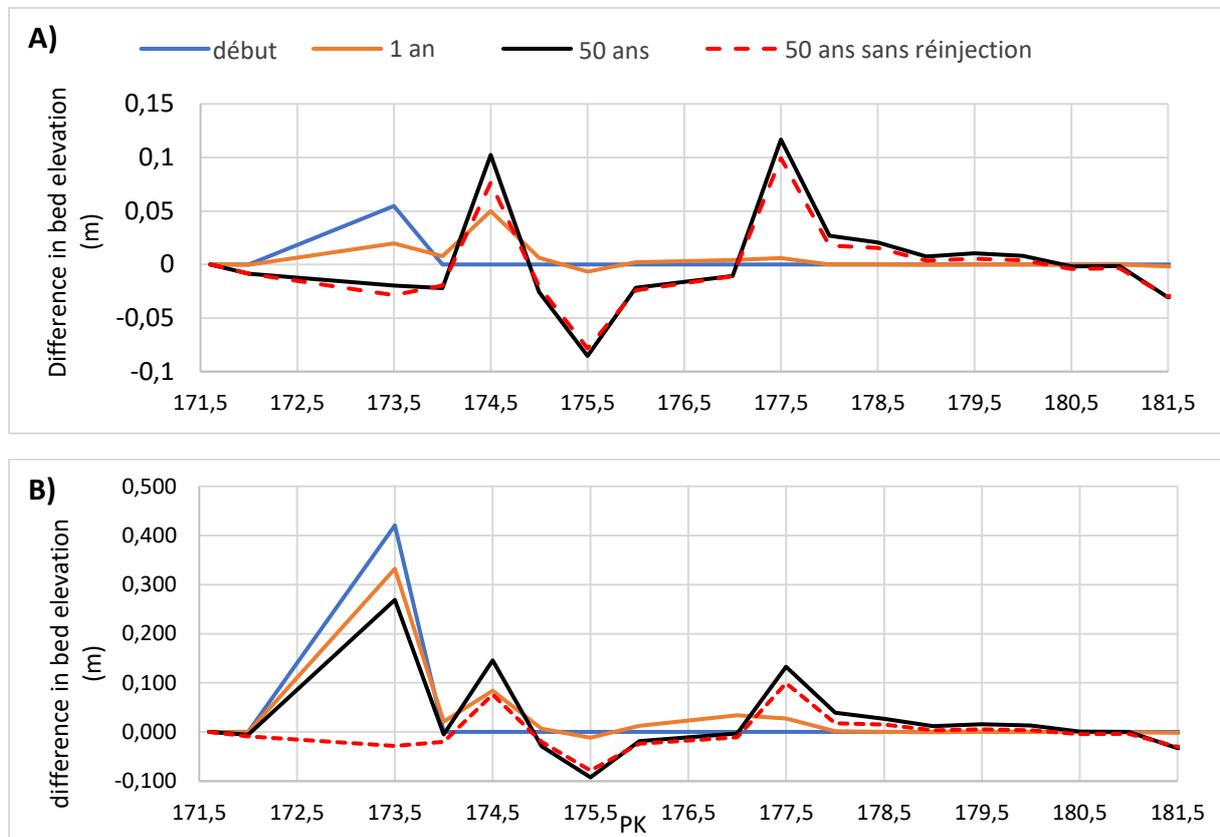


Figure 23 Différence d'élévation du lit après 50 ans pour A) 6500 m³ et B) 50000m³

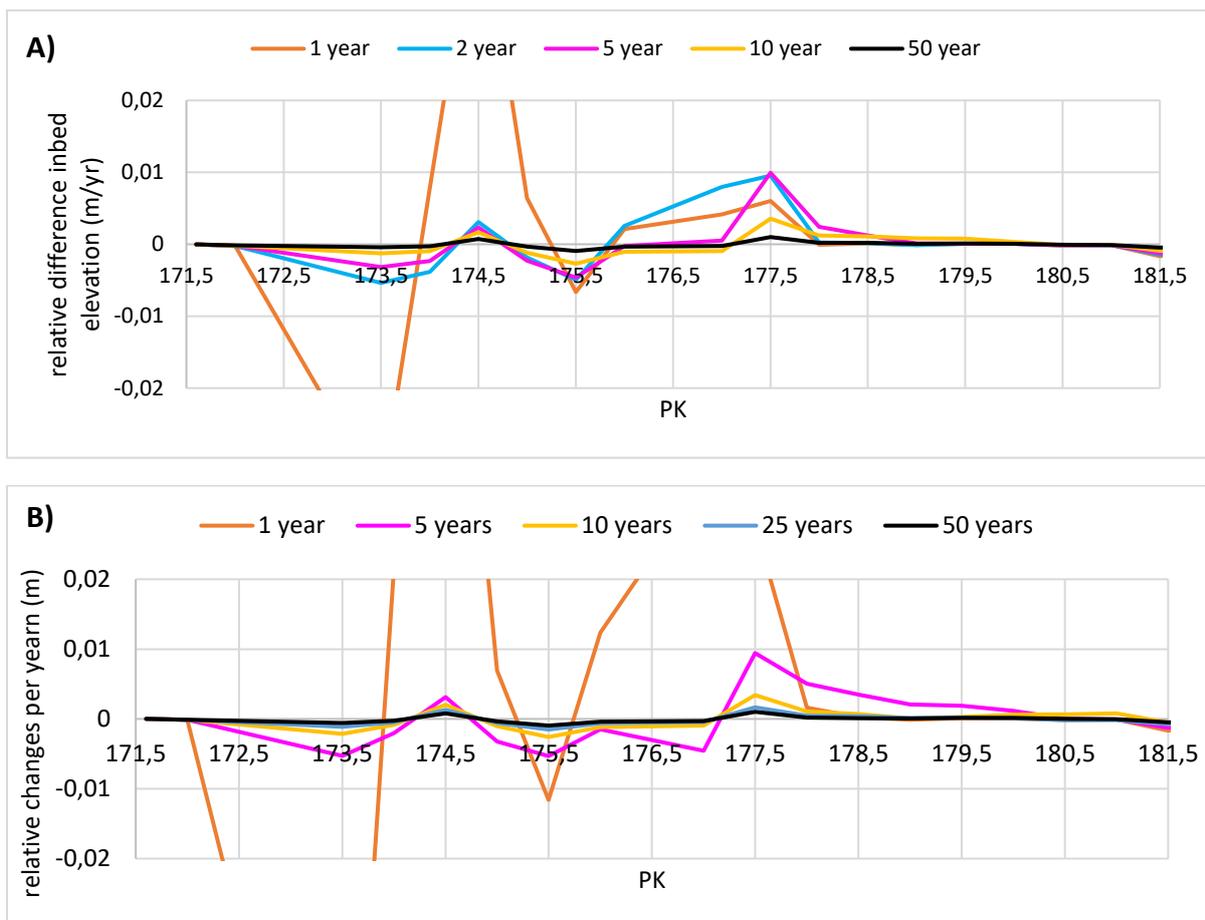


Figure 24 Différence relative de l'élévation du lit après 50 ans pour A) 6500 m3 et B) 50000m3

Figure 25 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 23 et 24), à différents moments après la réinjection par rapport à l'état initial du lit. Pour la réinjection de 6500 m3 (Figure 25A), on constate que la diminution de la DG se produit au cours de la première année. Après, une légère augmentation de la DG par rapport à l'année 1 est observé. Une tendance similaire est observée pour le volume de réinjection de 50 000 m3 (Figure 25B). 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 26).

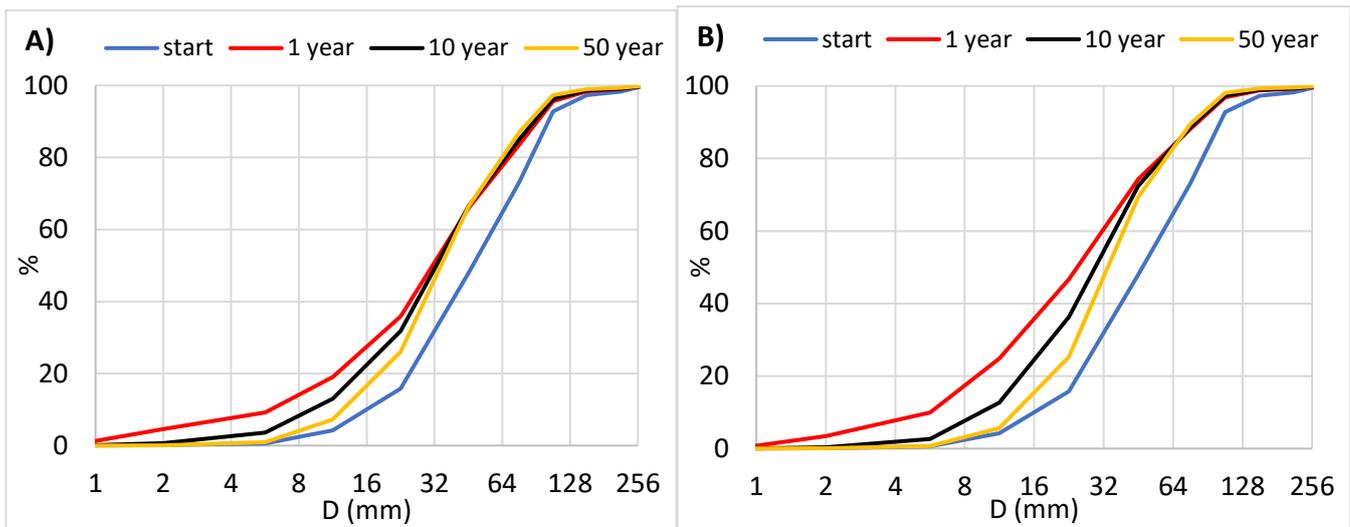


Figure 25 Changement dans la distribution granulométrique pour A) 6500 m³ et B) 50000m³

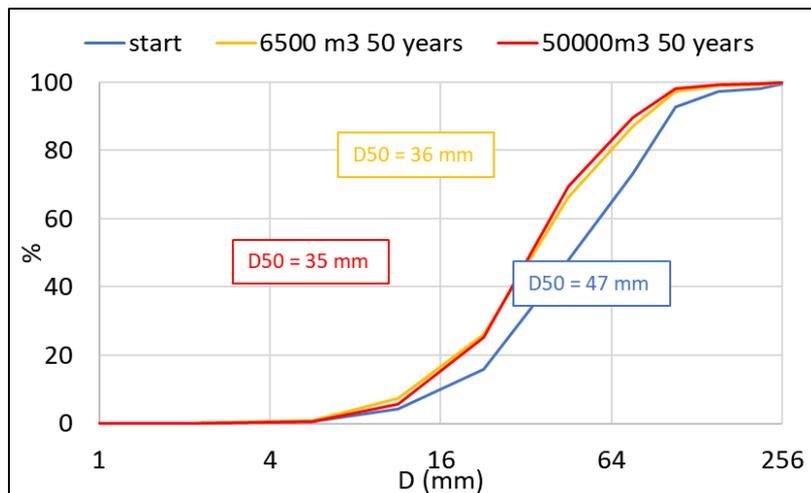
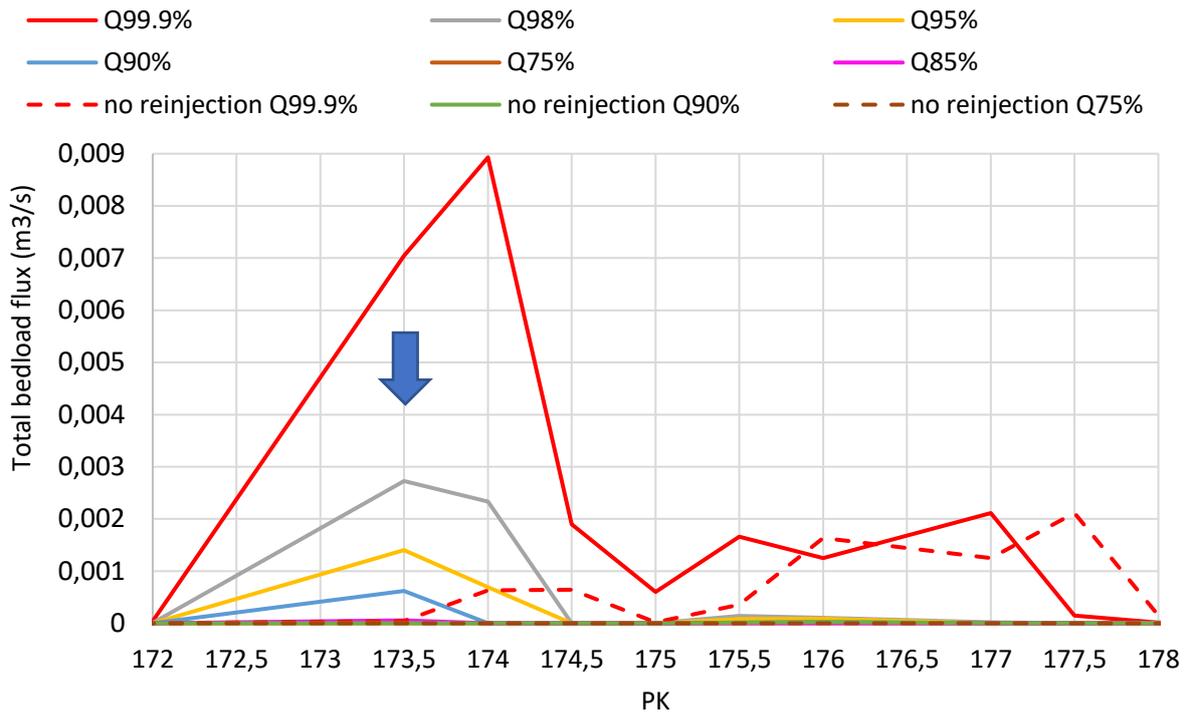


Figure 26 Évolution de la D50 après 50 ans post-réinjection.

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 Q99.9% (c'est-à-dire 99.9% du temps où le débit est inférieur à cette valeur) et Q75% sans réinjection est inclus pour comparaison. Nous observons une réduction rapide des taux de transport pour les débits inférieurs à Q99.9% (3650 m³ /s dans le RCC). En dessous de Q90% (618 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 et les taux de transport des sédiments réinjectés chutent très rapidement à des débits plus faibles.



En résumé, les simulations des réinjections de sédiments comme définis dans OSR5 montrent un certain déplacement vers l'aval qui se produit principalement dans les premières années suivant la réinjection. En aval de la réinjection, la surface du lit diminue la DG dans la première année, puis s'augmente. Seuls des débits très élevés, supérieurs à Q90%, sont capables de remobiliser les sédiments réinjectés. 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.

6. Discussion

Dans cette section, nous résumons et comparons les tendances générales observées pour le Péage de Roussillon (OSR 5) et Donzère-Mondragon (OSR 6) sur la base des résultats de la modélisation morphodynamique 1D.

6.1 Evolution historique

Dans les deux tronçons, nos estimations de la distribution granulométrique de la subsurface du lit avant la gestion (c'est-à-dire avant les endiguements) étaient plus fines que notre estimation de la granulométrie de surface. De plus, les DG des subsurfaces étaient similaires ou légèrement plus grossières que les DG mesurées dans la subsurface des barres actuelles (Parrot, 2015), en accord avec notre hypothèse selon laquelle la DG de subsurface des barres est un proxy raisonnable pour la charge historique et la subsurface du chenal. Les volumes de transport historiques estimés (basé sur le lit actuel sous un régime hydrologique non-perturbé) pour les deux tronçons étaient de 2585 m³/an et 11093 m³/an pour le PDR et le

DZM respectivement. Les taux de transport plus élevés pour DZM sont cohérents avec un lit moins pavé.

En réponse au rétrécissement du chenal dû aux endiguements (Casiers Girardon) construits à la fin du 19^e siècle (76% et 61% pour le PDR et le DZM respectivement), les simulations numériques ont montré une très légère diminution de la pente due à l'incision en amont. Alors que l'incision post-endiguement n'est pas observée dans les élévations du lit mesurées à l'échelle du bief pour ces tronçons, elle peut être vue lorsqu'elle est mesurée à plus grande échelle, ce qui est cohérent avec l'incision globale observée le long du Rhône dans la période post-endiguement (Parrot, 2015). Les simulations montrent également une très légère diminution de la DG de la surface du lit, plus distinct en PDR, et plus prononcé en aval.

Après la construction des barrages, les simulations de la période post-barrage indiquent une pente du lit très stable dans les deux tronçons. Une légère diminution de la DG de la surface est observée, bien que très faible dans le DZM. Le rapport de pavage pour le lit simulé post-barrage est de 1.6 en moyen pour PDR et 1.5 pour DZM. Nous proposons deux hypothèses pour expliquer pourquoi une certaine diminution de la DG a pu se produire après le barrage (notamment dans le PDR) 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, 2013a).

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).

En résumé, les simulations de PDR et de DZM montrent une tendance similaire : aucun changement majeur dans l'élévation du lit ou la DG de surface en réponse aux endiguements ou aux barrages. Compte tenu de l'absence de données historiques et de la simplification faite dans le modèle 1D, les résultats des simulations sont cohérents avec les mesures disponibles et suggèrent que le modèle fonctionne correctement.

6.2 Dynamique actuelle

Les taux estimés de transport des charges de fond à partir de simulations basées sur les conditions actuelles de l'hydraulique et du lit et utilisant l'équation Wilcock & Crowe (Wilcock & Crowe, 2003) étaient de 42 m³/an et 5415 m³/an pour le PDR et le DZM respectivement (naturellement plus faibles que les valeurs sous un régime hydrologique non-perturbé). Ces valeurs sont inférieures à celles estimées dans l'OSR 4 à partir du formule de transport de charriage de Recking (7780 m³/an et 24966 m³/an pour le PDR et le DZM respectivement). Ces différences soulignent la nécessité d'effectuer des mesures afin de valider les estimations et d'affiner les méthodes utilisées pour les obtenir.

En PDR la fraction granulométrique de 16-32 mm prédomine dans le RCC tandis que la fraction granulométrique de 32-64 mm est la plus dominante dans le RT. En DZM, la fraction 32-64 mm prédomine dans le RCC et 64-90.5 mm dans le RT. Une valeur plus grossière dans le RT correspond aux mesures. De plus, les taux de transport dans les réservoirs des barrages en

aval des deux tronçons étaient insignifiants, ce qui suggère qu'aucune charge de fond n'est transportée à travers les barrages (c.-à-d. que l'apport de sédiments grossiers est nul). Une simulation sur 50 ans basée sur l'apport actuel de lit montre des changements de l'élévation du lit $<0,01$ m pour le PDR et $<0,1$ m pour le DZM, suggérant un lit très stable dans les deux tronçons (en accord avec les résultats des simulations historiques).

Les deux tronçons n'ont montré qu'une capacité très limitée à transporter les sédiments réinjectés vers l'aval dans le cadre de l'hydrologie annuelle moyenne actuelle et les simulations ont confirmé que seuls des débits très importants sont capables de mobiliser les sédiments réinjectés (supérieurs à Q98% dans le PDR et supérieurs à Q90% dans le DZM). Ces résultats sont cohérents avec la surveillance RFID dans le tronçon PDR. Le mouvement des sédiments a été le plus important au cours de la première année et a progressivement diminué au fil du temps. Les taux de transport du lit plus élevés dans le tronçon DZM ont entraîné un taux de propagation plus rapide des sédiments de réinjection. La surface du lit est devenue plus fine au cours des premières années qui ont suivi la réinjection, puis a commencé à se grossir. Néanmoins, le lit était encore plus fin 50 ans après la réinjection par rapport au lit avant la réinjection (D50 réduit de 42 à 33-38 mm dans le PDR et de 47 à 35-36 mm dans le DZM).

7. Perspectives

Les résultats de ce travail doivent être validés avec des mesures quand davantage de données seront disponibles (RFID, bathymétrie, mesures de flux...). Les résultats de la modélisation morphodynamique 1D des réinjections peuvent être implémentés dans des modèles statistiques d'habitat pour déterminer leurs impacts (voir Tal et al., 2021). Un modèle 2D est nécessaire afin d'étudier les changements locaux en réponse aux réinjections.

8. Bibliographie

- Bankert, A. R., & Nelson, P. A. (2018). Alternate bar dynamics in response to increases and decreases of sediment supply. *Sedimentology*, 65(3), 702–720. <https://doi.org/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(10), 1924–1948. <https://doi.org/10.1002/2017JF004213>
- Bui, V. H., Bui, M. D., & Rutschmann, P. (2019). Advanced numerical modeling of sediment transport in gravel-bed rivers. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030550>

- Frings, R. M., Kleinhans, M. G., & Vollmer, S. (2008). Discriminating between pore-filling load and bed-structure load: A new porosity-based method, exemplified for the river Rhine. *Sedimentology*, 55(6), 1571–1593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00958.x>
- Laval, F., Fantino, G., Strosser, P., Mallet, J.-P., E., B., Cumin, T., Gilles, G., Catalon, E., & Mosselman, E. (2021). *Etude préalable qu schéma directeur de gestion sédimentaire du fleuve Rhône du lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée. Fiches de synthèse par unité hydrographique cohérente (UHC). Fiche UHC#13-PDR.*
- OSR4 report I.4. (2017). *Evolutions morphodynamiques du chenal sur le long-terme.* <http://www.graie.org/>
- Parker, G., & Sutherland, A. J. (1990). Fluvial armor. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5), 529–544. <https://doi.org/10.1080/00221689009499044>
- Parrot, E. (2015). *Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée. (PhD dissertation).* Lyon 3 University.
- Recking, A. (2013a). An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1264–1281. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20090>
- Recking, A. (2013b). Simple Method for Calculating Reach-Averaged Bed-Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(1), 70–75. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000653](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000653)
- Serlet, A., & Tal, M. (2021). *Modélisation morphodynamique 1D du secteur Péage de Roussillon. Version B. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5ème Programme d'Actions.* <https://doi.org/10.32933/550>
- Tal, M., Lamouroux, N., Liebault, F., Jafarinik, S., Coutaz, J., & Brousse, G. (2021). *Évaluation des effets d'aménagement et de restauration sur la dynamique hydro-sédimentaire et l'habitat du Buëch en aval du barrage de Saint-Sauveur à partir du suivi morpho-sédimentaire, de la modélisation morphodynamique 1D, et des modèles statistiques.*
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.109>
- 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(2), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2010WR009164>
- Wilcock, P. R., & Crowe, J. C. (2003). Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 120–128.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

