



HAL
open science

**Mesures et modélisations du fonctionnement
hydrosédimentaire du secteur de Bourg-lès-Valence.
OSR4 | Action I.3**

Thomas Depret, Hervé Piégay, Lise Vaudor, Mathieu Cassel, Brice Noirot,
Ludovic Bultingaire, Saleh Yousefi, Kristell Michel, Violaine Dugué,
Jean-Baptiste Faure, et al.

► **To cite this version:**

Thomas Depret, Hervé Piégay, Lise Vaudor, Mathieu Cassel, Brice Noirot, et al.. Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Bourg-lès-Valence. OSR4 | Action I.3. [Rapport de recherche] CNRS; ENS de Lyon; INRAE. 2018. hal-03748503

HAL Id: hal-03748503

<https://hal.science/hal-03748503>

Submitted on 9 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.

OSR4 2015-2017

Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Bourg-lès-Valence – Rapport de synthèse final



Observatoire
Sédiments
du Rhône

Action I.3

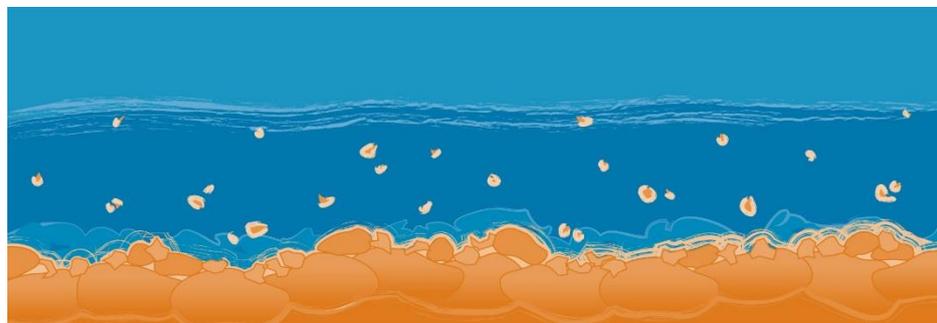
Version du 18 janvier 2018



2015 - 2020



Donnons un avenir à notre fleuve



Personnes impliquées	Equipe de recherche
Dépret T., Piégay H., Vaudor L., Cassel M., Noirot B., Bultingaire L., Yousefi S., Michel K.	ENS CNRS UMR5600
Dugué V., Faure JB., Le Coz J., Camenen B.	Irstea

Pour cette action, l'équipe OSR a bénéficié d'une collaboration étroite avec les équipes techniques de la CNR (en particulier Christophe Mora et Lionel Méric) pour réaliser les acquisitions granulométriques dans le chenal.

Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Bourg-lès-Valence

Rapport de synthèse final

Résumé

Les travaux conduits sur ce tronçon ont porté sur l'évaluation de la transparence du barrage de la Roche-de-Glun à la charge de fond et la détermination du fonctionnement morfo-sédimentaire de la retenue associée de Bourg-lès-Valence. Celle-ci est sujette depuis quelques années à des opérations de réinjections de sédiments grossiers. La méthodologie retenue associe modélisation hydraulique 1D (MAGE), bilans sédimentaires et caractérisation granulométrique de surface et de subsurface par photographies et volumétrie. Les investigations réalisées ont permis de mettre en évidence la faible capacité d'ajustement morphologique du secteur. L'exportation à l'aval de la retenue de la totalité du stock sédimentaire réinjecté semble peu probable. Des simulations de chasse indiquent qu'au moins 20 % de ce stock resterait piégé dans le réservoir pour une crue cinquantennale. Pour un mode de fonctionnement classique, la taille maximale des particules exportables à l'aval du barrage est inférieure à 20 mm. Les réinjections de matériel grossier (> sable) dans la retenue à des fins de recharge sédimentaire sont ainsi difficile à justifier.

De façon plus générale, et dans la mesure où les conditions de transport sur ce secteur sont probablement similaires à celles rencontrées sur la plupart des autres retenues du Rhône, espérer un rétablissement de la continuité sédimentaire pour l'intégralité du spectre granulométrique caractérisant le fond du lit du Rhône apparaît peu réaliste. Il convient encore d'affiner les évaluations du transport solide résultant du modèle hydraulique 1D en caractérisant mieux la granulométrie du lit (méthodes d'acquisition, procédures de traitement, fiabilité des résultats, emprises spatiales caractérisées). Dans ce cadre, les suivis bathymétriques constituent une source essentielle de données pour valider les simulations et améliorer ainsi les modèles utilisés pour tester des scénarios de gestion.

Mots-clés

Charge de fond ; Continuité sédimentaire ; Compétence ; Granulométrie ; Bilan sédimentaire ; Modélisation hydraulique

Table des matières

1. Introduction	4
2. Présentation du secteur d'étude	4
2.1 Caractéristiques hydrologiques et géométriques	4
2.2 Chenalisation du lit et création de la retenue.....	5
2.3 Volumes réinjectés et chronologie des campagnes de réinjection.....	5
3. Matériel and Méthodes	6
3.1 Ajustement vertical du lit suite à la mise en place des aménagements Girardon (2 nd moitié XIXe) et de l'aménagement hydro-électrique de Bourg-lès-Valence (1968).....	7
3.2 Bilans sédimentaires.....	7
3.2.1 Données	7
3.2.2 Méthode.....	8
3.3 Détermination de la granulométrie du lit : photographies et échantillonnages volumétriques	9
3.3.1 Réservoir de Bourg-lès-Valence.....	9
3.3.2 Secteur de curage du Doux	10
3.3.3 Analyse comparative	11
3.4 Modélisation hydraulique 1D	11
3.4.1 Paramètres du modèle et débits simulés	11
3.4.2 Mobilité de la charge de fond.....	12
4. Résultats	14
4.1 Réajustement vertical du lit consécutif à sa chenalisation et à la mise en place du réservoir	14
4.2 Bilan sédimentaire.....	15
4.3 Granulométrie.....	21
4.3.1 Zones de curage et de réinjection	21
4.3.2 Comparaison entre zone de réinjection et secteurs environnants	22
4.4 Modélisations hydrauliques et mobilité du lit	23
4.4.1 Mobilité du D ₅₀	23
4.4.2 Taille maximale des particules exportables de la zone de réinjection et du réservoir.....	25
5. Discussion	27
5.1 Dynamique morpho-sédimentaire de la retenue.....	27
5.2 Continuité de la charge de fond.....	28
5.3 Biais et limites associés aux bilans sédimentaires et aux simulations hydrauliques	31
5.4 Implications en matière de gestion de la charge de fond.....	33
6. Conclusion.....	35

1. Introduction

L'action I.3 de l'OSR4 vise à améliorer notre compréhension des modalités de transit, stockage et déstockage de la charge de fond dans la retenue de Bourg-lès-Valence (Figure 1). Sur ce secteur le charriage est devenu résiduel suite à la mise en service de l'aménagement hydro-électrique et au contrôle du transit sédimentaire. Ces conditions de transport sont par ailleurs représentatives de celles qui prévalent au niveau de la grande majorité des retenues et des secteurs dérivés du Rhône à l'aval de Lyon. La retenue de Bourg-lès-Valence présente en outre la particularité d'avoir été l'objet de plusieurs campagnes de réinjections de sédiments grossiers au cours des dernières années. On ignore cependant si le Rhône dispose ici de la capacité à remobiliser ces matériaux et à les exporter à l'aval de la retenue. L'objectif principal du programme OSR4 sur le secteur est ainsi (1) de caractériser le degré de mobilité du fond du lit dans la retenue, en particulier au niveau de la zone de réinjection, et (2) d'identifier d'éventuels moyens de favoriser cette mobilité, afin notamment de rétablir la continuité sédimentaire de la retenue jusqu'au Vieux Rhône. Dans les deux cas, la caractérisation de la granulométrie immergée est un enjeu important. L'approche mise en place combine suivi bathymétrique, modélisation hydraulique 1D et détermination de la granulométrie de surface du lit.

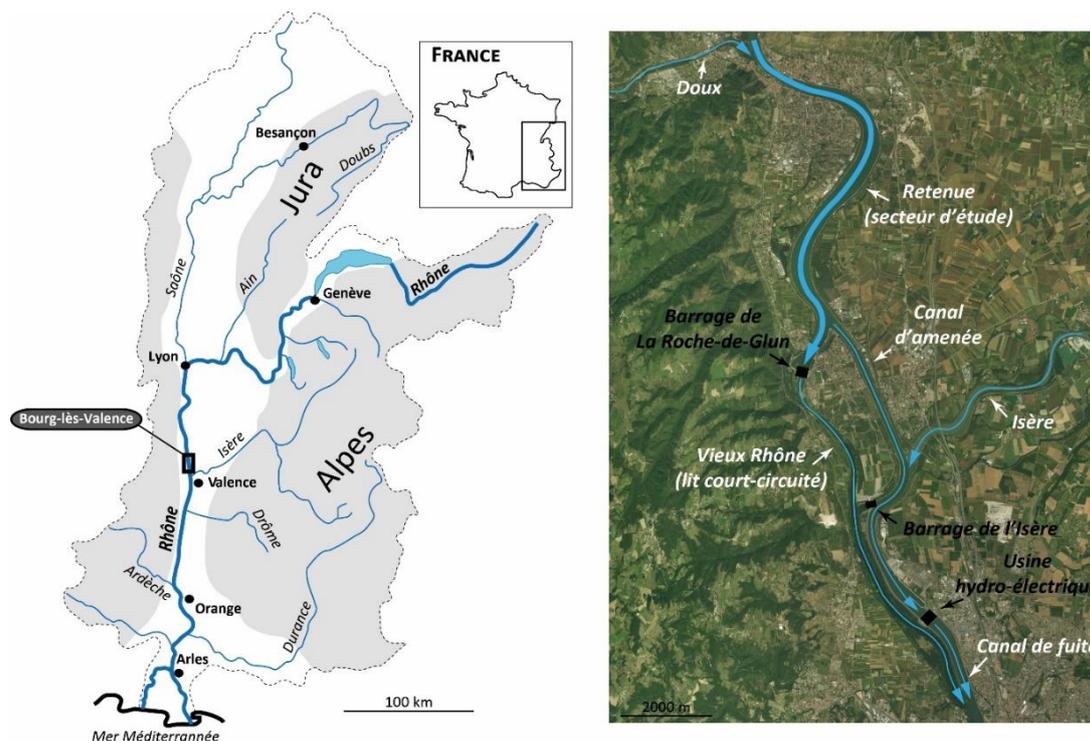


Figure 1 - Localisation du site d'étude.

2. Présentation du secteur d'étude

2.1 Caractéristiques hydrologiques et géométriques

Le secteur d'étude est situé sur le Rhône moyen, juste à l'amont de sa confluence avec l'Isère (Figure 1). Il couvre l'essentiel de la retenue de Bourg-lès-Valence et s'étend sur 9,8 km du pk 90, situé 400 m à l'amont de la confluence avec le Doux, au pk 99,35, où se trouve le barrage de la Roche-de-Glun (les pk indiquent la distance en kilomètre à la ville de Lyon). Il dispose d'une largeur moyenne de 306 m

(minimum et maximum de 161 m et 431 m, respectivement) et son débit annuel est de $1067 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (calculé pour la période 1956-2013 en soustrayant aux débits journaliers à la station de Valence, située juste à l'aval de la confluence avec l'Isère, les débits de l'Isère à la station de Beaumont-Monteux, située juste à l'amont de la confluence). Le régime hydrologique est modéré avec une très faible différence entre débits mensuels minimum et maximum ($707 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en septembre et $1414 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en février).

2.2 Chenalisation du lit et création de la retenue

Comme tout le linéaire du Rhône à l'aval de Lyon, le secteur d'étude a fait l'objet d'un corsetage de son lit par une série d'ouvrages longitudinaux et transversaux, pour l'essentiel mis en place entre le milieu du XIXe siècle et le début du XXe siècle. Ces aménagements ont provoqué la métamorphose fluviale du fleuve, caractérisée par le passage d'un style à chenaux multiples plus ou moins déliquescents à un style à chenal unique rectiligne. Trois phases d'aménagements peuvent être distinguées. Entre 1810 et 1865, ont tout d'abord été érigées les digues en plaine alluviale. De 1862 à 1897, ont ensuite été construites dans le chenal principal les digues submersibles longitudinales. Enfin, ont été édifiés au cours de la période 1880-1908 les épis, traverses et tenons.

L'aménagement hydro-électrique de Bourg-lès-Valence a été mis en service en 1968. Il est composé des compartiments suivants (Figure 1) : i) la retenue (ou Rhône total), ii) la retenue court-circuitée, longue de 1 km et qui correspond à la partie terminale de la retenue Rhône, iii) le Vieux Rhône, tronçon court-circuité de 8,5 km situé à l'aval du barrage de la Roche-de-Glun, iv) le canal d'amenée, v) le canal de l'Isère, également équipé d'un barrage et dérivant une partie du débit de l'Isère dans le Vieux-Rhône, vi) le canal de fuite.

Le débit d'équipement de l'usine hydro-électrique de Bourg-lès-Valence est de $2200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Quand le débit du Rhône total est supérieur à cette valeur moins le débit de l'Isère, les six vannes de fond du barrage de la Roche-de-Glun sont ouvertes et le débit excédentaire est dérivé dans le Vieux Rhône.

2.3 Volumes réinjectés et chronologie des campagnes de réinjection

Depuis la mise en service du réservoir en 1968, la partie terminale du Doux se comporte comme un piège pour l'intégralité de la charge de fond et pour une partie des sédiments fins. Cela résulte de l'élargissement de l'embouchure par la CNR au moment de la création de la retenue. Ces travaux étaient destinés à réduire les apports de sédiments grossiers au Rhône, susceptibles d'entraver la navigation. Cette forte capacité de piégeage de la charge de fond est également favorisée par le relèvement de la ligne d'eau au niveau de la confluence suite à la mise en service de la retenue (+3,1 m en basses eaux). Ces dépôts induisent un exhaussement du lit du Doux à l'origine d'une augmentation du risque d'inondation sur ce secteur. Afin de réduire ces effets indésirables, la CNR et la CCT (Communauté de Communes du Tournonnais) procèdent à un curage fréquent du lit du Doux. Auparavant revendus, ces sédiments extraits doivent désormais être réintroduits dans le lit du Rhône, où ils sont réinjectés dans le Rhône entre les pk 92,5 et 93,5, dans la concavité d'une boucle du réservoir.

Les volumes clapés et les dates de réinjection ont été fournis par la CNR et la CCT (Figure 2). En fonction de la granulométrie, deux types de curage et de réinjections sont distingués. Le premier concerne des sédiments fins (argiles, limons, sables), le second des sédiments grossiers (sables, graviers, galets) (Figure 2). Jusqu'en 2011, les prélèvements ne concernaient que les sédiments fins. Le volume total s'élève à 130262 m^3 . On ignore si les deux premiers curages ont fait l'objet de réinjections. Depuis 2012, 98990 m^3 de sédiments grossiers ont été réinjectés au cours de quatre campagnes distinctes.

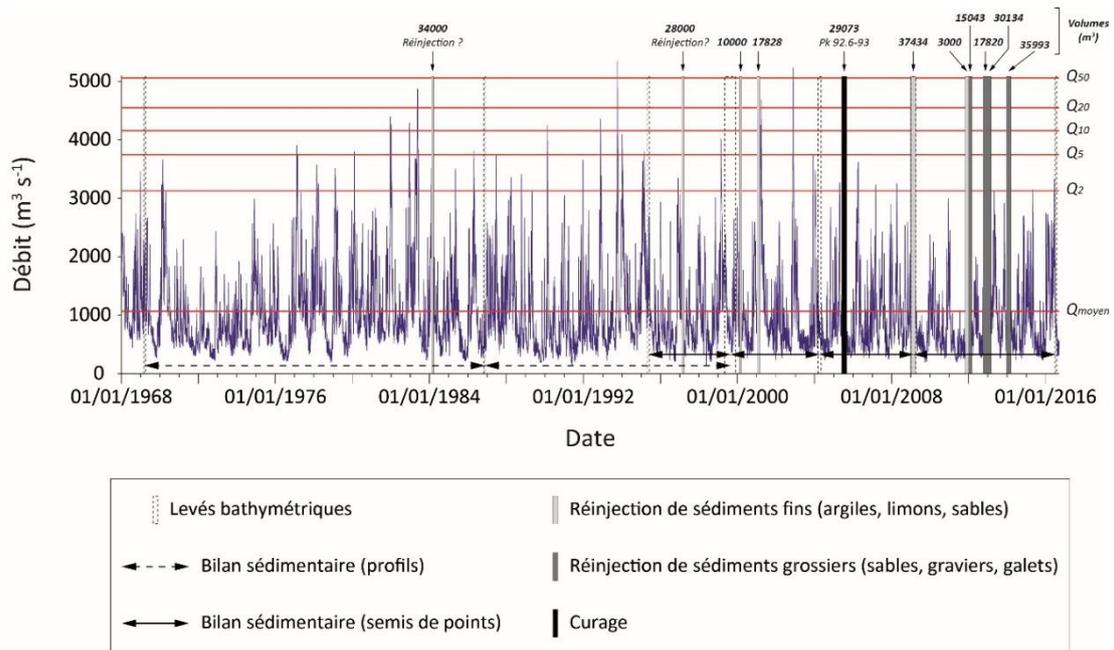


Figure 2 - Chronique des débits journaliers dans la retenue entre 1968 et 2016, dates des levés bathymétriques utilisés pour l'établissement des bilans sédimentaires, dates et volumes des sédiments réinjectés.

3. Matériel and Méthodes

L'approche méthodologique déployée combine établissement de bilans sédimentaires, caractérisation granulométrique du lit du Rhône et des sédiments qui y sont injectés, modélisation hydraulique 1D destinée à évaluer la mobilité potentielle du lit (Figure 3).

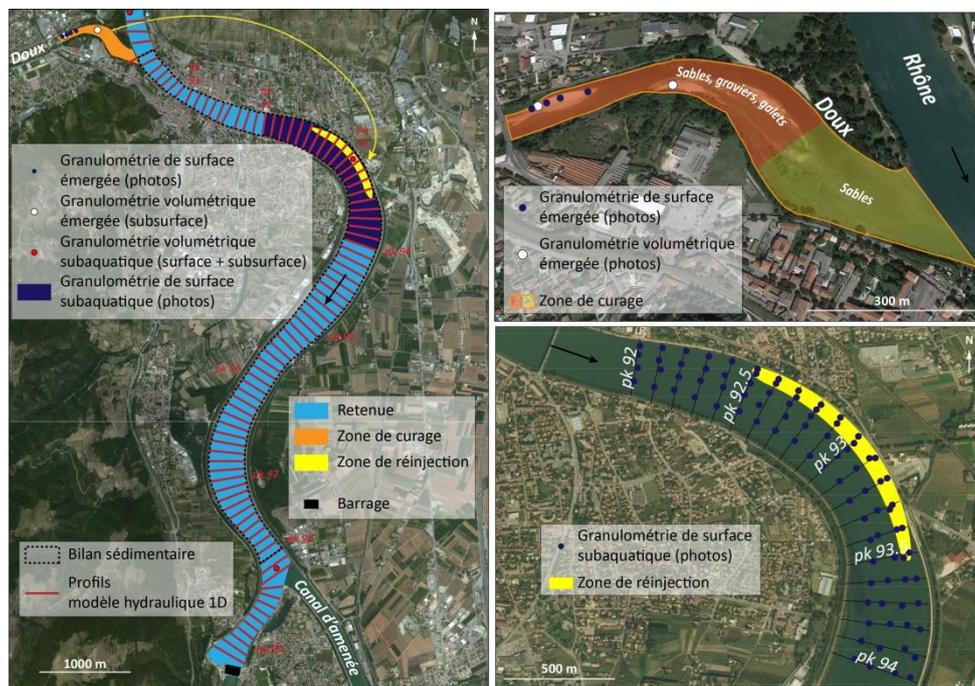


Figure 3 - Dispositif méthodologique mis en place pour caractériser la mobilité de la charge de fond dans le réservoir de Bourg-lès-Valence.

3.1 Ajustement vertical du lit suite à la mise en place des aménagements Girardon (2nd moitié XIXe) et de l'aménagement hydro-électrique de Bourg-lès-Valence (1968)

L'évolution verticale du lit dans la retenue de Bourg-lès-Valence a été caractérisée en recourant à des profils en long du thalweg entre 1897 et 2009. Leur comparaison devrait permettre de quantifier le rôle respectif des aménagements Girardon (chenalisation du lit survenue de 1862 à 1908) et du barrage de la Roche-de-Glun (1968) dans les ajustements morphologiques survenus au sein du secteur d'étude au cours des 120 dernières années. Les données de 1897 sont tirées de cartes bathymétriques anciennes sur lesquelles est indiquée l'altitude du thalweg à un pas de 100 m et sont dessinées des isolignes selon une résolution comprise entre 0,2 et 0,5 m. Entre 1969 et 2009, les données proviennent de relevés bathymétriques réalisés par la CNR.

3.2 Bilans sédimentaires

3.2.1 Données

L'évolution morphologique dans le réservoir a été caractérisée et quantifiée par le biais de bilans sédimentaires établis entre 1969 et 2016. Le secteur étudié s'étend de l'aval de la confluence avec le Doux jusqu'à la diversion entre retenue court-circuitée et canal d'amenée (pk 90.4-98) (Figure 3). L'extrémité aval de la retenue (pk 98-99.3) n'a pas été étudiée en raison de l'absence de données disponibles pour la totalité des dates retenues.

Les données bathymétriques ont été fournies par la CNR. Il s'agit de profils en travers espacés de 100 m (1969, 1986, 1999) et de semis de points (1995, 1999, 2004, 2009, 2016) (Tableau 1). Pour les profils, l'espacement moyen entre points varie de 2 à 6,2 m en fonction des dates. A l'exception de 2016, les semis de points utilisés ne correspondent pas au semis originel. Nous disposons à la place d'un semis déjà interpolé avec des points espacés de 0,5 ou 1 m selon une grille régulière (densité = 1-3,3 pt m⁻²). Pour 2016, nous disposons à la fois du semis brut (densité = 106 pt m⁻²) et du semis interpolé (densité = 4,5 pt m⁻²). Les données de 1969 et 1986 ont été acquises au fil à plomb. L'erreur maximale de mesure, communiquée par la CNR, est estimée à 40 et 30 cm respectivement. Entre 1995 et 2009, les données ont été acquises par GPS et sondeurs mono-faisceau (alignement de dix sondeurs) (erreur max = 20 cm), puis pour 2016, par sondeur multifaisceaux (erreur max = 10 cm).

Tableau 1 - Dates et caractéristiques des levés bathymétriques (FB = Fil à plomb, MoF = Mono-faisceau, MuF = Multi-faisceau).

Date	Appareil	Erreur de mesure max (m)	Nb moyen de points par profils	Espacement moyen entre points (m)	Densité de points (nb pt m ²)
1969	FB	0.4	44	6.2	
1986	FB	0.3	53	5.1	
1999	MoF	0.2	138	2	
1995	MoF	0.2			1
1999	MoF	0.2			1
2004	MoF	0.2			1
2009	MoF	0.1			3.3
2016	MuF	0.1			4.5-106

3.2.2 Méthode

Les bilans sédimentaires ont été établis sur l'emprise pour laquelle la bathymétrie était renseignée pour l'intégralité des dates étudiées. Les bilans déterminés à partir de profils en travers ont été obtenus par calcul des surfaces remaniées au droit des profils et par interpolation entre profils. Les bilans déterminés à partir des semis de points ont été générés par MNT différentiel. Ont ainsi été calculés les volumes érodés, les volumes déposés, la somme des volumes érodés et déposés, la différence entre volumes déposés et volumes érodés. Les détails méthodologiques relatifs à l'établissement des bilans sédimentaires et à l'erreur qui leur est associée sont indiqués ci-dessous.

L'erreur totale se compose de deux termes : une erreur de mesure et une erreur d'interpolation. En supposant une distribution normale de l'erreur de mesure et en approximant que l'erreur maximale est égale à trois fois l'écart-type, nous avons estimé l'erreur de mesure par la formule suivante : erreur max / 3. La méthode de calcul de l'erreur d'interpolation, et donc de l'erreur totale, varie ensuite en fonction des types de données (profils ou nuage de points) :

- Profils

Les bilans ont été déterminés en appliquant la méthode développée par Arnaud et al. (2017). Une légère modification a néanmoins été apportée puisque dans notre cas, l'erreur de mesure n'a pas été calculée à partir de mesures réalisées à différentes dates au niveau de profils supposément immobiles.

- Semis de points

Les bilans sédimentaires ont été générés sous SIG (ArcGIS 10.4 et son module complémentaire libre Geomorphic Change Detection (GCD)). Pour chaque date, le MNT a été construit à partir d'un TIN. La taille de cellule retenue est de 30 cm. L'erreur a été calculée en appliquant la méthode développée par Heritage et al. (2009) et Milan et al. (2011). Spatialement variable, l'estimation de l'erreur est basée sur la quantification de l'effet de la rugosité de surface sur l'erreur d'altitude. Cette dernière correspond à l'écart-type de la différence entre altitude de chaque point du semis et altitude de chaque cellule du MNT, calculé pour chaque cellule du MNT selon une fenêtre glissante de 1 m de rayon. La rugosité de surface correspond à l'écart-type de l'altitude des points du semis, calculée pour chaque cellule du MNT selon une fenêtre glissante de 1 m de rayon. Après discrétisation, une régression linéaire entre erreur d'altitude et rugosité est établie. Puisque les données antérieures à 2016 sont déjà interpolées et puisque les capacités de calcul offertes par le logiciel sont insuffisantes pour traiter le semis de point 2016 sur l'intégralité du secteur d'étude, la méthode originelle de Heritage et al. (2009) et Milan et al. (2011) a été légèrement adaptée. La régression linéaire a ainsi été établie sur un sous-tronçon du secteur d'étude. L'erreur d'altitude a été alors calculée à partir du semis brut, la rugosité à partir du semis interpolé. Cette régression a ensuite été appliquée à chacune des dates étudiées. Parce que la densité des semis interpolés varie en fonction des dates, deux régressions ont été établies : la première est donnée pour un semis interpolé de 2016 avec une densité de 1 pt par m² (données de 1995, 1999 and 2004), la seconde avec une densité de 4 pt par m² (données de 2009 et 2016). Les deux relations suivantes ont ainsi été obtenues :

- pour une densité de 1 pt / m²,

$$Erreur = 0.436456 \times Rugosité + 0.006117 \quad \text{Eq. 1 ; } r^2=0.93, \text{ p-value}<0.0001$$

- pour une densité de 4 pt / m²,

$$Erreur = 0.422125 \times Rugosité + 0.001526 \quad \text{Eq. 2 ; } r^2=0.96, \text{ p-value}<0.0001$$

L'erreur totale pour un MNT différentiel entre t et t+1 est ensuite obtenue à partir de la relation suivante (Lane et al., 2003) :

$$U_{crit} = t \sqrt{\left(\sqrt{\sigma_{mes(t)}^2 + \sigma_{int(t)}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\sigma_{mes(t+1)}^2 + \sigma_{int(t+1)}^2}\right)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

avec U_{crit} l'erreur totale ou seuil minimal de détection, t l'intervalle de confiance choisie (ici 99% soit $t=2,58$), $\sigma_{mes(t)}$ et $\sigma_{mes(t+1)}$ les erreurs de mesure à t et $t+1$, $\sigma_{int(t)}$ et $\sigma_{int(t+1)}$ les erreurs d'interpolation à t et $t+1$.

Enfin, les volumes érodés et sédimentés calculés via GCD ne concernent que les cellules pour lesquelles le différentiel d'altitude entre les deux dates est supérieur au seuil minimal de détection. Les autres cellules sont exclues de l'analyse. De plus, un terme d'erreur (+/-) est associé aux volumes indiqués. Calculé pour chaque cellule, il correspond au produit entre superficie de la cellule et erreur totale.

3.3 Détermination de la granulométrie du lit : photographies et échantillonnages volumétriques

3.3.1 Réservoir de Bourg-lès-Valence

Deux types de méthodes ont été employés. Tout d'abord, trois échantillons volumétriques de surface et de la partie supérieure de la couche de subsurface ont été prélevés dans le thalweg au niveau des pk 89.5, 93 et 98 (Parrot, 2015) (Figure 3). Chaque échantillon est en réalité composé de trois sous-échantillons distincts situés à proximité les uns des autres. Ensuite, une série de photographies du lit a été réalisée sur un sous-tronçon de deux km de long. Ses limites amont et aval sont situées à 500 m des extrémités de la zone de réinjection (pk 92-94) (Figure 3). Les photographies ont été prises lors de deux campagnes (octobre 2016 et janvier 2017). Puisque le débit maximal atteint entre les deux campagnes a été relativement faible, il peut être raisonnablement considéré que la granulométrie du lit entre les deux dates est restée inchangée. Les données ont été acquises pour des profondeurs comprises entre 1,5 m et 12 m. Les prises de vues ont été réalisées par l'intermédiaire d'une simple caméra de surveillance (Caméra submersible 50m IP Full HD UW-UW-6020IP, Allwan Security®) montée sur une structure métallique contrôlée à partir d'une poulie fixée à la proue d'un bateau (équipement et personnel technique mis à disposition par la CNR) (Figure 4). La partie inférieure de la structure métallique, composée d'un cadre ajouré le long duquel est fixée une règle, est parallèle au plan de la focale de l'appareil. La taille des photographies est de 32.6 x 21.8 cm. Quatre-vingt-neuf points ont été échantillonnés. Ils sont localisés le long de profils en travers espacés de 100 m. Pour chaque profil, quatre ou cinq points ont été échantillonnés. Le long de la zone de clapage, deux points sont systématiquement localisés en concavité, au niveau du stock sédimentaire réinjecté. Les deux ou trois points restants, équidistants, sont situés sur le reste de chacun des profils. A l'amont et à l'aval de la zone de réinjection, les points sont régulièrement espacés le long de chacun des profils.

Pour chaque échantillon, au moins cinq photographies ont été réalisées (Figure 4). Proches les unes des autres, elles ne présentent néanmoins aucun recouvrement. Cette stratégie a été adoptée afin de réduire le risque d'échantillonner une zone non représentative du contexte sédimentaire local. Sur chaque photographie, l'axe-b apparent a été mesuré manuellement sur 20 particules situées aux intersections d'une grille régulière. Pour chaque point échantillonné, nous disposons donc d'une valeur d'axe-b pour au moins 100 particules (cinq images et 20 particules par image), à partir desquelles ont été calculés le D_{50} , le D_{90} , et le D_{50} des dix plus grandes particules.

3.3.2 Secteur de curage du Doux

Au niveau de la zone de curage du Doux, ont été déterminées les granulométries de surface et de subsurface (Figure 3). La granulométrie de surface a été obtenue à partir de quatre photographies (0.9 x 0.9 m) prises sur le banc situé sur la portion amont du tronçon (août 2016). Transversalement, les photographies sont situées au centre du banc. Longitudinalement, elles sont régulièrement espacées de la tête à la queue de banc. Les photographies ont été prises avec un Nikon D700 (objectif AF-S Nikko 35 mm, hauteur de prise de vue = 2.4 m), avec flash et après avoir pris soin de masquer la scène du rayonnement solaire direct. Sur chaque photographie, l'axe-b apparent a été mesuré manuellement sur 100 particules situées aux intersections d'une grille régulière. L'espacement entre les intersections est supérieur au plus grand axe-a de chaque photographie.

La granulométrie de subsurface a été obtenue à partir de deux échantillons volumétriques situés en tête de chacun des deux bancs présents sur le secteur (Figure 3 et Figure 4). La masse de la plus lourde des particules de chacun des échantillons est égale à 1,8 % et 1,3 % de leur masse séchée totale (469 kg à l'amont, 404 kg à l'aval). Ces valeurs excèdent légèrement le critère de 1 % prescrit par Church et al. (1987) pour obtenir une distribution non biaisée par la masse des particules les plus lourdes.



Figure 4 - Aperçu des dispositifs mis en œuvre pour la détermination de la granulométrie à partir de photographies subaquatiques (trois images du haut) et d'échantillonnages volumétriques (trois images du bas).

3.3.3 Analyse comparative

Puisque la granulométrie dans la zone de réinjection et dans la zone de curage devrait être théoriquement similaire, nous avons procédé dans un premier temps à leur comparaison. Dans un second temps, la granulométrie de surface dans la zone de réinjection (photographies) a été comparée à celle des zones situées en convexité au droit de la zone de réinjection, en concavité à son amont et en concavité à son aval. Deux types de comparaisons ont été effectués : la première concerne les trois paramètres utilisés pour la description de la granulométrie de chacun des points échantillonnés (D_{50} , D_{90} , D_{50} des dix plus grandes particules) ; la seconde se base sur la totalité des particules ainsi que sur les seules dix plus grandes mesurées au niveau de chacune des zones définies ci-dessus. La significativité statistique des différences a été testée à l'aide d'un test de Mann-Whitney.

3.4 Modélisation hydraulique 1D

3.4.1 Paramètres du modèle et débits simulés

La vitesse moyenne à l'échelle des sections en travers a été déterminée par l'intermédiaire du modèle 1D MAGE, développé par l'IRSTEA et mise en œuvre sur l'intégralité du Rhône de la sortie du lac Léman jusqu'au delta du Rhône. Les modélisations réalisées s'étendent de la station hydrométrique de Ternay (pk 15,2) au secteur de Donzère-Mondragon (PK 170,5). Les sorties du modèle ont été exploitées uniquement au niveau du réservoir étudié (pk 90-99.35) (Figure 3). Les données topo-bathymétriques utilisées datent de 2004 et 2007 et ont été acquises par la CNR. Elles se présentent sous la forme de profils en travers espacés de 100 m. Les Tableau 2 et Tableau 3 indiquent d'une part les lignes d'eau et les débits pour lesquelles le calage et la validation ont été effectués, d'autre part, les coefficients de Strickler utilisés. Le Tableau 4 présente les consignes d'exploitation de l'ensemble de l'aménagement de Bourg-lès-Valence. Les apports des affluents, considérés comme constants, sont égaux à leur débit annuel moyen. (Gier = $3.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; Cance = $4.36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; Galaure = $2.14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; Doux = $8.65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; Isère = $329 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Les conditions limites amont correspondent aux cinq valeurs de débit simulées, équivalentes à des périodes de retour de 2, 5, 10, 20 et 50 ans. Les conditions aval initiales sont fixées au pk 170.5. Elles sont données par une loi $Z(t)$. Les simulations se font sur dix jours en régime permanent avec un pas de temps de 60s.

Afin de quantifier le potentiel maximal de remobilisation des sédiments de surface, en particulier dans la zone de réinjection, deux scénarios de transparence sédimentaire ont également été simulés. Les multiples scénarios de transparence testés s'appuient sur des modifications pouvant affecter, isolément ou de façon combinée, les trois paramètres suivants :

- la hauteur d'eau max autorisée en un point donné,
- la répartition des débits entre canal d'amenée et Vieux Rhône,
- le degré d'ouverture des vannes des barrages.

Parmi les scénarios présentant pour la retenue les gains de vitesse les plus élevés, ont été exclus ceux pour lesquels étaient constatés de possibles « incohérences » hydrauliques. Ces incohérences concernent principalement deux courtes sections du canal d'amenée. Elles consistent pour l'essentiel en d'importantes variations négatives de l'altitude de la ligne d'eau entre deux profils consécutifs (0,15-1,6 m). Se pose aussi le problème éventuel de certaines vitesses moyennes dans le canal qui pourraient être trop élevées ($6-12 \text{ m s}^{-1}$).

Au final, deux scénarios de transparence ont été retenus. Le premier impose un abaissement de la ligne d'eau à la diffluence entre Vieux Rhône et canal d'amenée (114 m au pk 98,3 quel que soit le débit

en entrée, contre 116,8-117 m en fonctionnement normal). Pour une Q_{50} , cela permet quasiment d'effacer la chute au barrage de la Roche-de-Glun (0,7 m avec ce scénario contre 4,4 m en fonctionnement normal). Le second scénario impose un abaissement de la ligne d'eau au niveau du barrage de la Roche-de-Glun (114 m), une dérivation de la quasi-intégralité des débits dans le Vieux Rhône (débit résiduel de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ dans le canal) et une déconnexion de l'usine de Bourg-lès-Valence ($h \text{ vanne} = 1 \text{ mm}$).

Tableau 2 - Lignes d'eau utilisées pour la calibration et la validation du modèle (en gras celles utilisées pour le calage, les autres pour la validation).

Secteur	Date et débit ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Réservoir – Canal d'amenée – Canal de fuite	10/03/01 – $Q_r = 3651 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 457 \text{ m}^3/\text{s}$
	15/03/01 – $Q_r = 4233 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 568 \text{ m}^3/\text{s}$
	05/11/02 – $Q_r = 2835 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 457 \text{ m}^3/\text{s}$
	16/11/02 – $Q_r = 4580 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 1495 \text{ m}^3/\text{s}$
	03/12/03 – $Q_r = 2647 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 586 \text{ m}^3/\text{s}$
	20/08/07 – $Q_r = 1071 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 198 \text{ m}^3/\text{s}$
Vieux Rhône	14/01/04 – $Q_r = 3002 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 1128 \text{ m}^3/\text{s}$
	31/03/05 – $Q_r = 1265 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 395 \text{ m}^3/\text{s}$
	06/05/08 – $Q_r = 935 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 475 \text{ m}^3/\text{s}$
	04/01/12 – $Q_r = 2914 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_i = 449 \text{ m}^3/\text{s}$

Tableau 3 - Rugosité du lit sur les différents biefs du modèle.

Secteur	pk amont (km)	Pk aval (km)	Strickler lit moyen ($\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$)	Strickler plaine alluviale ($\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$)
Rhône réservoir	86.60	90.40	30	20
	90.40	98.325	35	20
Vieux Rhône	98.325	108.20	30	20
Canal	98.325	107.81	40	20
Isère canal	0.00	0.31	36	20

Tableau 4 - Consignes d'exploitation de l'ensemble de l'aménagement de Bourg-lès-Valence.

Pk point de réglage (km)	Cote à régler (m NGF) en fonction du débit ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
90.6 (réservoir)	$0 < Q_{\text{Rhône}} < 3000 : 118.49 ; 3000 < Q_{\text{Rhône}} < 6200 : 118.49 - 121.19$
101.35 (canal d'amenée)	$116.94 \text{ if } Q_{\text{Isère}} < 700 ; 116.79 \text{ if } Q_{\text{Isère}} > 700$

3.4.2 Mobilité de la charge de fond

A partir des sorties du modèle, ont été déterminées pour chaque nœud du modèle dans le lit mineur (23 points par profil) et pour chaque débit simulé la plus grande taille de particule mobilisable ainsi que la mobilité potentielle du D_{50} . A partir de ce dernier paramètre, le pourcentage de largeur de lit pour lequel le D_{50} peut être mobilisé a aussi été calculé le long de chacun des profils en travers. Pour chacun

de ces paramètres, deux estimations, basées sur un nombre critique de Shields de 0,03 et de 0,06 ont été proposées. La première valeur correspond à un faible degré de compaction des grains composant la couche de surface du lit. Elle est caractéristique d'une fréquence de mobilisation de la charge de fond relativement élevée. La seconde valeur correspond à l'inverse, à une forte compaction des sédiments, situation rencontrée lorsque la couche de surface est peu mobile.

Pour cela, a tout d'abord été calculée pour chaque nœud i du modèle la contrainte de cisaillement totale :

$$\tau_i = \rho_w g H_i J \quad \text{Eq. 4}$$

avec τ_i la contrainte totale en i exprimée en N m^{-2} ; ρ_w la masse volumique de l'eau (1000 kg m^{-3}), g l'accélération de la gravité en m s^{-2} , H_i la hauteur d'eau en i exprimée en m, J la pente d'énergie en m^{-1} , calculée à partir de la formule de Manning-Strickler :

$$V = K R_h^{2/3} J^{1/2} \quad \text{Eq. 5}$$

à partir de laquelle est obtenu :

$$J = \frac{V^2}{K^2 R_h^{4/3}} \quad \text{Eq.6}$$

où V est la vitesse moyenne à l'échelle de la section en travers, exprimée en m s^{-1} ; K est le coefficient de rugosité total de Strickler en $\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, R est le rayon hydraulique en m. Ces trois paramètres ont été obtenus à partir des simulations.

Ensuite, la contrainte de cisaillement efficace pour chaque nœud i du modèle a été calculée à partir de la contrainte totale :

$$\tau_i'' = \frac{\rho_w g H_i V^2}{K^{1/2} K_s^{3/2} R_h^{4/3}} \quad \text{Eq.7}$$

avec $\tau_i'' = \tau_i \left(\frac{K}{K_s}\right)^{3/2}$, où K_s , le coefficient de rugosité du à la seule résistance des grains, exprimé en $\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, a été calculé à partir de l'équation de Meyer-Peter et Müller (1948) :

$$K_s = \frac{26}{D_{90}^{1/6}} \quad \text{Eq.8}$$

avec D_{90} la taille de sédiment de surface en mm pour laquelle 90 % du nombre total de particules disposent d'une taille inférieure.

La compétence (taille maximale mobilisable) en i a ensuite été déterminée de la façon suivante :

$$D_{\max(i)} = \frac{\tau_i''}{g \theta_c (\rho_s - \rho_w)} \quad \text{Eq.9}$$

avec $D_{\max(i)}$ la compétence en i , exprimée en m, θ_c le nombre critique de Shields, égal à 0,03 ou 0,06, et ρ_s la masse volumique des sédiments (2650 kg m^{-3}).

Enfin, la mobilité potentielle du D_{50} de surface a été calculée en soustrayant le nombre critique de Shields (0,03 ou 0,06) à la contrainte efficace adimensionnelle. Les valeurs positives indiquent que le D_{50} est mobilisable, tandis que les valeurs négatives indiquent une absence de mobilisation. La contrainte efficace adimensionnelle a été obtenue de la façon suivante :

$$\tau''_{ci} = g\theta_c(\rho_s - \rho_w)D_{50} \quad \text{Eq.10}$$

où θ_c est le nombre critique de Shields en i égal à 0,03 ou 0,06, et D_{50} la taille de sédiment de surface en mm pour laquelle 50 % du nombre total de particules disposent d'une taille inférieure.

Pour la totalité du réservoir, les D_{50} et D_{90} de surface utilisés dans les équations ci-dessus ont été obtenus à partir des échantillonnages volumétriques réalisés en 2012 par E. Parrot (2015). A partir de ces données, deux valeurs de taille de grain ont été utilisées. La première a été obtenue par interpolation linéaire entre deux prélèvements. Pour la seconde, la taille des grains au niveau de chaque point échantillonné a été utilisée sur une distance égale à la moitié de la distance aux échantillons suivants et précédents. Pour la zone de réinjection et pour la retenue court-circuitée, a également été utilisée la granulométrie obtenue à partir des deux échantillons volumétriques du Doux. La retenue court-circuitée a été renseigné de cette façon afin de déterminer le potentiel de mobilisation des sédiments réinjectés en cas de clapage à proximité immédiate du barrage.

4. Résultats

4.1 Réajustement vertical du lit consécutif à sa chenalisation et à la mise en place du réservoir

L'évolution diachronique de l'altitude du thalweg entre 1897 et 2009 indique de façon évidente que la grande majorité des évolutions verticales survenus au cours de la période se sont produits suite à la chenalisation du lit avant la mise en place du réservoir (Figure 5). Entre 1897 et 1969, le lit a ainsi enregistré une incision importante et généralisée, avec une valeur moyenne de -1,67 m (écart-type (ET) = 0,95 m), soit -0,021 m par an. Entre 1969 et 2009, le lit est stable à l'aval du pk 94, avec une évolution verticale moyenne de -0,066 m (ET = 0,14 m), soit -0,0005 m par an. Le long de ce tronçon, le taux d'enfoncement est 33 fois plus faible que pour la période 1897-1969. A l'amont du pk 92,5, l'enfoncement se poursuit, avec une valeur moyenne de -1,64 m (ET = 1,1 m), soit -0,042 m par an. Elle se manifeste pour l'essentiel avant 1986. Le tronçon allant du pk 92,5 au pk 93,5 est sujet à un exhaussement marqué, correspondant très probablement au dépôt des sédiments réinjectés (Figure 2). Ces accumulations se mettent en place pour l'essentiel entre 1986 et 1999 puis entre 2004 et 2009.

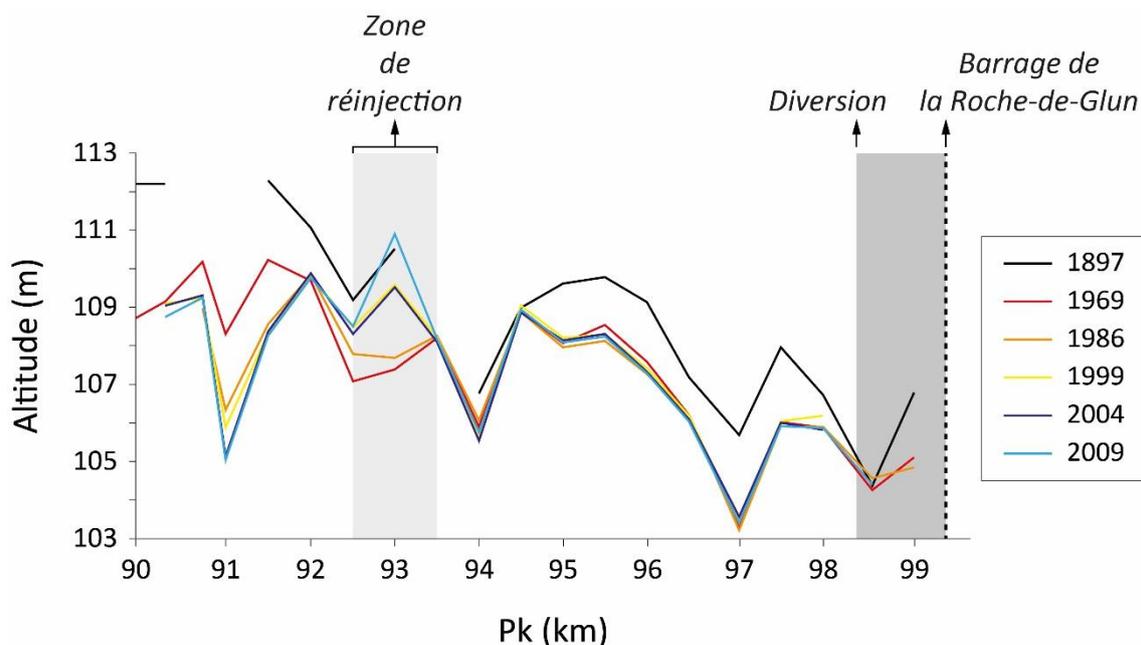


Figure 5 - Altitude du thalweg à un pas d'espace de 500 m le long du réservoir entre 1897 et 2009.

4.2 Bilan sédimentaire

1969-2016

Avec une valeur annuelle de -11600 m^3 , le bilan sédimentaire pour l'intégralité de la période d'étude est négatif (Figure 6 et Figure 7). L'érosion est relativement régulière sur l'intégralité du linéaire de la retenue. On observe néanmoins deux tronçons d'érosion préférentielle situés à l'amont et à l'aval de la retenue (pk 90,4-92,8 et pk 95,6-97,5) avec des volumes représentant respectivement 40 et 32 % du volume érodé total (tronçons occupant 23 et 29 % de la superficie du réservoir). Le volume déposé est 2,5 fois inférieur à celui érodé (Figure 6 and Figure 7). Les dépôts sont principalement localisés entre les pk 92,5 et 93,5, soit exactement au niveau de la zone de réinjection. Ils représentent la moitié du volume déposé total (pour 14,4 % de la surface du réservoir) (Figure 6). Par ailleurs, 139424 m^3 (98990 m^3 de matériel grossier + 40434 m^3 de matériel fin) ont été réinjectés du pk 92,5 au pk 93,5 entre 2009 et 2014 (Figure 6). Cette valeur est inférieure aux 180800 m^3 déposés sur ce tronçon, ce qui laisserait supposer qu'une partie des sédiments réinjectés avant 2009 n'ont pas été totalement évacués. En retirant du bilan les volumes artificiellement érodés et déposés (volumes officiellement curés et volumes de matériaux grossiers officiellement réinjectés), le bilan change peu et indique une tendance à l'export encore un peu plus marquée (Figure 7).

1969-1986

Le bilan sédimentaire est négatif et les volumes érodés sont les plus élevés pour la totalité de la période d'étude (Figure 6 et Figure 7). Une partie importante de ce volume est localisée sur la partie amont du réservoir, entre les pk 90,4 et 91,5 (8 % de la surface du réservoir). Il représente 35 % du volume érodé total (Figure 6). Le volume déposé est 1,8 fois inférieur à celui érodé (Figure 6 et Figure 7). Les dépôts sont pour l'essentiel localisés à l'aval immédiat de la zone préférentielle d'érosion, entre les pk 92,2 et 94,1, où ils représentent 63,1 % du volume déposé total (27 % de la surface du réservoir) (Figure 6). Ces accumulations (187100 m^3) pourraient provenir des zones érodées amont (188000 m^3) (Figure 6). Seule une faible part pourrait correspondre au matériel possiblement réinjecté en 1984 : le

volume en question (34000 m³ de matériel fin) est en effet largement inférieur au volume déposé sur ce tronçon. Par ailleurs, la survenue d'une crue de période de retour cinq ans entre la date de réinjection et les relevés bathymétriques de 1986 aura probablement contribué à diffuser vers l'aval une proportion importante, si ce n'est la totalité, de ce stock réinjecté. Si l'on retire ces volumes possiblement réinjectés du bilan, les caractéristiques initiales de ce dernier restent identiques.

1986-1999

Il s'agit de la seule période pour laquelle le bilan est positif. Le volume érodé est 2,5 fois plus faible que le volume déposé (Figure 6 et Figure 7). Les érosions sont localisées en majorité à l'amont du pk 93,3 (64 % du volume érodé total pour 29 % de la surface du réservoir) (Figure 6). Les dépôts sont les plus importants pour l'intégralité de la période d'étude. Ils sont distribués de façon relativement régulière le long de la retenue (Figure 6). En raison d'une part, de données manquantes sur une bonne partie de la longueur de certains profils, et d'autre part, de l'existence d'évolutions vraisemblablement aberrantes (comme la suppression de la partie supérieure de digues immergées au pk 91,1 et entre les pk 91,9 et 92,4), les volumes érodés et déposés pourraient être en partie erronés. Ils ont donc été retirés du bilan, tout comme les 28000 m³ possiblement réinjectés. Une fois ces modifications intégrées, les caractéristiques principales du bilan demeurent inchangées.

1995-1999

Les changements morphologiques sont marginaux pour cette période et le bilan est légèrement positif (Figure 6 et Figure 7). Les érosions sont principalement localisées au niveau de deux tronçons distincts : entre les pk 91 et 91,9, et entre les pk 96 et 97,5 (Figure 6 et Figure 8). Leur volume représente respectivement 31 % et 47 % du volume érodé total. Le volume déposé est 1,7 fois inférieur (Figure 6 et Figure 8). Les dépôts sont également localisés au niveau de deux tronçons : entre les pk 93,1 et 93,9 et entre les pk 97,1 et 97,3. Ils représentent respectivement 56 % et 10 % du volume déposé total (pour 34 % de la surface du réservoir) (Figure 6, Figure 7 et Figure 8). Le tronçon amont, localisé en centre de chenal, pourrait correspondre à la part du stock sédimentaire possiblement réinjecté en 1997 (280000 m³ de sédiments fins) et non remobilisé depuis. Si l'on supprime du bilan ces dépôts amont (8900 m³ +/- 2300), celui-ci devient quasiment équilibré.

1999-2004

Cette période enregistre des changements morphologiques importants (Figure 6 et Figure 7). Le bilan sédimentaire est largement négatif (Figure 6 et Figure 7). L'érosion se produit sur toute la longueur du réservoir. La partie amont, jusqu'au pk 93,6 est cependant la plus affectée, avec 77 % du volume érodé total (pour 33 % de la surface du réservoir) (Figure 6 et Figure 8). Le volume déposé est trois fois inférieur à celui érodé (Figure 6 et Figure 7). Trois principaux secteurs de dépôts sont identifiés (pk 91-91.3, pk 94.3-94.6 et pk 97-97.3) (Figure 6 et Figure 8). Ils représentent 69 % du volume total déposé (16 % de la surface du réservoir) (Figure 6 et Figure 8). Deux campagnes de réinjection de sédiments fins (2000 et 2001) ont été réalisées pour un total de 27828 m³. En raison de la survenue de deux crues très importantes (période de retour de 25 et 68 ans), la plupart de ces sédiments ont probablement été soit évacués puis déposés plus à l'aval, avec une épaisseur de dépôt inférieure au seuil de détection, soit exportés du réservoir. Les volumes accumulés au niveau de la zone de dépôts intermédiaire (12400 m³ +/- 2600 entre les pk 94.3 et 94.6) pourraient néanmoins provenir d'une partie des sédiments réinjectés.

2004-2009

Les changements morphologiques sont localement importants et le bilan est légèrement positif (Figure 6 et Figure 7). L'essentiel de l'érosion ($31000 \text{ m}^3 \pm 2900$, soit 68 % du volume total) prend place entre les pk 92,6 et 93 (Figure 6 et Figure 8). Ces 31000 m^3 sont très proches des 29100 m^3 curés au niveau de ce tronçon. L'essentiel du volume déposé est localisé entre les pk 92,5 et 93,5 (Figure 6 et Figure 8). Il s'élève à $40700 \text{ m}^3 (\pm 3800)$, soit 74 % du volume déposé total. Il correspond grossièrement aux 37400 m^3 de sédiments fins réinjectés en 2009 sur cette section. Si en 2009, les dates de levés bathymétriques et celles de réinjection ne sont pas précisément connues, les données présentées ci-dessus indiquent sans équivoque que les levés ont été réalisés avant la réinjection. Après soustraction des volumes artificiellement érodés et déposés (volumes soustraits à partir des données locales du bilan sédimentaire et non pas à partir des volumes officiellement réinjectés et curés tels que fournis par la CNR), le bilan devient presque équilibré et les changements morphologiques sont mineurs.

2009-2016

Des changements morphologiques sont détectés sur tout le linéaire du réservoir et le bilan est largement positif sur cette période (Figure 6, Figure 7 et Figure 8). L'érosion se manifeste préférentiellement entre les pk 91 et 91,5 et entre les pk 96,3 et 97,2 (Figure 6 et Figure 8). 22 % et 35 % du volume érodé total y sont respectivement localisés (pour 23 % de la surface du réservoir). La plupart des dépôts sont situés au niveau de la zone de réinjection (pk 92,5-93,5) (66 % du volume déposé total) et à son aval immédiat (pk 93,6-94,9) (25 % du volume déposé total) (Figure 6 et Figure 8). Si l'on se focalise exclusivement sur la zone de réinjection, située dans la concavité de la boucle amont, les volumes déposés s'élèvent à $78400 \text{ m}^3 (\pm 4600)$, soit 62 % du volume déposé total. En y ajoutant les dépôts localisés à son aval immédiat, toujours dans la concavité, les volumes atteignent $102400 \text{ m}^3 (\pm 10400)$, soit 80 % du volume déposé total. Cette valeur est équivalente aux 98990 m^3 de sédiments grossiers réinjectés entre les pk 92,5 et 93,5 de 2012 à 2014. Si l'on fait l'hypothèse relativement raisonnable que ces 102400 m^3 correspondent au stock réinjecté, cela signifie qu'en 2016, 24 % du volume de ce stock a été déposé le long des 1500 m situés à l'aval de la zone de clapage. Après soustraction des volumes artificiellement érodés et déposés, le bilan devient presque équilibré et les changements morphologiques sont mineurs.

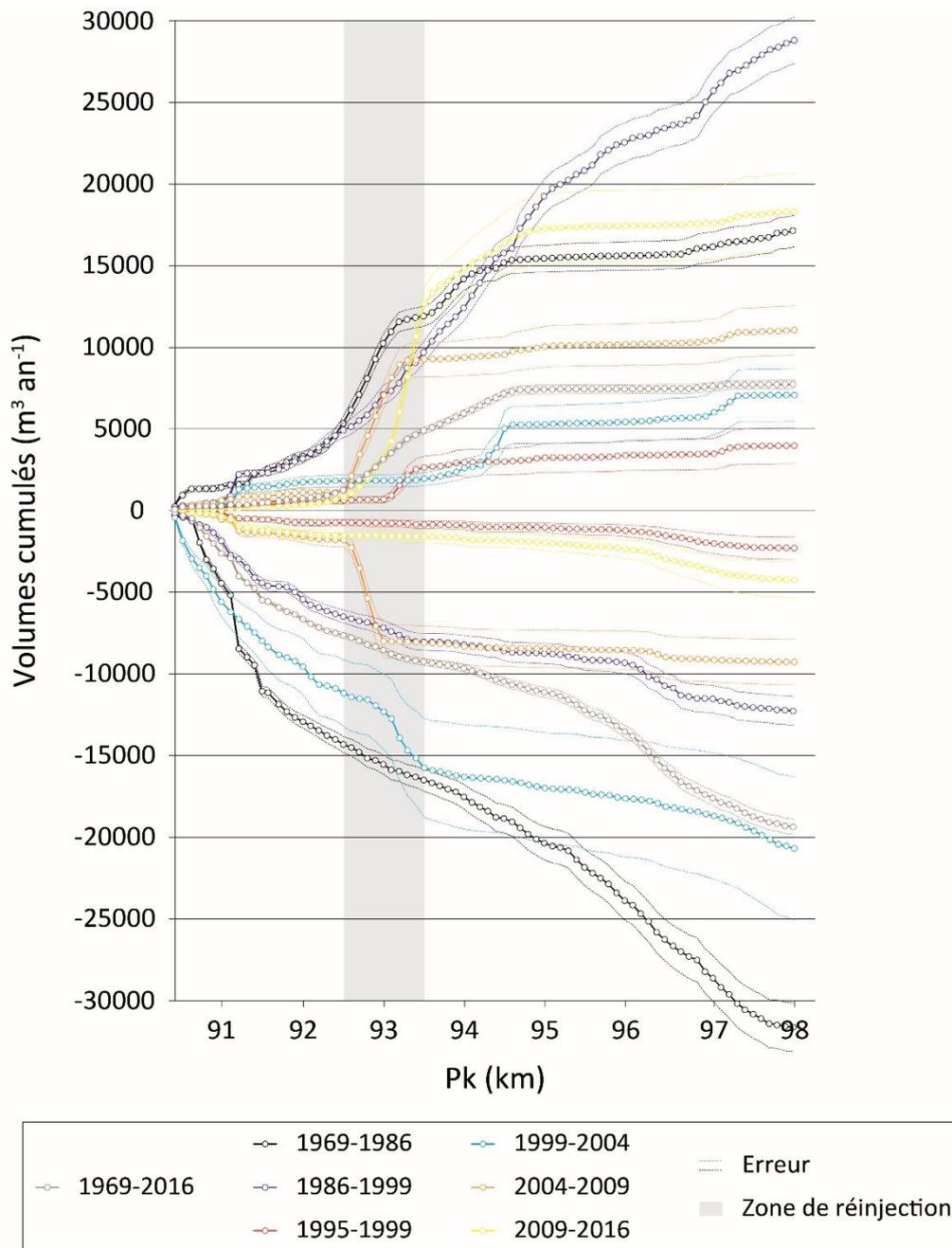


Figure 6 - Cumul des volumes érodés et déposés le long du réservoir pour les différentes périodes d'étude

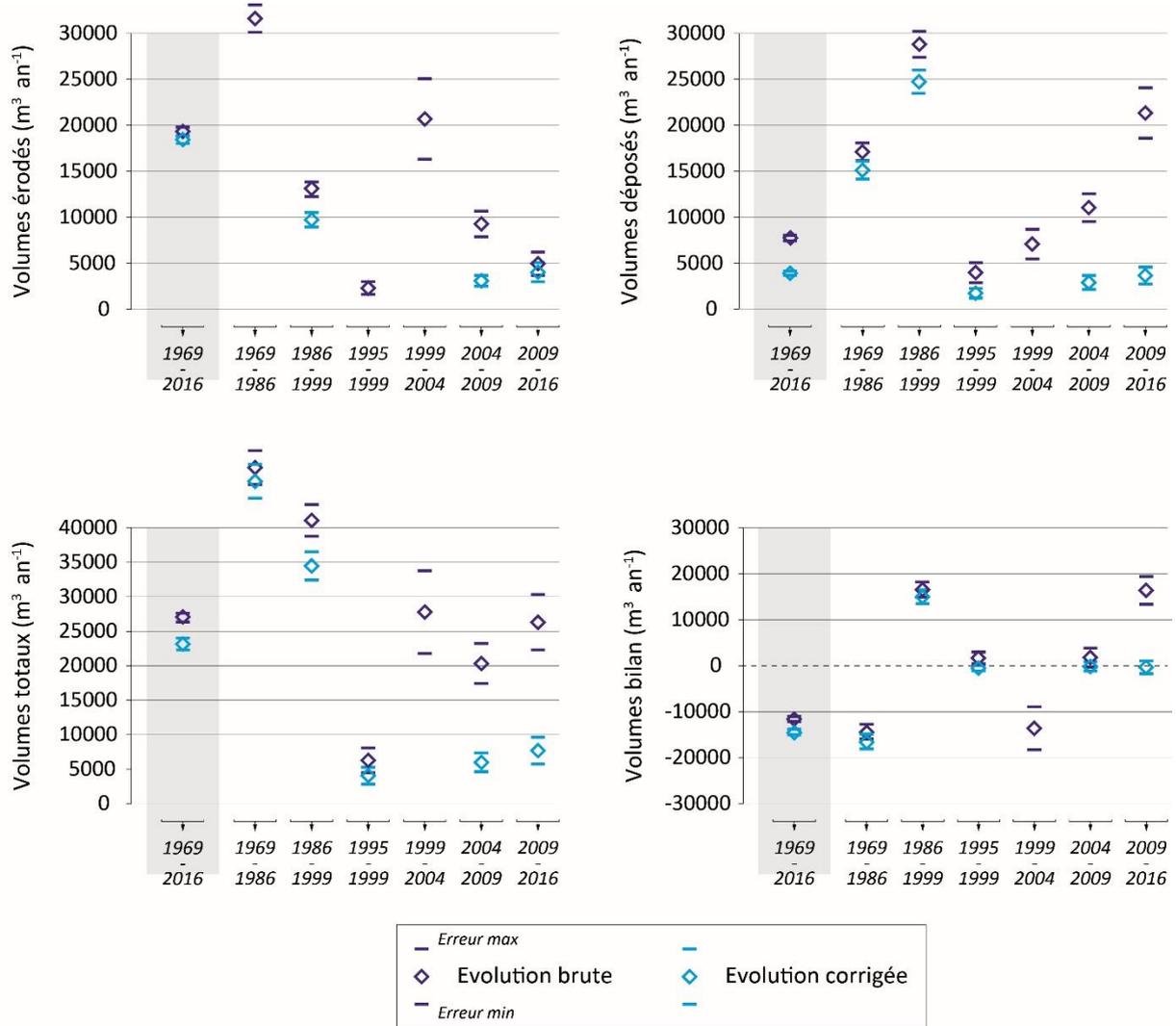


Figure 7 - Bilan sédimentaire pour chacune des périodes d'étude.

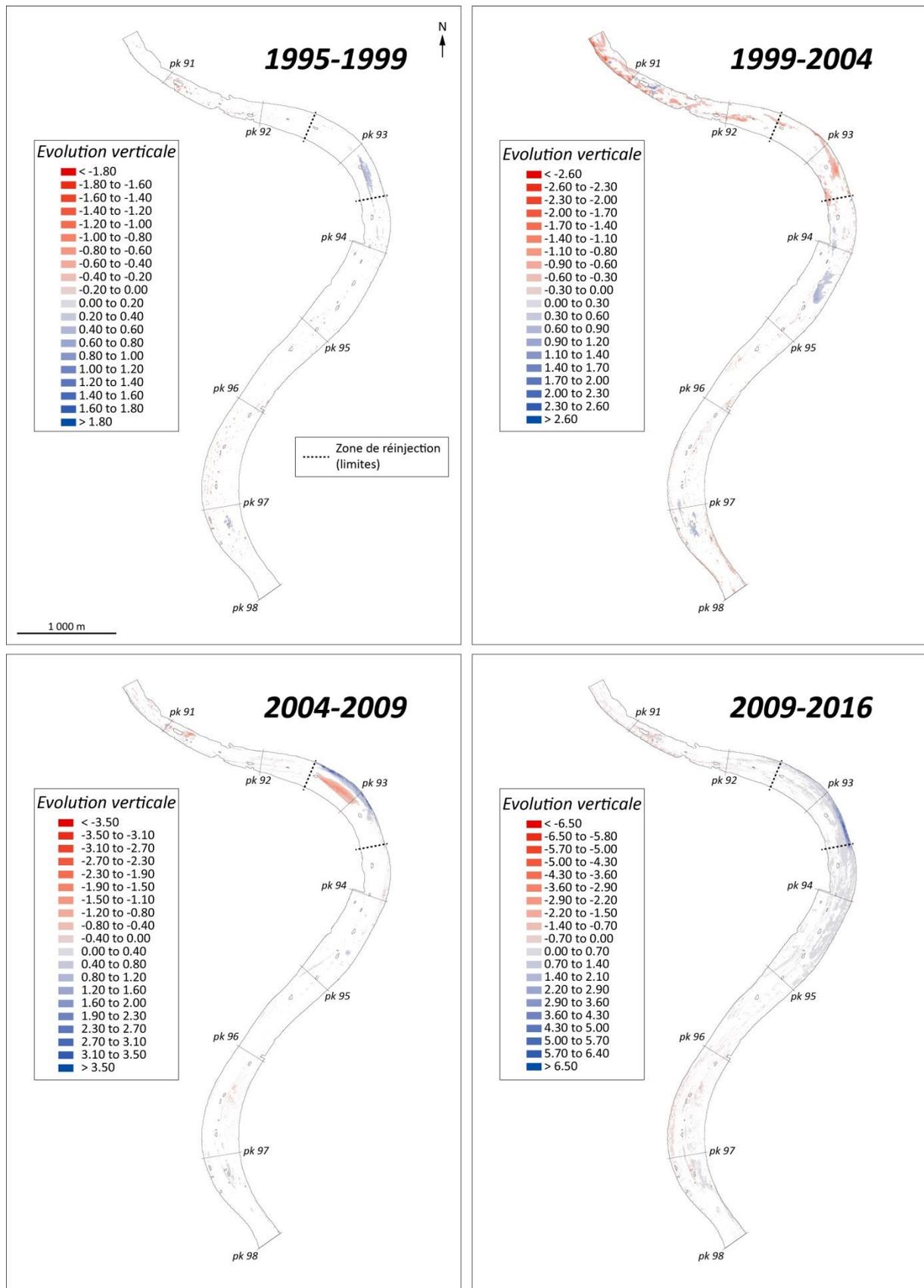


Figure 8 - Localisation et intensité des changements géomorphologiques obtenus par MNT différentiels entre 1995 et 2016.

Deux principaux types de périodes peuvent être distingués en matière d'intensité de l'activité morphologique et hydrologique. Le premier est caractérisé par des changements morphologiques relativement importants, un bilan déséquilibré et la survenue de crues peu fréquentes (une crue dont la période de retour est au moins égale à 35 ans : 1969-1986 = 35 ans, 1986-1999 = 82 ans, 1999-2004 = 68 ans ; et au moins une crue décennale). Parmi les trois périodes en question, 1986-1999 se démarque des deux autres puisque les dépôts y sont dominants. Pour le second type, les changements morphologiques sont mineurs et le débit maximal atteint est peu élevé (période de retour comprise entre 2 et 10 ans).

4.3 Granulométrie

4.3.1 Zones de curage et de réinjection

Dans la zone de curage, la granulométrie des deux échantillons volumétriques de subsurface est relativement similaire. De l'amont vers l'aval, Le D_{50} est égal à 28 et 31 mm, le D_{90} à 118 et 111 mm et la proportion de sables est de 29,6 et 33 % (Figure 9). Le D_{50} de surface obtenu à partir des quatre photographies aériennes est proche, bien que légèrement supérieur, de celui de subsurface (33 mm avec toutes les particules considérées, de 30 à 37 mm par photographie) (Figure 9). Le D_{90} est en revanche nettement plus faible (75 mm avec toutes les particules considérées, de 65 à 90 mm par photographie). Avec un D_{50} de 26 mm et un D_{90} de 63 mm (obtenu à partir des photographies subaquatiques), la granulométrie de surface au niveau de la zone de réinjection est un peu plus fine que dans la zone de curage (Figure 9).

La granulométrie obtenue par E. Parrot (2015) à partir des trois échantillons volumétriques indique un net gradient décroissant en direction de l'aval, ce qui reflète très probablement l'influence du barrage (Figure 9). Dans la zone de clapage, la granulométrie obtenue par volumétrie est bien plus grossière que celle obtenue par photographies : le D_{50} et le D_{90} s'élèvent respectivement à 22 mm et 132 mm pour la première et à 26 mm et 63 mm pour la seconde (Figure 9).

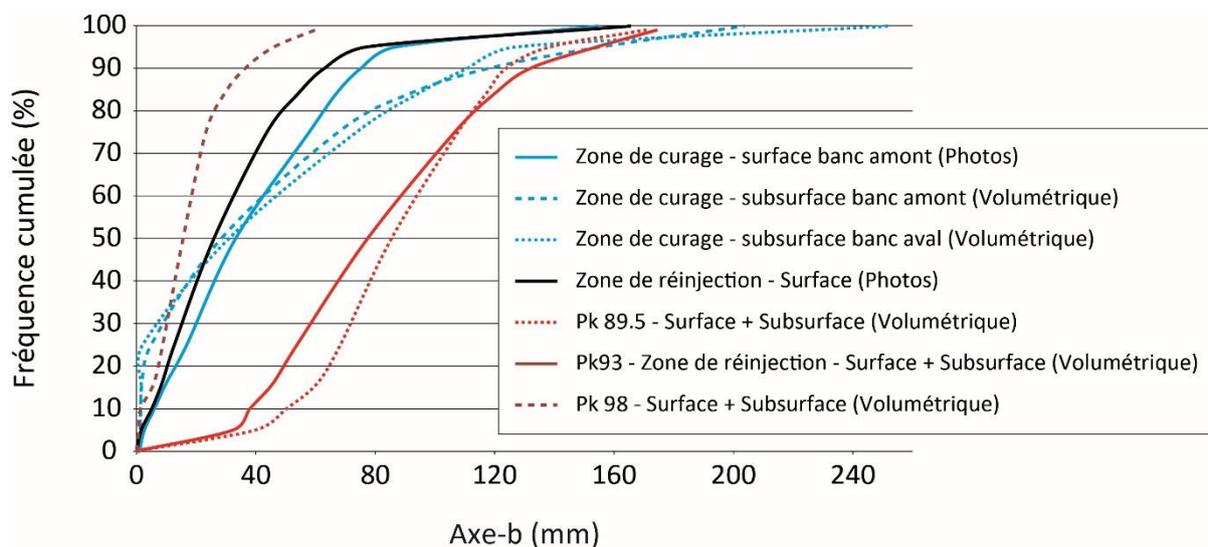


Figure 9 - Distribution de surface et de subsurface du Doux à son embouchure et du Rhône sur le secteur d'étude.

4.3.2 Comparaison entre zone de réinjection et secteurs environnants

Concernant le D_{50} (Figure 10), aucune différence statistiquement significative n'est détectée entre la zone de réinjection, et les secteurs situés en concavité à son amont et à son aval ou le secteur situé en convexité le long de la zone de réinjection (Mann-Whitney tests, p -value > 0.1). La situation est la même lorsqu'on compare les secteurs situés à l'amont et à l'aval de la zone de réinjection (avec toute la largeur du lit prise en compte).

En revanche, pour le D_{90} et pour le D_{50} des dix plus grandes particules (Figure 10), mais aussi lorsqu'on considère la totalité des particules ou encore la totalité des dix plus grandes particules (plutôt que le D_{50}), la zone de réinjection est significativement plus grossière (Mann-Whitney tests, p -value < 0.05). Le constat est identique pour ce qui concerne la comparaison entre secteurs situés à l'amont et à l'aval de la zone de réinjection (avec toute la largeur du lit prise en compte). Enfin, aucun gradient longitudinal ou latéral n'est détecté pour le D_{50} , le D_{90} ou le D_{50} des dix plus grandes particules.

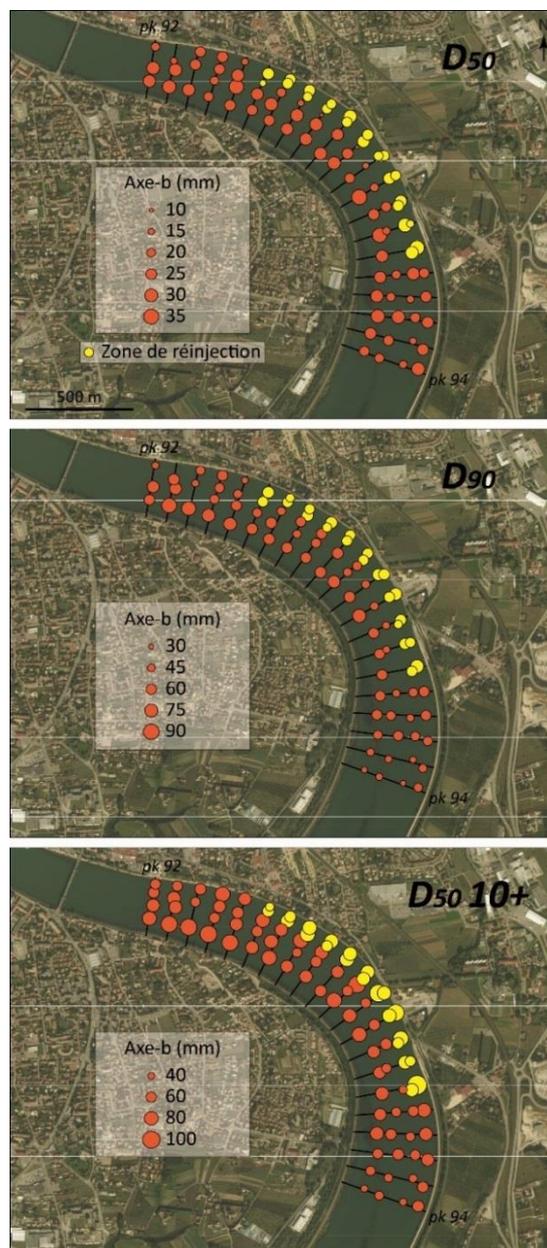


Figure 10 - Granulométrie de surface du Rhône dans la zone de réinjection et ses environs.

4.4 Modélisations hydrauliques et mobilité du lit

4.4.1 Mobilité du D₅₀

Fonctionnement classique

Pour des conditions classiques de fonctionnement de la retenue, pour un nombre critique de Shields de 0,06 et quelle que soit la granulométrie retenue, le D₅₀ n'est pas mobilisable sur la quasi-intégralité de la retenue (Figure 11). Pour une Q₂ et une Q₅₀, respectivement 0-0,3 % et 8,2-12,2 % de la superficie totale du réservoir pourraient être mobilisés (Figure 11). Avec un nombre critique de Shields de 0,03, le % de mobilité potentielle augmente nettement. Il atteint 2,2-8 % pour une Q₂ et 35,8-41,3 % pour une Q₅₀ (Figure 11). Par ailleurs, la mobilité à l'amont de la diversion est légèrement plus élevée avec la granulométrie G2 (Figure 11). La situation s'inverse dans la retenue court-circuitée, avec une mobilité supérieure pour G1.

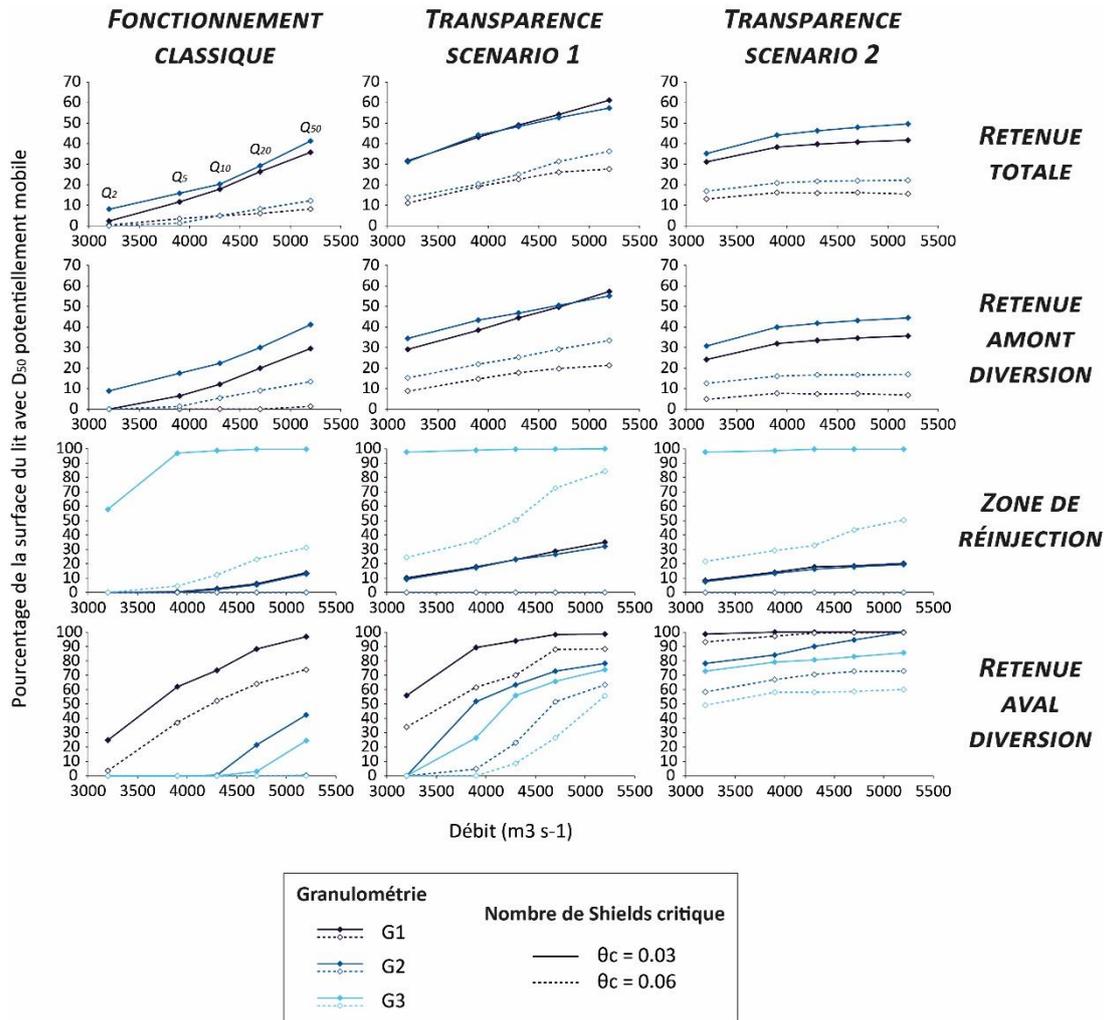


Figure 11 - Pourcentage de la surface du lit pour laquelle le D₅₀ pourrait être mobilisé.

D'un point de vue spatial, le réservoir à l'amont de la diversion peut être divisé en deux principaux tronçons, avec une limite approximativement située au pk 95,5 (Figure 12). A l'amont, la mobilité du D₅₀ est relativement faible, avec un pourcentage de largeur du lit mobilisable qui ne dépasse jamais 50 %. A l'aval, la mobilité est plus importante puisqu'elle peut concerner l'intégralité de la largeur du lit. Pour la granulométrie G1, caractérisée par une décroissance progressive et linéaire du D₅₀, le lit commence à être mobile à l'extrémité aval de la retenue. La part de la largeur du lit susceptible d'être

mobilisée augmente ensuite en direction de l'amont avec les débits. Pour la granulométrie G2, caractérisée par trois tronçons au sein desquels la granulométrie est constante, le D_{50} est tout d'abord mobilisé entre les pk 95,5 et 96,5 (Figure 12). A mesure que le débit augmente, la mobilité augmente en direction de l'aval. Dans la zone de réinjection, la plus forte mobilité est observée pour la granulométrie G3, avec la quasi-intégralité du lit mobile pour une Q_5 et un nombre critique de Shields de 0,03 (Figure 12). Pour les autres granulométries, la mobilité demeure faible quel que soit le débit. Il en va de même dans la retenue court-circuitée pour les granulométries G2 et G3.

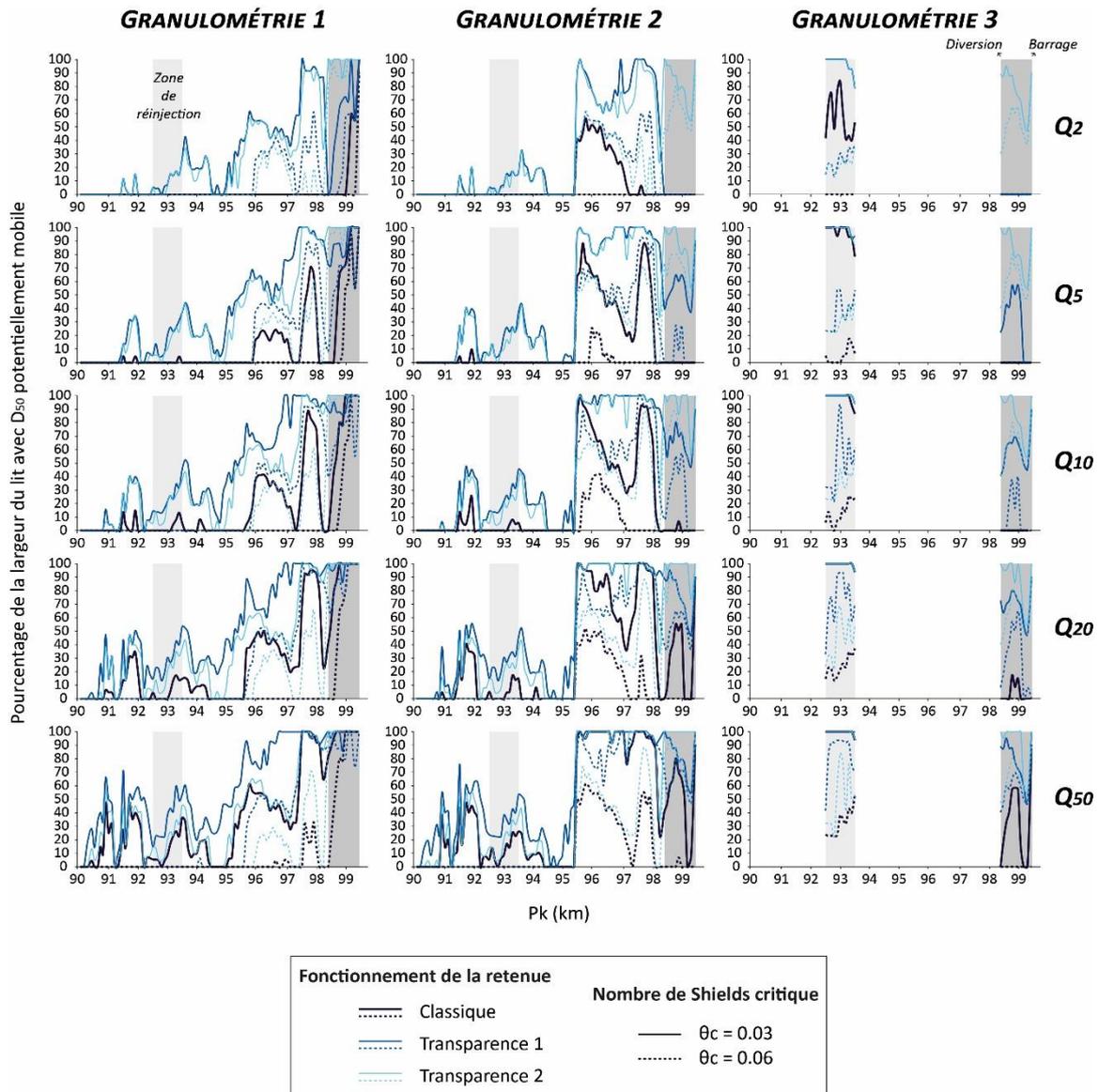


Figure 12 - Répartition longitudinale de la part de la largeur du lit pour laquelle le D_{50} pourrait être mobilisé.

Scénarios de transparence sédimentaire

Pour ces scénarios, le gain de mobilité du D_{50} comparativement aux observations faites en fonctionnement classique est relativement important. Le pourcentage de superficie du réservoir mobilisable pour une Q_{50} en fonctionnement classique est en effet atteint avec les scénarios de transparence sédimentaire pour des débits inférieurs à une Q_2 ou une Q_5 (Figure 11). La différence de

mobilité entre scénarios de transparence sédimentaire et fonctionnement classique tend néanmoins à décroître lorsque le débit augmente (Figure 11). Le gain le plus élevé est obtenu avec le scénario 1 (61,2 % de la superficie totale du réservoir contre 35,8 % en fonctionnement classique pour un nombre critique de Shields de 0,03 ; 27,6 % contre 8,2 % pour un nombre critique de Shields de 0,06). De plus, alors que pour le scénario 1, la mobilité augmente de façon quasi-linéaire avec le débit, elle n'augmente plus que très légèrement à partir de la Q_5 pour le scénario 2 (Figure 11). Enfin, à l'amont de la diversion, et de la même façon que pour le fonctionnement classique, la mobilité est légèrement plus importante avec la granulométrie G2, exception faite du scénario 1 pour la Q_{50} . La situation s'inverse dans la retenue court-circuitée avec une mobilité plus élevée pour le scénario 2 et la granulométrie G1.

Pour un nombre de Shields critique de 0,06, et quels que soient le scénario ou la granulométrie considérés, le D_{50} est mobilisable sur 8-16,7 % et sur 15,6-36,3 % de la superficie du réservoir pour une Q_2 et une Q_{50} , respectivement (Figure 11). Pour un nombre critique de Shields de 0,03, les valeurs s'élèvent à 31,2-35,2 % et 41,7-61,2 % (Figure 11).

Spatialement, et de la même façon que pour le fonctionnement normal, le réservoir à l'amont de la diversion peut être séparé en deux tronçons principaux, avec une limite située approximativement au pk 95,5 (Figure 12). Pour une Q_{50} et pour des conditions optimales de mobilisation (nombre critique de Shields de 0,03), la quasi-totalité du lit est mobile à l'aval du pk 95,5, et ce quelle que soit la granulométrie. A l'amont, la mobilité demeure partielle. Dans la zone de réinjection, la plus forte mobilité est observée pour la granulométrie G3, avec la presque intégralité du lit qui devient mobile avant la Q_2 (Figure 12). Pour les deux autres granulométries, la mobilité reste relativement faible pour tous les débits. Jusqu'à 60 % de la largeur de lit peut alors être mobile. Dans la retenue court-circuitée, la mobilité la plus faible se produit pour la granulométrie G3, avec au moins deux profils transversaux pour lesquels elle est inférieure à 60 %.

4.4.2 Taille maximale des particules exportables de la zone de réinjection et du réservoir

Fonctionnement classique

Quel que soit le débit simulé ou la granulométrie considérée, la compétence dans la retenue diminue vers l'aval, illustrant de façon évidente l'influence du barrage sur le transport de la charge de fond (Figure 13).

Dans la zone de réinjection, la compétence maximale est atteinte pour la Q_{50} et la granulométrie G2 (Figure 13). Elle s'étend de 75 mm (pk 92.8) à 110 mm (pk 93.4), ce qui correspond respectivement au D_{76} - D_{78} et au D_{89} - D_{90} des sédiments réinjectés (avec la granulométrie de subsurface du Doux considérée comme identique à la granulométrie du stock réinjecté). A l'extrémité aval de la zone de réinjection (pk 93,5), la compétence est égale à 99 mm, ce qui équivaut au D_{86} - D_{87} des sédiments réinjectés. Cela implique que pour un tel débit, au moins 13-14 % des sédiments réinjectés ne pourraient pas être remobilisés et donc transportés à l'aval de la zone de réinjection. Une part importante des sédiments mobilisables serait par ailleurs assez rapidement déposée puisque la compétence maximale diminue fortement à l'aval de la zone de réinjection : elle est de 79 mm (D_{78} - D_{80} des sédiments réinjectés) au pk 93,8, de 55 mm au pk 94,5 (D_{66} - D_{69} des sédiments réinjectés), et de 21 mm au pk 94,8 (D_{43} - D_{44} des sédiments réinjectés).

Dans la retenue court-circuitée, la compétence maximale est atteinte pour la Q_{50} et la granulométrie G3 (Figure 13). Elle est comprise entre 21 mm (pk 99) et 53 mm (pk 98,8), ce qui correspond respectivement D_{44} - D_{45} et au D_{65} - D_{68} des sédiments réinjectés. Cela signifie que pour ce débit, au moins 55-56 % des sédiments réinjectés dans le Rhône ne pourraient pas être exportés de la retenue.

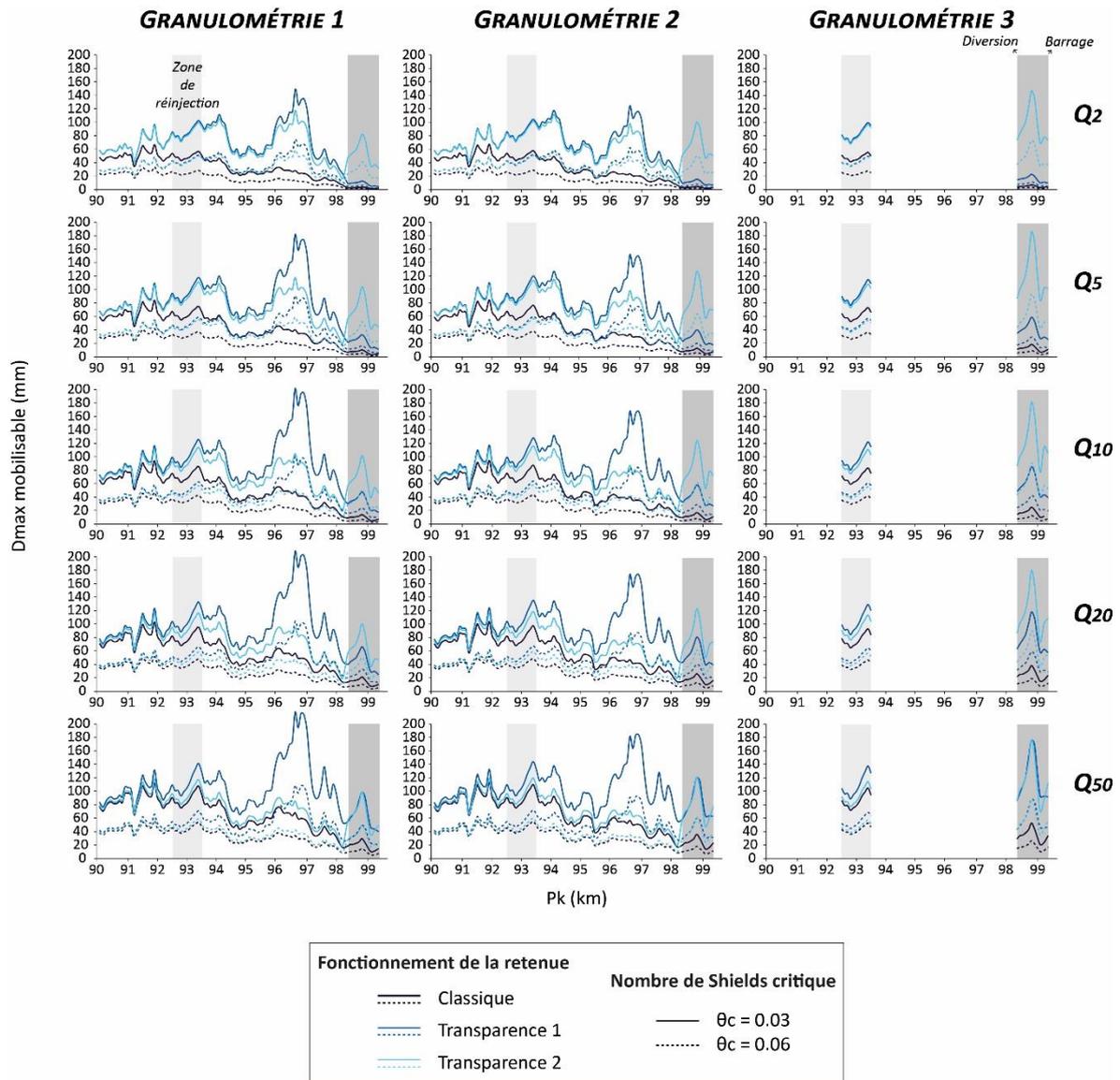


Figure 13 - Répartition longitudinale de compétence maximale.

Scénarios de transparence sédimentaire

Pour les scénarios de transparence retenus, la très nette décroissance aval de la compétence observée en condition de fonctionnement classique tend à s'atténuer, voire même à disparaître, et ce au moins jusqu'au pk 97 (Figure 13). Cette forte atténuation est plus marquée pour le scénario 1 (Figure 13). De plus, pour ce scénario, l'atténuation augmente avec le débit. En revanche, pour le scénario 2, l'atténuation diminue lorsque le débit augmente. Plus généralement, et comme attendu, les compétences maximales les plus élevées sont localisés au niveau des courbures, les plus faibles au niveau des sections rectilignes (Figure 13).

Pour la retenue à l'amont de la diversion, le scénario 1 présente les compétences maximales les plus élevées (Figure 13). De plus, la différence avec le scénario 2 augmente en direction de l'aval et avec le débit. Cela résulte de la plus forte pente de la ligne d'énergie pour le scénario 1. Dans la retenue court-circuitée, la compétence est largement supérieure pour le scénario 2. Cela est dû à la quasi-absence de diversion dans le canal pour ce scénario (débit résiduel de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La différence entre les deux scénarios diminue néanmoins lorsque le débit augmente. Alors que la compétence est de 5 à 7,7 fois supérieure pour le scénario 2 pour une Q_2 , elle est quasiment identique pour les deux scénarios pour une Q_{50} .

Enfin, l'effet de la granulométrie sur la compétence est relativement limité (Figure 13). A l'amont de la diversion, la différence de compétence entre G1 et G2 est très faible (ratio moyen G1/G2 = 1.04 +/- 0.1ET). Dans la zone de réinjection, la compétence maximale est obtenue avec G2, la minimale avec G3 (ratio moyen G1/G2 = 0.99 +/- 0.0084ET; ratio moyen G1/G3 = 1.04 +/- 0.0088ET; ratio moyen G2/G3 = 1.05). En revanche, dans la retenue court-circuitée, la différence de compétence en fonction des granulométries de référence est importante. Le maximum est atteint pour G3, le minimum pour G1 (ratio moyen G1/G2 = 0.8 +/- 0.093ET; ratio moyen G1/G3 = 0.55 +/- 0.064ET; ratio moyen G2/G3 = 0.68).

Dans la zone de réinjection, la compétence maximale est observée pour la Q_{50} , le scénario 1 et la granulométrie G2 (Figure 13). Elle s'étend de 93 mm (pk 92.8) à 144 mm (pk 93.4), ce qui équivaut respectivement au D_{84} - D_{85} and the D_{94} - D_{99} des sédiments réinjectés. A l'extrémité aval de la zone de réinjection (pk 93,5), la compétence s'élève à 133 mm, ce qui équivaut au D_{92} - D_{97} des sédiments réinjectés. Cela implique que pour un tel débit, la quasi-totalité du volume clapé pourrait être exporté à l'aval de la zone de réinjection. Cependant, au moins 20 % de ce volume réinjecté serait déposé sur le km aval, du fait de la forte diminution de la compétence maximale le long de ce tronçon : elle s'élève à 114 mm (D_{90} - D_{91} des sédiments réinjectés) au pk 94 et à 82 mm au pk 94,5 (D_{79} - D_{80} des sédiments réinjectés).

Dans la retenue court-circuitée, la compétence maximale est observée pour la Q_{50} , le scénario 1 et la granulométrie G3 (Figure 13). Elle est comprise entre 86 mm (pk98,3) et 177 mm (pk 98,8), ce qui correspond respectivement au D_{81} - D_{82} et au D_{97} - D_{max} des sédiments réinjectés. Pour les trois profils les plus à l'aval, elle est constante, avec une valeur de 92 mm, équivalente au D_{83} - D_{84} des sédiments réinjectés. Cela signifie qu'au mieux, un minimum de 16-17 % du volume réinjecté ne pourrait être exporté de la retenue. En comparaison du fonctionnement normal, le gain est important (x3), bien qu'insuffisant à l'exportation de la totalité du stock réinjecté.

5. Discussion

5.1 Dynamique morpho-sédimentaire de la retenue

La simple comparaison de l'altitude du thalweg entre 1897 et 2009 a permis de mettre clairement en évidence que la grande majorité des changements morphologiques survenus depuis la construction des aménagements Girardon se sont produits avant la mise en service de la retenue de Bourg-lès-Valence, en 1968 (Figure 5). La faiblesse des évolutions morphologiques depuis cette date signifie donc que le lit était alors pour l'essentiel ajusté aux conditions imposées par les aménagements Girardon et/ou que la création du barrage a fortement inhibé le potentiel d'ajustement du lit au niveau de la retenue. Si le barrage a joué un tel rôle, on devrait observer une nette diminution temporelle de l'intensité des

changements morphologiques pour des conditions hydrologiques similaires. La comparaison des volumes érodés entre les deux périodes les plus importantes en matière d'activité érosive (1969-1986 et 1999-2004) montre une telle évolution (Figure 6, Figure 7 et Figure 8), et ce en dépit d'une hydrologie relativement comparable. Pour 1969-1986 et 1999-2004, on observe en effet respectivement 15 et 10 jours avec un débit supérieur à la crue décennale, limite en-deçà de laquelle aucun changement morphologique significatif « d'ampleur » ne pourrait survenir dans la retenue. De plus, se sont produites pour chacune des deux périodes une crue de période de retour d'au moins 35 ans et au moins une crue décennale. Par ailleurs, alors que les volumes érodés entre 1969 et 1986 sont répartis de façon assez linéaire le long du réservoir, ceux de la période 1999-2004 diminuent en aval. Cela tendrait à renforcer l'idée que le secteur d'étude présentait une capacité de réajustement plus ou moins résiduelle au moment de l'achèvement du barrage. Si le bilan sédimentaire négatif entre 1969 et 2016 montre donc une tendance évidente à l'exportation de sédiments grossiers à l'aval de la bifurcation, les volumes en jeu s'avèrent néanmoins relativement faibles et les changements morphologiques marginaux. Enfin, pour les trois périodes caractérisées par une activité morphologique notable, une différence très nette doit être faite entre d'une part la période 1986-1999, au bilan sédimentaire largement positif, et d'autre part, les périodes 1969-1986 et 1999-2004, dominées par l'érosion (Figure 6, Figure 7 et Figure 8), et ce alors même que ces périodes présentent un comportement hydrologique très proche (survenue d'une crue de période de retour d'au moins 35 ans et d'au moins une crue décennale ; 15, 8 et 10 jours avec un débit supérieur à la crue décennale pour 1969-1986, 1986-1999 et 1999-2004, respectivement). Cela suggère que l'activité morphologique de la retenue ne serait pas seulement contrôlée par l'activité hydrologique, mais aussi par l'alimentation en sédiments grossiers.

Depuis la réinjection de sédiments grossiers entre 2012 et 2014, l'activité hydrologique, avec deux pics de crue biennale, aura été peu favorable à une remobilisation du stock réinjecté. Le bilan sédimentaire pour la période 2009-2016 indique néanmoins un très probable export de 24 % du volume initial avec dépôt le long des 1,5 km situés à l'aval de la zone de réinjection. Le long de l'ensemble de la zone de réinjection, les simulations indiquent quant à elles une gamme de compétence allant de 10 à 58 mm pour une Q_2 (avec prise en compte des trois granulométries et des deux valeurs du nombre critique de Shields). Ces valeurs sont équivalentes au D_{32-35} et au D_{64-67} de la granulométrie réinjectée. Cela signifie que pour un tel débit, au moins 32-35 % du volume réinjecté devrait être évacué de la zone de réinjection. Cette valeur est nettement supérieure aux 24 % indiqués par le bilan sédimentaire. Il s'agit en outre d'une probable sous-estimation : puisque les sédiments ont été récemment réinjectés, leur structure de surface présente très vraisemblablement un faible degré de compaction. Le nombre critique de Shields devrait donc être plus proche de 0,03 que de 0,06. Si les simulations sont fiables, ces résultats indiquent que les deux crues biennales auront été trop courtes pour que l'intégralité du volume exportable puisse être transportée à l'aval de la zone de réinjection. Dans le cas contraire, cela signifie que les simulations surestiment la mobilité potentielle du lit. Quoi qu'il en soit, cela met en lumière une des principales limites de notre approche basée sur les simulations, à savoir la non prise en considération de la dimension temporelle dans l'estimation des volumes susceptible d'être charriés.

5.2 Continuité de la charge de fond

Puisque les bilans sédimentaires ont été établis pour la retenue à l'amont de la bifurcation, les évolutions survenues dans la portion court-circuitée de cette dernière (pk 98-99.35) n'ont pu être caractérisées. Au moins une partie des sédiments grossiers (> sables) exportés à l'aval de la bifurcation auraient donc pu se déposer entre cette dernière et le barrage de la Roche-de-Glun. En raison de la présence d'un seuil de fond à l'entrée du canal d'amenée, la charge de fond est théoriquement dérivée

en intégralité vers la section court-circuitée du réservoir. Le bilan sédimentaire calculé pour la retenue court-circuitée (pk 98-99,2) entre 1969 et 2011 (MNT différentiel obtenu à partir de données bathymétriques disponibles le long de profils transversaux espacés de 100 m) indique un stockage de 312000 m³ (évolution brute) ou de 268000 m³ (+/- 88400) (évolution corrigée obtenue en appliquant une erreur uniforme de 0,81 m calculée en appliquant l'Eq.3 ; l'erreur de mesure est indiquée dans le Tableau 1 et l'erreur d'interpolation a été arbitrairement fixée à 0,2 m). En raison de l'absence de données, les évolutions survenues le long des 100 mètres situés à l'extrémité aval de la section (pk 99.2-99.35) n'ont pas été quantifiées. En considérant que les volumes déposés sont ici similaires à ceux de la section de 100 mètres de long située à l'amont immédiat (évolution brute = 101000 m³, évolution corrigée = 96800 m³ (+/- 18800)), le volume total déposé dans la section court-circuitée de la retenue a été réévalué. Il s'élève ainsi à 413200 m³ (évolution brute) ou à 364700 m³ (+/-107200) (évolution corrigée), ce qui correspond à respectivement 9800 m³ an⁻¹ et 8700 m³ an⁻¹ (+/- 2600). Ces valeurs sont nettement inférieures aux 14600 m³ an⁻¹ exportés à l'aval de la bifurcation pour la période 1969-2016. Cela signifie que le bilan sédimentaire pour la totalité de la retenue serait nettement négatif, avec un export de sédiments grossiers égal à au moins 4800-5900 m³ an⁻¹. Il s'agirait en outre d'une sous-estimation puisque la grande majorité du matériel déposé dans la retenue court-circuitée est très vraisemblablement composée de sédiments fins (limons et sables) qui doivent être exclus du bilan sédimentaire (EGR, 2001). Ces dépôts de MES dans la retenue court-circuitée peuvent s'expliquer par i) la forte diminution de la pente de la ligne d'eau (pour une Q₂, 0.19 ‰ à l'amont de la diversion, 0.017 ‰ à l'aval; pour une Q₅₀, 0.36 ‰ à l'amont de la diversion, 0.26 ‰ à l'aval), ii) l'élargissement marqué du lit le long des 500 m aval de la retenue (x2 par rapport à l'amont), iii) la mise en place d'une recirculation latérale des écoulements sur la moitié droite du chenal liée à la faible emprise du barrage, qui n'occupe que 34 % de la largeur du lit, et à sa position en rive gauche du lit (Figure 14). La plupart de ces sédiments se sont déposés avant 1986 (avec les évolutions brutes, 68 % du total ont été déposés lors la période 1969-1986, 18 % pour 1986-2001, 14 % pour 2001-2011 ; avec les évolutions corrigées, 83 % du total ont été déposés lors la période 1969-1986, 16 % pour 1986-2001, 1 % pour 2001-2011 (Figure 14).

La quantification des changements morphologiques à l'aval du barrage permet également de confirmer le maintien au moins partiel de la continuité sédimentaire. Le Vieux Rhône entre le barrage de la Roche-de-Glun et la confluence avec l'Isère a fait l'objet d'extractions très importantes jusqu'en 1992. Un recensement récent des volumes prélevés ayant été autorisés indique un retrait de 1409000 m³ (+ 56000 m³ pour lesquels un doute subsiste) (Cœur, 2017). Le bilan sédimentaire (MNT différentiel obtenu à partir de données bathymétriques disponibles le long de profils transversaux espacés de 100 m) pour la période 1969-1992 fournit des volumes érodés similaires : 1401400 m³ pour l'évolution brute et 1329400 m³ (+/- 312400) pour l'évolution corrigée (Figure 15). Ces extractions ont notamment créé un chapelet de quatre profondes fosses (avec un abaissement maximal du lit de 8, 11, 4,5 et 4,5 m de l'amont vers l'aval) (Figure 15). En supposant que l'essentiel, si ce n'est la totalité, de la charge de fond passant le barrage s'accumule au niveau de la fosse amont, ce qui semble être confirmé par l'indigence des dépôts au niveau des fosses situées plus à l'aval, il est possible d'estimer a minima le volume de sédiments charriés en provenance de la retenue. Pour la période 1992-2013, le bilan sédimentaire au niveau de cette fosse amont indique une accumulation, et donc un export de la retenue, compris entre 2800 m³ an⁻¹ (+/- 1000) (évolution corrigée) et 3300 m³ an⁻¹ (évolution brute), en considérant que tous les sédiments déposés dans la fosse proviennent de l'amont du barrage. Si l'on supprime les volumes érodés entre le barrage et la fosse, les valeurs s'élèvent à 2000 m³ an⁻¹ (évolution brute) et 2400 m³ an⁻¹ (+/- 600) (évolution corrigée).

Au final, nous retiendrons que les volumes de sédiments grossiers exportés de la retenue peuvent être raisonnablement estimés dans une fourchette comprise entre 2000 et 14600 m³ an⁻¹. Ces valeurs sont assez proches, bien que supérieures, de celles fournies par Cortier et Couvert (2001) (1600 m³ an⁻¹). Elles sont entre 8 et 57 fois inférieures à l'estimation des volumes charriés sur le secteur avant aménagements (114000 m³ an⁻¹) proposée par ces mêmes auteurs.

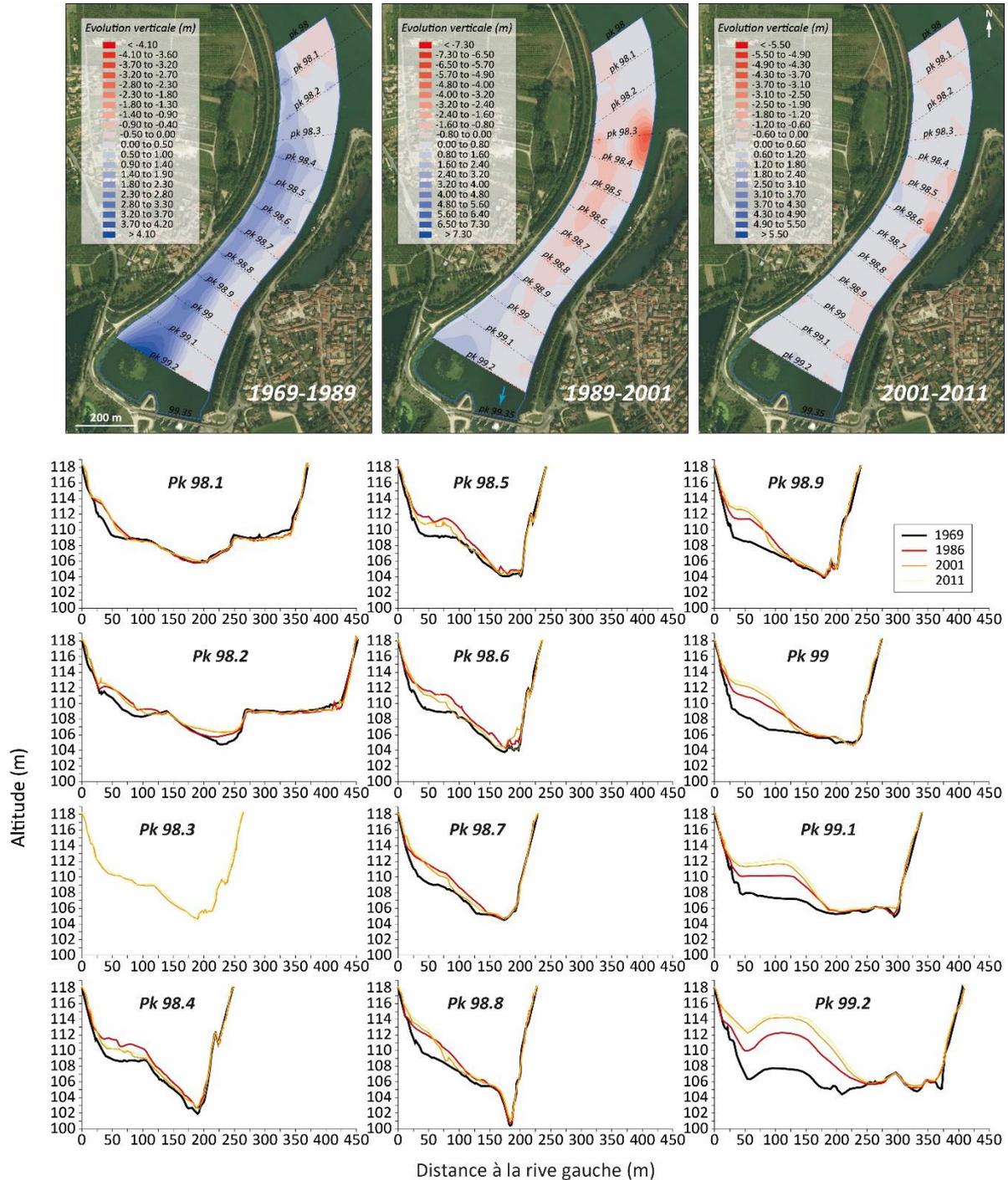


Figure 14 - Evolution morphologique du réservoir dans sa partie court-circuitée.

La taille maximale des particules pouvant être exportées de la retenue, telle qu'indiquée par les simulations hydrauliques, est relativement faible : 3-5 mm pour une Q₂ et 21 mm pour une Q₅₀ (avec la

granulométrie G3). Ces estimations sont basées sur un nombre critique de Shields de 0,03, soit pour une faible compaction des sédiments composant la couche de surface, théoriquement caractéristique de fréquences de mobilisations élevées. Pourtant, il est raisonnable de penser que ces valeurs sont surestimées du fait d'un probable pavage du lit par vannage aval des particules. Ce pavage, probablement déjà au moins partiellement en place au moment de la création de la retenue, résulterait de la forte réduction de l'alimentation en sédiments grossiers, débutée au milieu du XIXe siècle en réponse à la chenalisation du lit et au tarissement des apports des affluents (reboisement des versants, travaux de correction torrentielle, construction de grands barrages et de protections de berges, contrôle des apports au Rhône...).

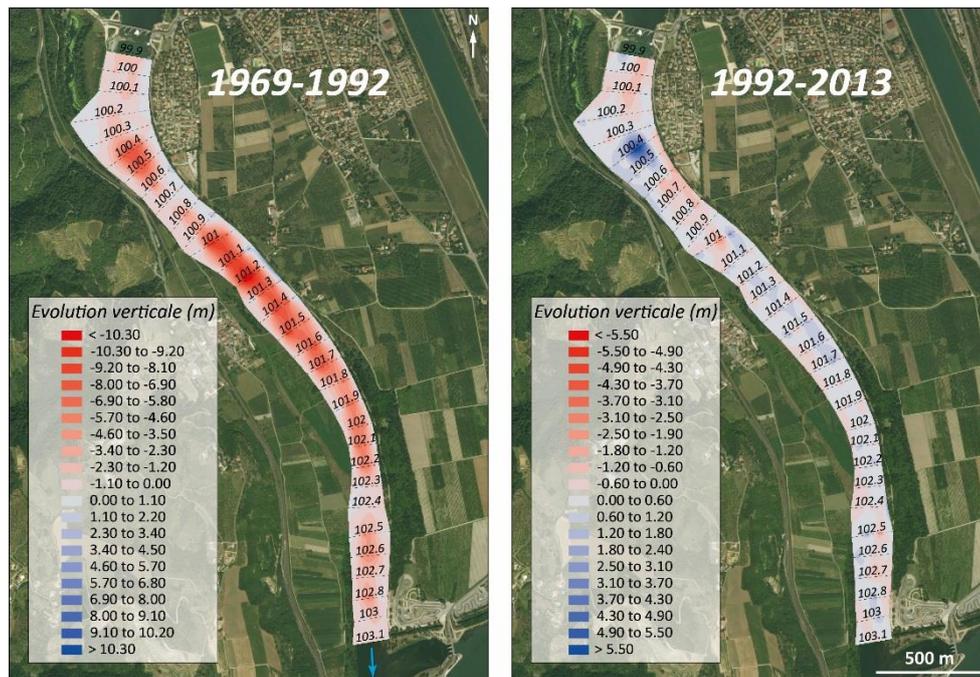


Figure 15 - Evolution morphologique du Rhône court-circuité entre le barrage de la Roche-de-Glun et la confluence avec l'Isère.

5.3 Biais et limites associés aux bilans sédimentaires et aux simulations hydrauliques

L'erreur associée aux bilans sédimentaires obtenus à partir des profils est largement plus faible que celle associée aux bilans établis à partir des semis de points (Figure 6 et Figure 7). Cela devrait pourtant être le contraire puisque la géométrie du lit est décrite de façon bien moins précise avec les profils transversaux espacés de 100 m qu'avec les semis présentant une densité de points assez élevée (entre 1 et 4,5 pts m⁻²). L'erreur associée aux bilans par profils est donc fortement sous-estimée. Cela résulte principalement de l'incapacité de notre méthode à rendre compte de l'incertitude liée à l'interpolation entre profils adjacents.

Il existe par ailleurs une différence importante entre les deux types de bilans concernant la façon dont ont été prises en compte les différences d'altitude entre deux dates. Pour les bilans par semis, les volumes érodés et déposés proposés correspondent à des valeurs corrigées puisque les différences d'altitudes inférieures au seuil de détection ont été écartées de l'analyse. Pour les bilans par profils, les volumes érodés et déposés proposés correspondent à des valeurs non corrigées dans la mesure où toutes les différences d'altitude sont conservées.

Enfin, la comparaison entre les deux types de bilans doit être interprétée avec précaution dans la mesure où l'incertitude relative à la précision planimétrique des mesures bathymétriques n'a pas été considérée. Si cette incertitude est très faible et peut donc être considérée comme négligeable pour les semis (mesures réalisées au DGPS), ce n'est pas le cas pour les profils de 1969 et 1986.

Les simulations et les MNT différentiels montrent une répartition spatiale de la mobilité du lit fortement divergente. Avec les simulations, la moitié aval de la retenue (à partir du pk 95,5) est la plus mobile (pourcentage de la largeur du lit pour lequel le D_{50} est potentiellement mobile). Avec les MNT différentiels, servant ici de données de validation, la situation est inverse : l'essentiel de l'érosion est localisée à l'amont du pk 93,5 (Figure 6, Figure 7 et Figure 8). La faible fiabilité de la caractérisation de la mobilité du lit obtenue à partir des simulations résulte d'une série d'incertitudes difficilement quantifiables relatives à l'estimation de la contrainte efficace et de la contrainte efficace critique. Cela tient avant tout à notre incapacité à déterminer de façon suffisamment précise la granulométrie du lit et sa variabilité spatio-temporelle. Tout d'abord, il est possible que les granulométries anciennes, en particulier dans les zones remaniées, aient été différentes des granulométries récentes, à partir desquelles nous raisonnons ici. Ensuite, la variabilité spatiale est très approximativement décrite puisque pour l'intégralité du linéaire du réservoir, seules trois valeurs ponctuelles obtenues par échantillonnages volumétriques ont été utilisées. La résolution spatiale de la granulométrie de surface est un peu meilleure au niveau de la zone de réinjection où, pour chaque profil transversal, une valeur moyenne de D_{50} et de D_{90} a été déterminée à partir de quatre à cinq photographies (granulométrie G3). Ces méthodes s'avèrent trop peu performantes dans l'optique d'une caractérisation de la granulométrie à résolution spatiale fine sur des sections de rivières présentant une superficie importante. Un tel objectif ne pourrait être atteint qu'à travers de nouveaux développements méthodologiques. La voie la plus prometteuse en la matière se rapporte à l'acquisition et l'exploitation de données acoustiques (Amiri-Simkooei et al., 2009; Buscombe et al., 2014a, 2014b).

Par ailleurs, la granulométrie du Rhône obtenue à partir des échantillons volumétriques ou des photographies est plus ou moins approximative. Dans la zone de réinjection, la granulométrie obtenue par échantillonnage volumétrique en 2012 (D_b) et celle tirée des photographies réalisées en 2016-2017 (D_p) devraient être similaires. Pourtant, alors que le D_{50} et le D_{90} pour la première sont respectivement de 77 mm et 132 mm, ils s'élèvent à 26 mm et 63 mm pour la seconde. Trois facteurs peuvent expliquer de tels écarts. Tout d'abord, D_b est très probablement surestimé car la masse de la particule la plus grossière (au moins 4,3 kg si l'on se réfère à la particule la plus lourde échantillonnée au niveau de la zone de curage) excède de loin le critère de 1 % de la masse totale de l'échantillon devant être respecté pour obtenir un D_{50} non biaisé (Church et al., 1987). Ce problème concerne aussi l'échantillon amont (pk 89,5). Ensuite, la granulométrie obtenue à partir des photographies est possiblement un peu sous-estimée du fait d'une dimension de scène trop petite par rapport à la taille des plus grandes particules. Assez fréquemment, seule une portion de ces dernières était apparente et pouvait donc être mesurée. Cependant, cela impacterait essentiellement les percentiles supérieurs. Enfin, l'intégralité de la distribution granulométrique tirée des photographies tendrait également à être sous-estimée car les particules à mesurer sont la plupart du temps en partie masquées par celles environnantes et car leur axe-b réel est rarement horizontal (Bunte et al., 2001).

L'incertitude relative à la détermination du nombre critique de Shields provient également du manque d'informations sur l'état de structuration de la couche de surface du lit et sur sa variabilité spatiale. Si le lit était probablement pavé au moment de la création de la retenue, et sûrement plus encore aujourd'hui, il demeure impossible de quantifier ce paramètre de façon fiable et précise. Nous nous

sommes donc contentés de recourir à deux valeurs extrêmes (0,03 et 0,06), en les appliquant de façon uniforme sur toute la retenue.

Par ailleurs, pour ce qui concerne la proportion du volume initialement réinjecté susceptible d'être évacuée de la zone de réinjection ou de la retenue, il ne doit pas être perdu de vue que les estimations proposées sont très probablement au moins un peu surestimées. Elles sont effet basées sur la compétence maximale, fourni en un point donné des profils situés à l'aval de chacune de ses zones. Le long de chacun de ces profils ou à leur amont, la compétence est évidemment plus faible.

Pour finir, les résultats portant sur les scénarios de transparence sédimentaire doivent être considérés avec précaution. Les lignes d'eau sur la partie aval du réservoir sont en effet bien plus basses que celles pour lequel le modèle a été calibré.

5.4 Implications en matière de gestion de la charge de fond

D'un point de vue opérationnel, deux contraintes principales sont associées à une poursuite des opérations de réinjections. Tout d'abord, un tirant d'eau minimal de trois mètres par rapport à la ligne d'eau de référence doit être assuré pour garantir la navigation sur le fleuve. Ensuite, les réinjections ne doivent pas engendrer une augmentation de la fréquence de débordement. Les considérations développées ci-dessous porteront principalement sur le premier point. Le second nécessiterait la réalisation d'analyses qui dépassent largement le cadre de la problématique ici traitée.

En 2016, après exportation de 24 % du volume initialement réinjecté, le tirant d'eau dans la zone de clapage est compris entre 3,4 et 4,4 m. Il est donc à peine supérieur à la limite autorisée. En l'absence de remobilisations ultérieures, de futures réinjections dans cette zone sont donc à proscrire. Les investigations réalisées ici ont permis de mettre en évidence qu'une part importante du volume réinjecté pourrait être exportée pour des crues relativement fréquentes. Pour une crue quinquennale, les simulations indiquent qu'au mieux 72-76 % du stock initial pourraient être exportés de la zone de clapage. 55-60 % du volume total serait ensuite déposé le long du km situé immédiatement à l'aval. En raison des nombreuses incertitudes précédemment évoquées mais aussi du fait de la non prise en compte de la dimension temporelle dans nos analyses, il demeure impossible d'anticiper précisément sur les volumes susceptibles d'être évacués pour une crue donnée. Afin de mieux comprendre et prévoir les effets de crues de durées et de périodes de retour variées sur la redistribution de ce stock, des relevés bathymétriques de la zone de clapage et du tronçon situé 1,5-2 km à son aval devraient être systématiquement entrepris à la suite de chaque crue disposant d'une période de retour supérieure à 2 ans. Dans l'optique d'une pérennisation des opérations de réinjection dans le réservoir, assurer ce type de suivi constitue un prérequis indispensable à la définition d'une stratégie adaptée.

De nouvelles réinjections pourraient être entreprises dans la zone actuelle de clapage à la seule condition d'un remaniement préalable du stock résiduel. Les volumes réinjectés ne devraient alors pas excéder les volumes évacués. En l'absence de remobilisation, deux solutions, combinées ou non, peuvent être envisagées. Tout d'abord, les réinjections pourraient être effectuées par saupoudrages successifs du lit en direction de l'aval. L'épaisseur de la couche réinjectée devrait être telle que le tirant d'eau par rapport à la ligne d'eau de référence demeure supérieur à 4-5 m. Les réinjections pourraient aussi être directement pratiquées dans la retenue court-circuitée, c'est-à-dire entre la diversion et le barrage de la Roche-de-Glun, où la navigation commerciale est prohibée. Une telle procédure présente l'avantage de réduire au maximum la distance que la charge de fond aurait à parcourir avant évacuation

de la retenue. Cette option n'est cependant viable qu'à court terme car les volumes initiaux disponibles sont relativement réduits (sensiblement les mêmes que dans la zone actuelle de clapage) et la compétence observée ici est la plus faible de la retenue. Cela limite de fait les volumes de sédiments exportables et donc les volumes pouvant être à nouveau réinjectés. Au mieux, 34-36 % du volume clapé entre 2012 et 2014 pourraient être exportés pour une crue quinquennale. Pour une crue cinquantennale, les valeurs atteignent 53-68 %. En outre, la surface de la section mouillée est ici relativement réduite. Sa diminution impliquerait localement une possible augmentation locale de la fréquence de débordement. La seconde solution implique la mise en œuvre de scénarios de transparence sédimentaire. Le scénario 1 apparaît comme le plus efficace. Il est aussi le moins cher et le plus simple à mettre en œuvre puisque les débits dérivés dans le canal ne sont pas modifiés. Pour une crue quinquennale, 88-89 % et 79-81 % du volume réinjecté pourrait être respectivement exporté de la zone actuelle de clapage et de la retenue (92-97 % et 83-84 % pour une crue cinquantennale). Cette solution présente néanmoins deux inconvénients potentiels majeurs : une forte diminution de la compétence dans le Vieux Rhône à l'aval immédiat du barrage, et, localement, une possible trop forte augmentation des vitesses dans le canal.

Quelle que soit l'évolution à venir du stock déjà réinjecté et la stratégie adoptée quant à de futures clapages, la réinjection de sables dans la retenue pourra se poursuivre puisque les sables grossiers peuvent être exportés pour des crues biennales. La répétition de ce type d'opérations présente néanmoins un risque potentiel de colmatage du substrat par les fines qui pourrait être particulièrement préjudiciable aux habitats benthiques.

Sur certains des secteurs en dérivation du Rhône (Péage-de-Roussillon, Donzère-Mondragon, ...), le démantèlement des aménagements Girardon devrait permettre localement une ré-érosion des berges. Cela aura pour conséquence une augmentation de l'alimentation du fleuve en sédiments grossiers et la restauration d'un transport solide grossier. Une des principales questions scientifiques et opérationnelles découlant de ces travaux porte sur le devenir de ces sources additionnelles de sédiments et sur la possibilité d'un rétablissement de la continuité sédimentaire entre secteurs court-circuités et réservoirs, et le cas échéant, entre réservoirs et secteurs court-circuités. L'échelle spatiale à laquelle la gestion de ces sédiments réinjectés doit être pensée dépend directement du degré de continuité sédimentaire entre ces différents compartiments du système. Pour la retenue de Bourg-lès-Valence, cette étude a permis de mettre en évidence qu'en l'absence de scénarios de transparence, la taille maximale des particules exportables du réservoir pour une Q_{50} serait inférieure aux graviers grossiers (21 mm). De plus, aucun gravier ne pourrait être évacué pour des crues inférieures à la biennale. En faisant l'hypothèse d'une compétence similaire dans les autres retenues du Rhône, cela signifie que du point de vue de la fraction grossière de la charge de fond, chaque secteur composé d'une section court-circuitée et du réservoir situé à son aval immédiat devrait être considéré comme indépendant des secteurs environnants. En fonction de la taille des grains considérée, la gestion de la charge de fond devrait donc probablement être pensée à des échelles spatiales différentes : très schématiquement, l'échelle du secteur pour les particules allant des graviers moyens aux galets, l'échelle du corridor fluvial pour les sables grossiers et les graviers fins. Anticiper sur la redistribution aval des sédiments réinjectés nécessiterait de connaître la taille de ces derniers ainsi que le gradient longitudinal de la compétence du secteur s'étendant du tronçon court-circuité ayant fait l'objet de travaux favorisant les ré-érosions, au barrage de la retenue aval. Il nécessite aussi de considérer que le fonctionnement des ouvrages tel qu'il existe aujourd'hui est très limitant pour permettre une continuité sédimentaire.

La réalimentation des tronçons court-circuités du Rhône en sédiments grossiers (avec dans l'idéal une injection localisée à leur amont), et ce quel que soit l'origine de ces derniers (érosion latérale ou apports artificiels), a pour objectif de favoriser la diversification des habitats aquatiques et riverains sur

le long terme et sur un linéaire le plus étendu possible. La très probable absence de continuité sédimentaire dans les retenues pour les particules les plus grossières, et possiblement pour la fraction supérieure aux sables, induit de potentiels effets indésirables qu'il convient de considérer dans les stratégies de gestion à venir. Des solutions fondées sur les processus, et élaborées conjointement avec les partenaires dans le cadre d'un schéma de gestion sédimentaire qui soit pensé dans une perspective pluri-annuelle et sur tout le continuum, peuvent permettre de concilier à la fois les objectifs de maximisation des bénéfices écologiques visés par les opérations de restauration, et la prise en compte des contraintes d'exploitation de l'hydro-électricité et de la navigation.

6. Conclusion

Les investigations réalisées dans la retenue de Bourg-lès-Valence ont permis de mettre en évidence la faible capacité d'ajustement morphologique du secteur et la fragmentation du continuum limitant toute continuité sédimentaire. L'exportation à l'aval de la retenue de la totalité du stock sédimentaire réinjecté depuis le Doux semble peu probable. Des simulations de chasse indiquent qu'au moins 15-20 % de ce stock resterait piégé dans le réservoir pour une crue cinquantennale. Les réinjections de matériel grossier (> sable) dans la retenue à des fins de recharge sédimentaire d'un continuum fluvial s'entendant au-delà du réservoir lui-même sont donc vraisemblablement peu pertinentes. De façon plus générale, et dans la mesure où les conditions de transport sur ce secteur sont probablement similaires à celles rencontrées dans la majorité des autres retenues du Rhône, espérer un rétablissement de la continuité sédimentaire pour l'intégralité du spectre granulométrique caractérisant le fond du lit du Rhône et notamment pour les galets et les graviers apparaît peu réaliste sans modification des règles actuelles de gestion des ouvrages. Par ailleurs, accroître la robustesse des résultats tirés du modèle hydraulique 1D en matière de transport solide passe par une amélioration des connaissances relatives à la granulométrie du lit (méthodes d'acquisition, procédures de traitement, fiabilité des résultats, emprises spatiales caractérisées). Les suivis bathymétriques sont une source essentielle de données pour valider les simulations et il est donc très important de les poursuivre.

Liste des références

Amiri-Simkooei A., Snellen M., Simons D.G., 2009. Riverbed sediment classification using multi-beam echo-sounder backscatter data. *J. Acoust. Soc. Am.* 126 (4), 1724-1738.

Buscombe D., Grams P. E., Kaplinski M. A., 2014a. Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 1. Spectral properties of scattering. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119.

Buscombe D., Grams P. E., Kaplinski M. A., 2014b. Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 2. Scattering signatures of Colorado River bed sediment in Marble and Grand Canyons. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119.

Church M.A., McLean D.G., Wolcott, J.F., 1987. Riverbed gravels: sampling and analysis. In: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers* (Ed. Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D.), Wiley, New York, pp. 43-88.

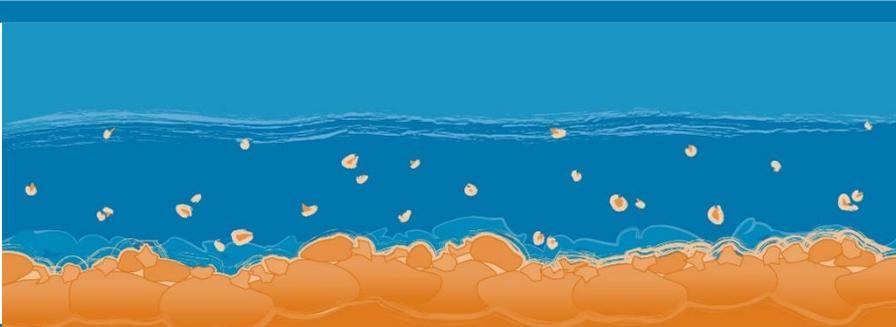
Cœur D., 2017. Etude historique des prélèvements de sédiments dans le Rhône 1954-2010. Rapport final, 53 p. + Annexes.

Heritage G.L., Milan D.J., Large A.R.G., Fuller I.C., 2011. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112 (3-4), 334-344.

Meyer-Peter E., Müller R., 1948. Formulas for Bed-Load Transport. Paper presented at Proceedings 2d Meeting IAHR, Stockholm.

Milan D.J., Heritage G.L., Large A.R.G., Fuller I.C., 2011. Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation. *Geomorphology* 125 (1), 160-171.

Parrot, E., 2015. Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée. Thèse de doctorat de Géographie, Université Lyon 3, 468 p.



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 : dad.roux@graie.org