

EDF Hydro Méditerranée

**1165, rue Jean René Guilibert Gauthier de la Lauziere
13290 AIX EN PROVENCE**

EDF Hydro Méditerranée – GU ORAISON

**Retenue de l'Escale
Réinjection de sédiments curés à Salignac en aval
immédiat du barrage**

Rapport 2023



NOTE TECHNIQUE

BARRAGE DE L'ESCALE. REINJECTION DE SEDIMENTS CURES A SALIGNAC EN AVAL IMMEDIAT DU BARRAGE

Projet Transport solide Hydro Med

Référence H-30575706-2023-000093

Date 12/05/2023

Indice A

28 page(s)

annexe(s)

Résumé	<i>L'administration demande à EDF de réinjecter en Durance tout ou partie des sédiments curés dans la Durance, notamment à Salignac, en queue de retenue de l'Escale. La présente note a pour objectif d'étudier la possibilité de réinjecter des sédiments dans la zone située en aval immédiat du barrage de l'Escale. L'impact en termes de lignes d'eau et d'érosion de berge est analysé au niveau de la zone industrielle située en aval. Des préconisations de réinjection et de suivi sont ensuite réalisées.</i>	
Unité propriétaire	CIH	
Sous-Unité	GU ORAISON	
Site	ORAISH \ ORAISON	
Entité rédactrice	30575706 - SERVICE HYDRAULIQUE DES OUVRAGES ET RIVIERES	
Auteur(s)	[ANDRE Aurelie]	
EOTP	E115/DUEX07/EHDUTS-ORAIS	
Accessibilité (Classification et règles de protection des informations d'EDF SA, DSIE DSIG-2021)	Confidentiel	(Lister nominativement en page 2 Diffusion : les personnes destinataires)
	Restreint	(Indiquer explicitement en page 2 Diffusion : les destinataires (nom ou fonction) ou de manière implicite le périmètre restreint retenu : Projet, groupe de personnes, ...)
	Interne	(Indiquer le périmètre d'accès retenu : EDF SA, Direction, Division, Entité, Projet, Liste de diffusion)
	Libre	(Accessible à tout public interne ou externe EDF SA)

SIGNATURES						
Date	Rédacteur(s)		Vérificateur(s)		Approbateur(s)	
	Nom	Visa	Nom	Visa	Nom	Visa
09/2023	ANDRE Aurélie		VALETTE Eric		BORNECQUE Alix	

LIEU DE CONSERVATION	
Original papier	Original numérique
	AlexandrHy

DIFFUSION INTERNE AU CIH			
Destinataire	Département / Service	Nb ex.	Format
Pierre NEGRELLO	DT-HY	1	@
Remi LOIRE	DT-ES	1	@
Laura DANG	MS AMOA	1	@
Romain TRADOTTI	MS GC	1	@

DIFFUSION EXTERNE AU CIH			
Destinataire	Organisme	Nb ex.	Format
Julie MOSSERI, Géraldine DUVOCHEL, Olivier SAVOYE, Thibaut VERCUEIL	Hydro Med	1	@
Caroline KERJEAN, Kevin CASTELAIN	GU Oraison	1	@
Mathieu BIRRAUX, Philippe IZOARD	GU Sisteron	1	@

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS		
Ind.	Date	Nature des évolutions

SOMMAIRE

1. CONTEXTE	4
2. ANALYSE DES DONNEES	5
2.1 SYSTEME DE NIVELLEMENT	5
2.2 SECTEUR D'ETUDE	6
2.3 DYNAMIQUE DE CREATION DE LA ZONE D'INTERET	6
2.4 VOLUME DE LA ZONE D'INTERET	8
2.5 CONCLUSIONS DE L'ETUDE HYDRAULIQUE AU NIVEAU DE L'USINE D'ARKEMA	9
3. MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE	11
3.1 PARAMETRES	11
3.1.1 Reconstitution du profil en long	11
3.1.2 Hydrologie	14
3.1.2.1 Chronique long terme	14
3.1.2.2 Crue centennale	15
3.1.3 Granulométrie	15
3.2 RESULTATS EN CRUE CENTENNALE ET AVEC LA CRUE DE 1994	16
3.2.1 Crue centennale	16
3.2.2 Crue de 1994	18
3.2.3 Synthèse	18
3.3 EVOLUTION DES FONDS	19
3.4 IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU	20
3.5 RESULTATS POUR DIFFERENTS VOLUMES	21
4. EROSION DE BERGE	23
5. TRAVAUX DE REINJECTION	25
5.1 ACCES	25
5.2 COUTS FINANCIERS ET CARBONE	26
5.3 SUIVIS PRECONISES	26
6. SYNTHESE	28

1. CONTEXTE

Dans le cadre des curages de Salignac sur la Durance et du piège à graviers du Buëch, l'administration demande à EDF de réinjecter en rivière tout ou partie des sédiments extraits.

Une analyse a été réalisée à l'échelle de la Durance afin d'analyser les besoins en réinjection.

Le SMAVD a cartographié sur l'ensemble du linéaire de la Durance :

- Le faciès de la rivière : chenal, méandre et tresses ;
- La profondeur d'incision du lit en mètres entre la ligne d'eau du profil des Grandes Forces Hydrauliques établie en 1909 et le LIDAR de 2017.

Le croisement de ces données suivant la grille ci-dessous permet de cartographier les zones d'intérêt morphologique pour une réinjection.

Faciès Incision	Tresses	Méandre	Chenal
<0 et 0-1	Nul	Faible	Faible
1-2	Faible	Faible	Moyen
2-3	Faible	Moyen	Fort
>3	Faible	Fort	Fort

Figure 1. Croisement des données de faciès et de profondeur d'incision pour définir l'intérêt morphologique à une réinjection

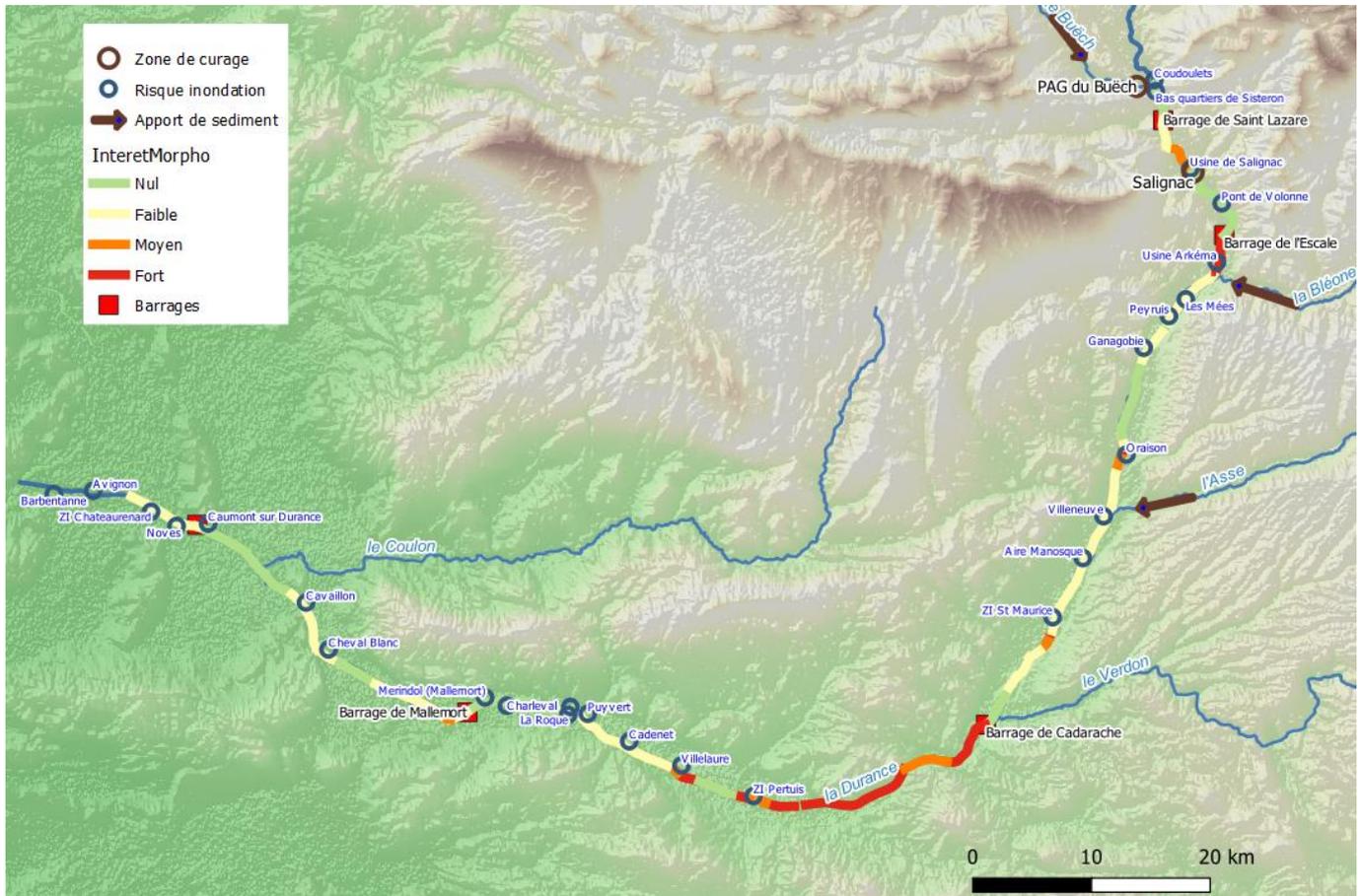


Figure 2. Zones d'intérêt morphologique pour une réinjection

On peut noter sur cette carte que les zones d'intérêt morphologique à une réinjection de sédiments se situent principalement en aval du barrage de Cadarache. Le transport et les coûts financiers et carbone associés rendent impossible une réinjection si loin de la zone de curage de Salignac et à fortiori de celle du piège à graviers du Buëch. Il semble plus raisonnable de contribuer au financement de recharges sédimentaires locales via des terrasses perchées dans les zones d'intérêt morphologiques. Le SMAVD a différents projets de ce type en aval du barrage de Cadarache.

Il y a toutefois une courte zone classée en intérêt morphologique fort sur la carte ci-dessus, depuis l'aval immédiat du barrage de l'Escale jusqu'à la confluence avec la Bléone. La carte mentionne également les zones où des enjeux sont à risque d'inondation. C'est le cas de la zone à intérêt morphologique fort situé en aval du barrage de l'Escale, pour laquelle il est néanmoins noté un risque de débordement au niveau de la zone industrielle (ZI) d'Arkema.

La présente étude a vocation à analyser une éventuelle réinjection de sédiment provenant du curage de Salignac dans cette zone :

- volume de réinjection possible,
- fréquence de réinjection,
- impacts associés, notamment au niveau de la ZI d'Arkema,
- coûts financiers et carbone associés.

2. ANALYSE DES DONNEES

2.1 SYSTEME DE NIVELLEMENT

Le système de nivellement de l'aménagement est le système Orthométrique Lallemand (NGF O).

Pour passer du système IGN 69 (NGF N) au système Lallemand la relation suivante doit être appliquée :

Systeme NGF- IGN 69 (Normal) = Systeme NGF- Lallemand (Orthométrique) + Ecart

La valeur de l'écart est de **0.161 m** au barrage de l'Escale.

Le système de nivellement sera systématiquement précisé dans la suite du document.

2.2 SECTEUR D'ETUDE

Il est envisagé une réinjection partielle des matériaux curés à Salignac dans la zone située en aval immédiat du barrage de l'Escale.



Figure 3. Vue de l'aval du barrage de l'Escale

L'impact des sédiments réinjectés sera analysé depuis le barrage jusqu'à la confluence avec la Bléone, soit un linéaire de plus de 4 km, correspondant à la zone en intérêt morphologique fort.

Les apports en sédiments grossiers de la Bléone sont estimés à 30 à 40 000 m³/an à la confluence, ce qui est largement supérieur à ce qui peut être réinjecté (10 000 à 30 000 m³ tous les 7 à 10 ans, cf. § 3.5). Les conséquences d'une éventuelle réinjection seront donc faibles à négligeables en aval de la confluence.

2.3 DYNAMIQUE DE CREATION DE LA ZONE D'INTERET

Les photos ci-dessous illustrent la modification du lit de la rivière en aval du barrage créant un creux évolutif identifié comme « fosse » potentielle pour la réinjection de matériaux.

On peut déduire de l'analyse de ces photos que :

- La fosse était déjà formée dès 1968 moins de 10 ans après la mise en eau ;
- Elle a sans doute évolué depuis en profondeur mais assez peu en emprise ;
- On note quand même une évolution de l'emprise entre 2009 et 2014 mais qui est sans doute plutôt due à l'augmentation du débit réservé en 2014 qui entraîne une hauteur d'eau plus importante (le niveau d'eau dans la fosse est contrôlé par le seuil de gros blocs qui s'est formé à l'extrémité sud).



1960 : pendant la construction du barrage



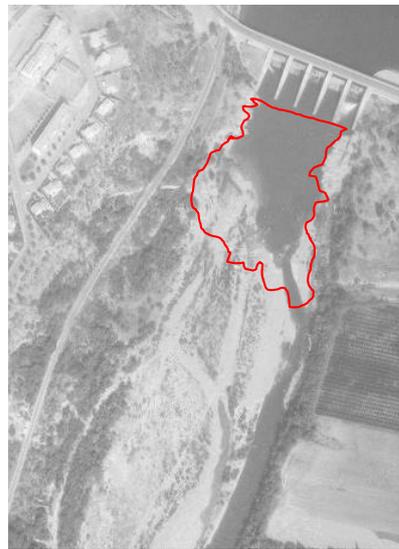
1962 : mise en eau du barrage



1968 (attention : fort débit lors de la prise de vue)



1970 : la fosse est déjà formée



1973



2009



2014 (attention : l'emprise augmente mais augmentation du débit réservé)



2021

2.4 VOLUME DE LA ZONE D'INTERET

Les dimensions de la zone ont été estimées à l'aide de la bathymétrie réalisée en 2022. Le point bas est à la cote 402.1m NGFO.

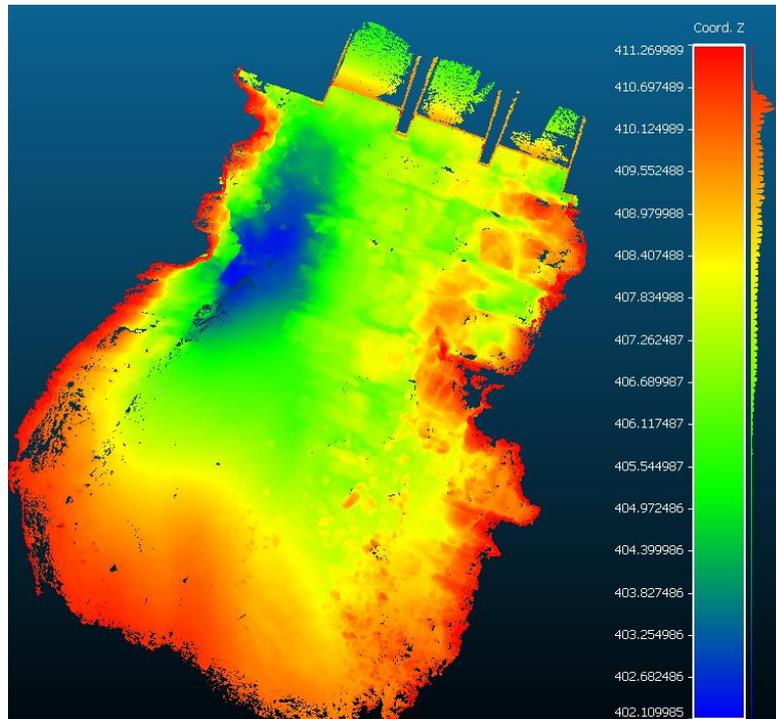


Figure 4. Bathymétrie 2022 de la fosse en aval du barrage de l'Escale

Son remplissage par des cailloux ne doit pas empêcher le bon fonctionnement des vannes. Les cailloux ne peuvent donc être remis que jusqu'à la cote 409.5 m NGFO, correspondant au niveau du terrain naturel avant la mise en eau du barrage (cf. Figure 5).

La Figure 6 montre l'emprise de la zone sous 409.5 m NGFO. **Le volume disponible sous cette cote a été estimé à 27 500 m³, c'est le volume maximum de cailloux qu'il est possible de réinjecter dans la zone.**

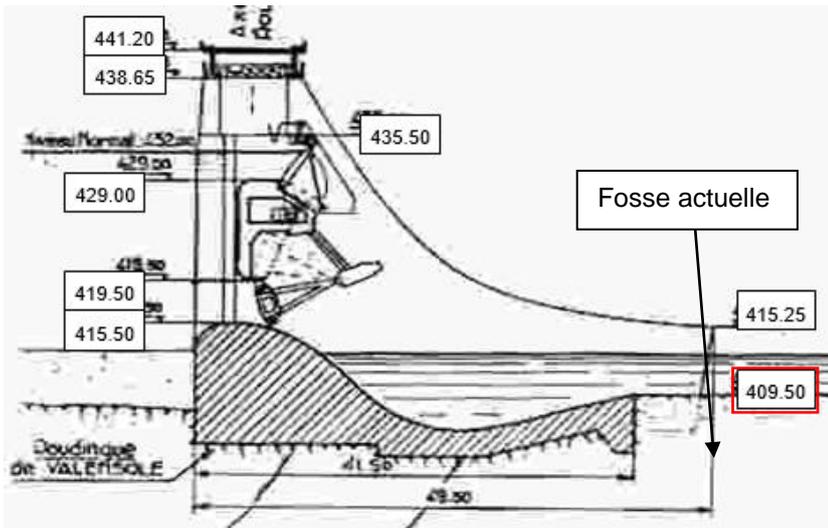


Figure 5. Coupe au droit des vannes du barrage de l'Escale (à la construction). Cotes en NGFO

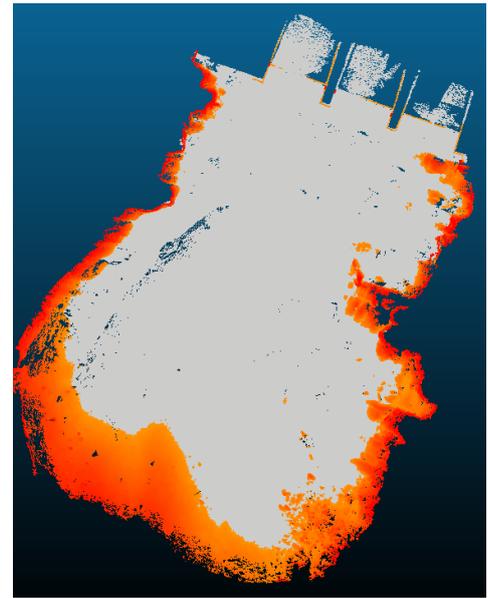


Figure 6. Bathy 2022 de la zone d'intérêt (cotes inférieures à 409.5 m NGFO grisées)

2.5 CONCLUSIONS DE L'ETUDE HYDRAULIQUE AU NIVEAU DE L'USINE D'ARKEMA

Une étude de protection des berges de la Durance et d'inondation a été réalisée par le bureau d'études Artelia en 2022 au niveau de l'usine d'Arkema pour le compte d'Arkema. Cette étude a pour objet d'étudier le risque d'inondation et d'érosion de berge en crue centennale et millénale au niveau de l'usine d'Arkema et de trouver des solutions pour protéger le teruil contre des éventuelles érosions de berge.

Cette étude met en œuvre un modèle hydraulique Telemac 2D (réalisé initialement par le SMAVD) pour définir les niveaux de crues et les vitesses d'écoulement au droit de la zone industrielle.

La cartographie des zones inondables montre une inondation partielle de la zone industrielle en crue centennale avec des hauteurs d'eau allant jusqu'à 1.5m :

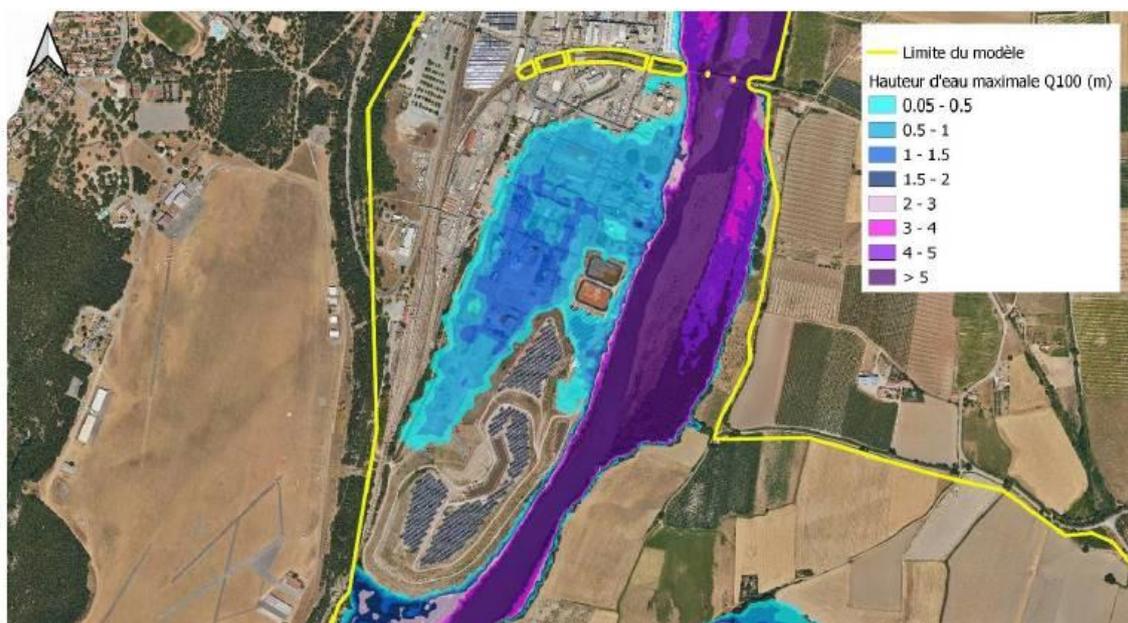


Figure 7. Hauteurs d'eau pour un débit centennal de 2 700 m³/s sur le modèle Télémac2D SMAVD (Source : ARTELIA)

Les conclusions générales de cette étude sont les suivantes (source Artelia) :

Les contraintes sont extrêmement fortes dans la zone d'étude. De telles contraintes n'existent naturellement que dans des zones de gorges rocheuses, avec un substratum très dur et donc dans des conditions très différentes que celle de la zone d'étude. Il est toutefois très difficile de trouver des exemples naturels comportant de tels ordres de grandeur du ratio débit de crue / largeur contrainte. Pour conclure, les contraintes de dimensionnement de la protection de berge sont très différentes de celles prises en compte dans la faisabilité. Il est donc nécessaire de reprendre la faisabilité avec ces nouveaux éléments. De plus, des modélisations complémentaires seront nécessaires pour faire une étude plus précise des ressauts hydrauliques et des hauteurs d'affouillement en particulier dans la zone la plus contrainte se trouvant au niveau du teruil.

Plusieurs scénarios devront être étudiés dans la faisabilité à savoir :

- ▣ Elargissement de la Durance en rive gauche avec notamment une acquisition foncière en face du teruil,*
- ▣ Elargissement en rive droite avec la suppression d'une partie du teruil,*
- ▣ Faire un ouvrage lourd et couteux, limitant l'incidence sur la morphologie de la Durance et présentant de très fortes contraintes techniques.*

L'étude Artelia réalisée pour le compte d'Arkema fait donc état d'une forte sensibilité en termes d'inondation et d'érosion des berges qu'il convient de prendre en compte dans la présente étude de manière à ne pas accentuer les risques existants au niveau de l'usine d'Arkema.

3. MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE

Pour connaître l'impact d'une éventuelle réinjection au niveau de la zone industrielle, il est nécessaire de savoir comment les cailloux réinjectés vont être repris par la rivière puis déplacés vers l'aval.

Un modèle hydrosédimentaire Cavalcade @ARTELIA a été mis en place pour modéliser l'avancée des graviers. Ce modèle est basé sur la notion de capacité de transport et de pente d'équilibre, il est fait pour modéliser l'avancée des graviers dans la rivière en aval du barrage. Il n'est, par contre, pas adapté pour représenter l'érosion progressive de sédiments déposés dans la fosse en aval du barrage. Pour représenter cette érosion, les graviers réinjectés seront représentés dans le modèle par un volume d'apport pendant un certain temps (2 durées d'apport ont été testées).

Pour connaître l'impact en termes de ligne d'eau, des modélisations en Q100 sont réalisées avec les fonds actuels et avec les fonds les plus hauts obtenus dans le modèle décrits ci-dessus.

3.1 PARAMETRES

3.1.1 Reconstitution du profil en long

Le secteur d'étude, du barrage à la confluence avec la Bléone, s'est largement incisé. Le secteur est marqué par des mouilles de forte profondeur entrecoupées de zones de radiers formées par des alluvions grossières. Ce lit n'est plus mobile même lors des crues. L'ensemble du lit est pavé et donc les sédiments en place sont plus grossiers que les sédiments qui seront réinjectés.

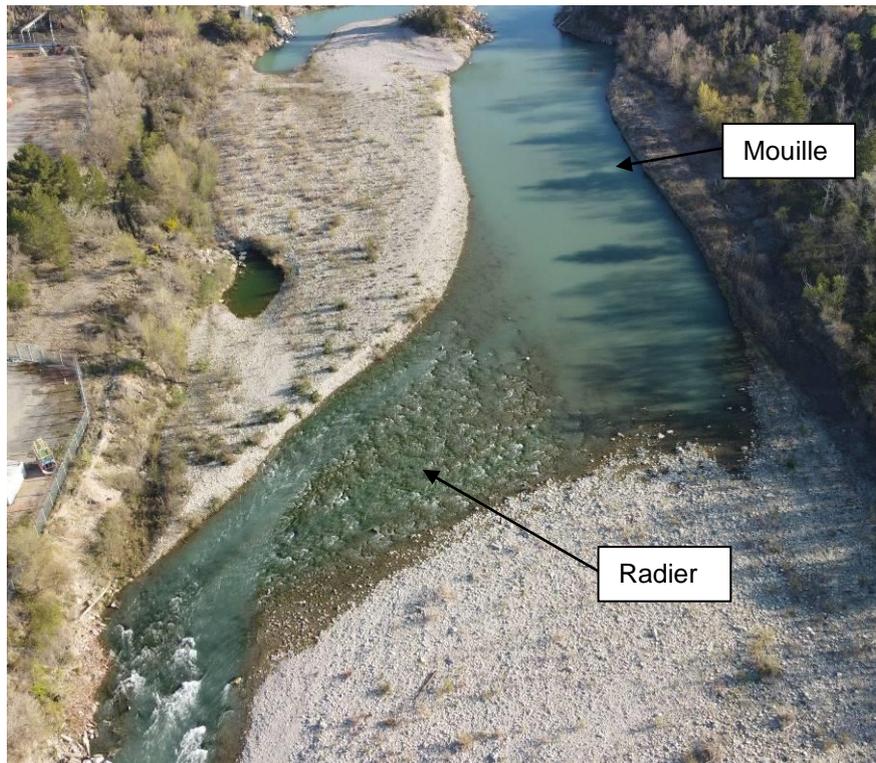


Figure 8. Alternance de radiers et de mouilles

Dans le modèle hydrosédimentaire, le fond actuel est représenté par un fond fixe. Il est nécessaire de représenter les mouilles car elles seront essentielles dans le stockage temporaire des sédiments réinjectés.

Les données topographiques disponibles sont le LIDAR 2020 qui a été réalisé au débit réservé et quelques profils en travers topo-bathy réalisés par le SMAVD en 2020 également.

NB : toutes ces données topographiques sont en NGFN. Ce référentiel a donc été conservé dans la suite de l'étude.

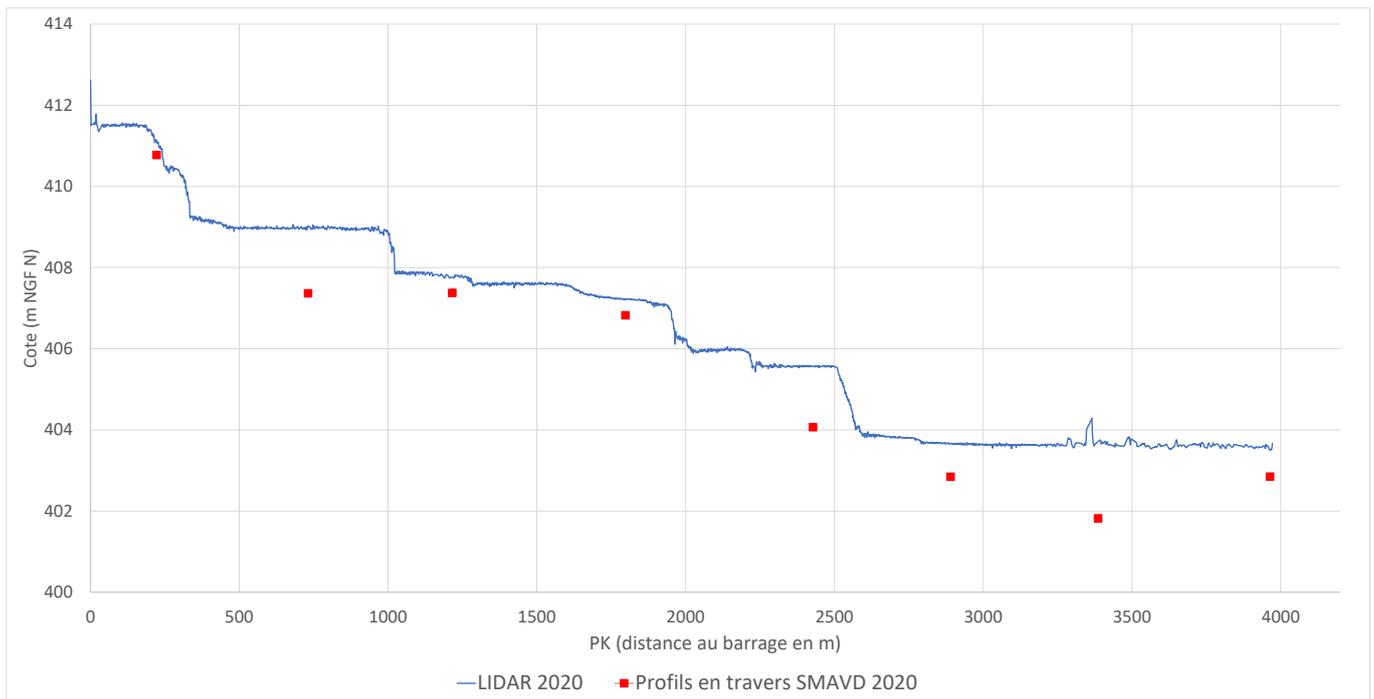


Figure 9. Données topographiques disponibles

Le levé LIDAR est un niveau d'eau projeté sur l'axe rivière ; les cotes des profils en travers sont des cotes moyennes des profils en travers projetées sur l'axe de la rivière.

A partir de ces données, il a été nécessaire d'appliquer une méthode itérative pour essayer de retrouver un fond cohérent avec ces données. Le fond recherché correspond au fond moyen du chenal d'écoulement. Le modèle Cavalcade est ensuite utilisé pour modéliser la ligne d'eau du LIDAR. Le débit correspond au débit réservé lors de la réalisation du LIDAR, soit 8.7 m³/s. Une observation des photos aériennes a également permis de visualiser les secteurs de mouilles à faible profondeur.

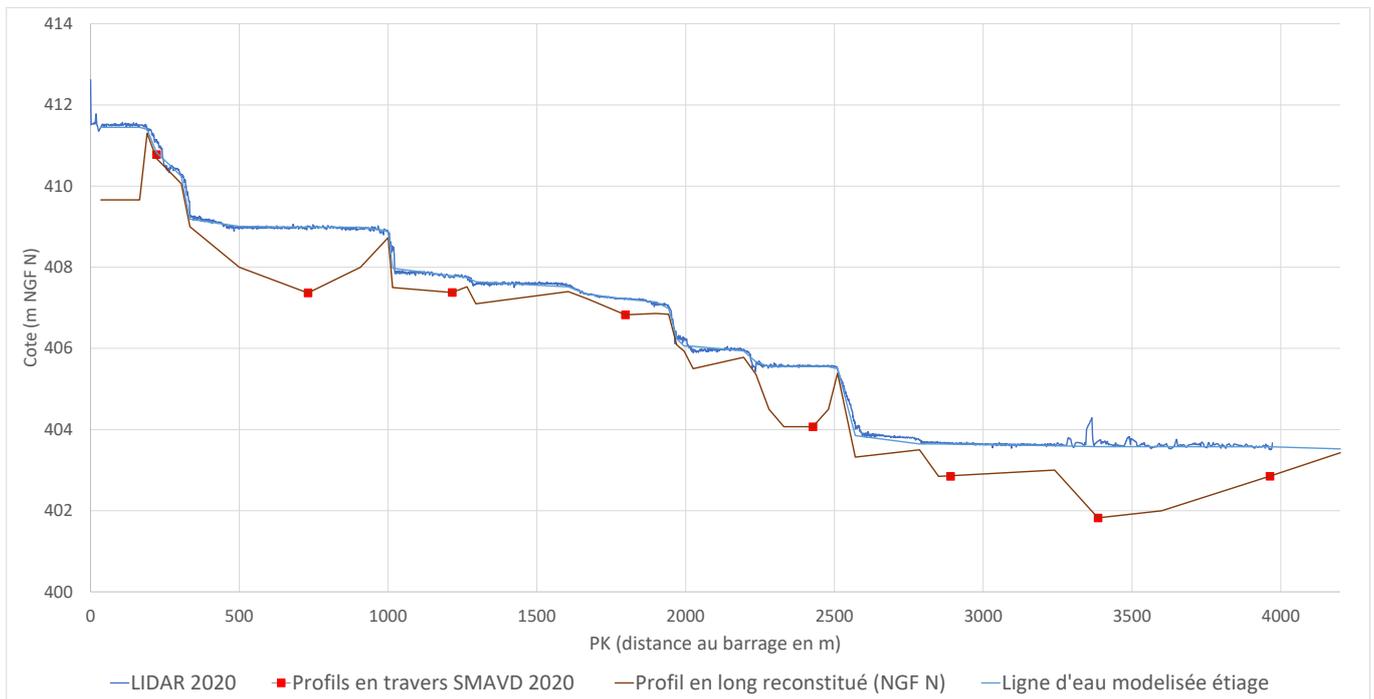


Figure 10. Fond reconstitué (NGFN)

La ligne d'eau d'étiage est très bien reconstituée mais elle est fonction essentiellement de la cote des radiers, pas de la cote de fond des mouilles. Cette dernière reste donc incertaine.

NB : Les bancs émergés sont représentés comme un lit majeur dans le modèle et leur cotes sont estimées via le levé LIDAR.

3.1.2 Hydrologie

3.1.2.1 Chronique long terme

Pour modéliser l'avancée des graviers, il était nécessaire de disposer d'une chronique de débit long terme en aval du barrage de l'Escale. En l'absence de déversés, la Durance est au débit réservé (6.1 m³/s d'octobre à mars et 8.7 m³/s d'avril à septembre) ; ces débits ne sont pas suffisants pour entraîner un déplacement des cailloux, ils n'ont donc pas été pris en compte dans la chronique de débit de manière à raccourcir les temps de modélisation.

Les données de déversés aux barrages de la Durance sont expertisées par le service de Performance de Production d'Hydro Méditerranée depuis 2011. Les débits des années 2011 à 2021 (11 années) ont été concaténés pour disposer d'une chronique des débits déversés uniquement. Les 11 ans sont ainsi représentés par une chronique de 11 500 h.

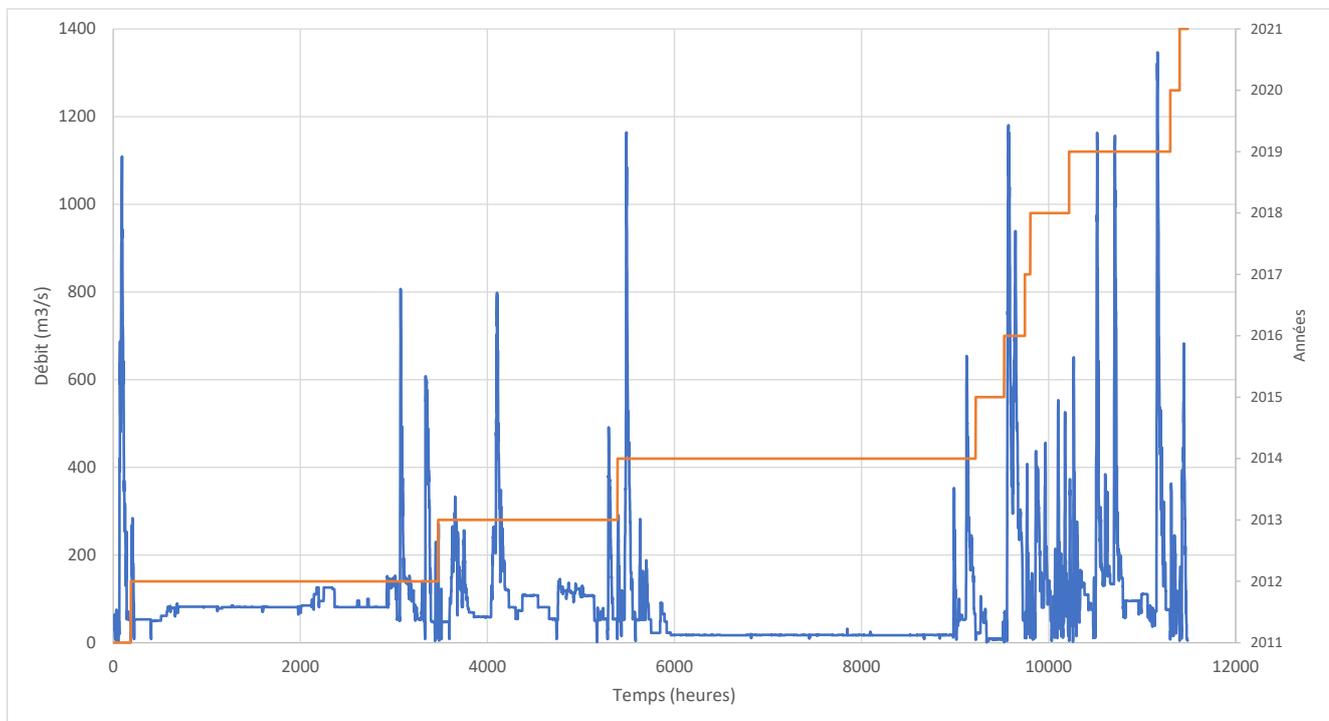


Figure 11. Chronique hydrologique des débits déversés au barrage de l'Escale 2011-2021 (en bleu) et années (en orange)

3.1.2.2 Crue centennale

La crue centennale de référence au niveau du barrage de l'Escale est, à ce jour, celle de l'étude GRADEX de 2004. Le débit de pointe en crue centennale est estimé à 2720 m³/s correspondant à une crue centennale du bassin versant intermédiaire entre Serre-Ponçon et l'Escale.

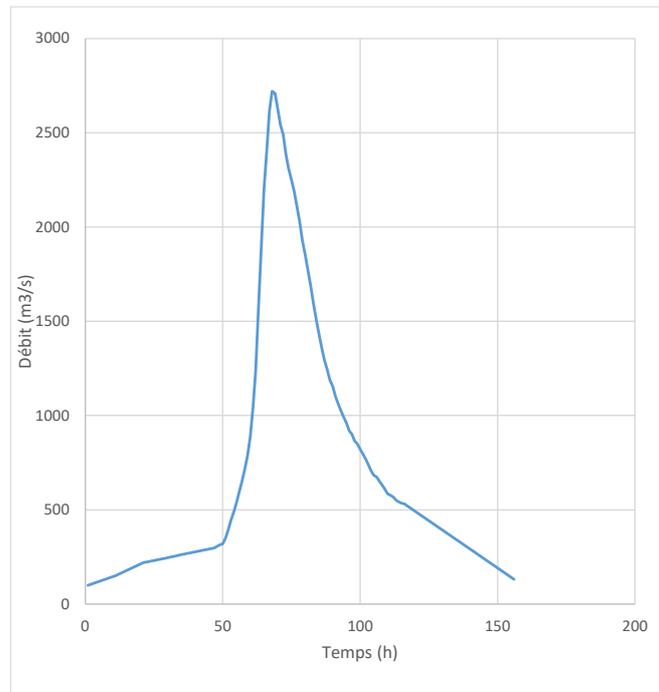


Figure 12. Hydrogramme de crue centennale

3.1.3 Granulométrie

Les données granulométriques sont les mêmes que pour le modèle de Salignac, notamment le dernier calage utilisé pour l'étude du pont de Volonne, puisque les sédiments réinjectés seront issus du curage de Salignac.

La granulométrie retenue a comme diamètre moyen 3.5 cm. La formule de transport utilisée est celle de Lefort 2015.

Les sédiments sont réinjectés dans le modèle, en aval immédiat de la zone d'intérêt identifiée (PK 200), à partir du début de la simulation et pendant une durée de 1000h (représentant environ 1 an de débits déversés) ou de 3000h (représentant environ 2 à 3 ans de débits déversés), cf. Figure 11.

La réinjection se fait de façon continue sur les 1000h (ou 3000h) et ne dépend pas du débit entrant.

Cette durée est cohérente avec une fosse qui s'est créée en moins de 6 ans ; par ailleurs le volume réinjecté sera composé de sédiments remaniés plus faciles à éroder que des sédiments en place dans la rivière.

3.2 RESULTATS EN CRUE CENTENNALE ET AVEC LA CRUE DE 1994

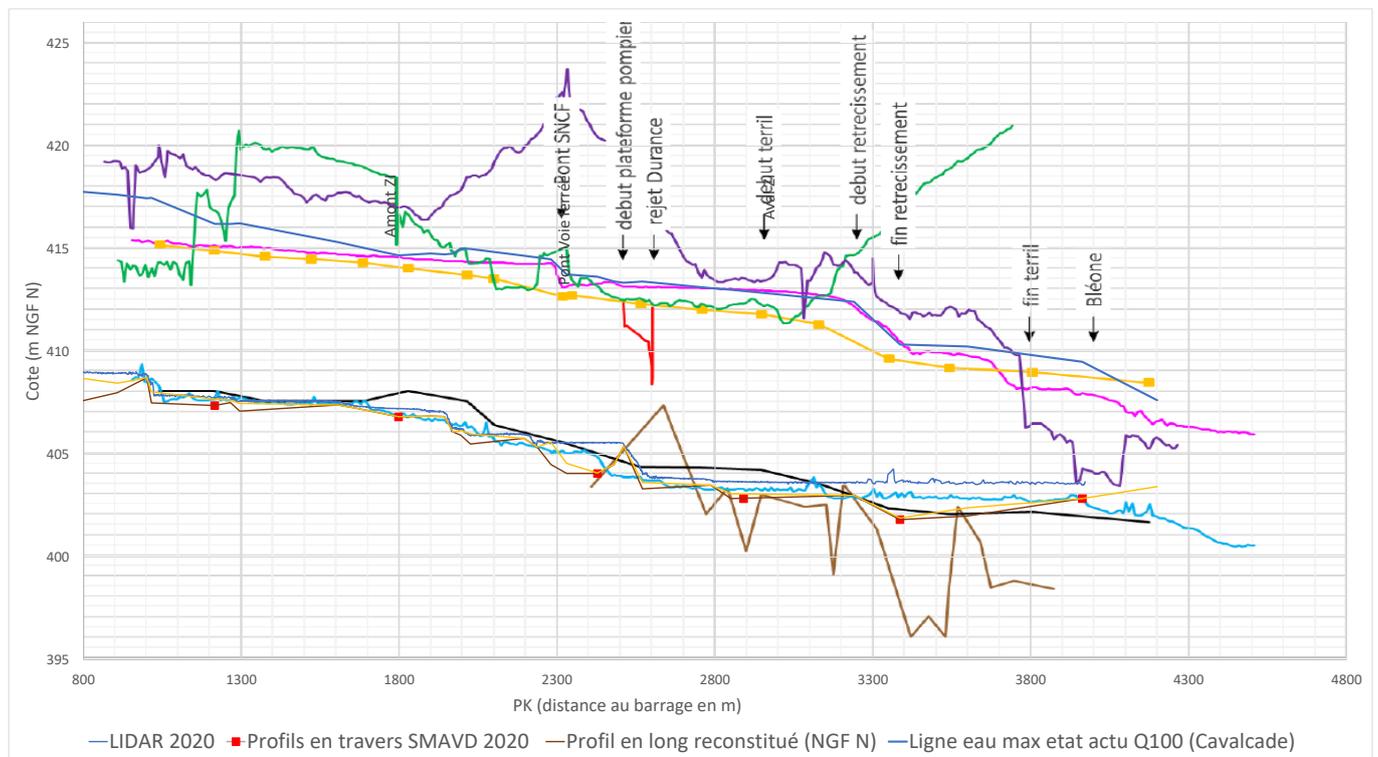
3.2.1 Crue centennale

Pour pouvoir faire évoluer les fonds, le logiciel utilisé est un logiciel hydrosédimentaire 1D à fond mobile mais avec des sections simplifiées. Il ne représente donc pas bien les lignes d'eau surtout si elles sont débordantes. Les niveaux obtenus en crue centennale sont donc relativement incertains mais une vérification de ces niveaux a été faite au regard des résultats obtenus avec le modèle 2D utilisé dans l'étude d'Artélia.

Cette étude a été réalisée pour le compte d'Arkema (cf. § 2.5) en reprenant le modèle Telemac 2D du SMAVD, réalisé sur la base du lidar 2016 et des profils en travers 2016 dans le même secteur.

Le modèle Cavalcade est ici utilisé à fond fixe sans apport sédimentaire. Le débit utilisé est de 2720 m³/s dans Cavalcade en crue centennale (2700 m³/s dans l'étude d'Artélia).

La comparaison des résultats obtenus en crue centennale est la suivante :



Légende des courbes de l'étude Artelia:

- substratum
- Berge rive gauche
- 2 700 m³/s SMAVD
- Repères
- 2 700 m³/s ECOPERM 2008
- Fond ECOPERM 2008
- Berge rive droite
- Fond modèle SMAVD
- Berge exercice pompier

Figure 13. Comparaison des résultats du modèle de l'étude Artelia avec Cavalcade en crue centennale

Les fonds sont issus respectivement du lidar 2016 pour l'étude Artelia (fond modèle SMAVD) et du lidar 2020 pour la présente étude (Profil en long reconstitué (NGF N)). On voit que les données de fonds sont concordantes sauf :

- Entre les pk 2400 et 2600 où un radier s'est décalé vers l'aval. Cette modification du fond se voit sur les photos aériennes



Orthophoto 2016



Orthophoto 2020

Figure 14. Orthophoto 2016 et 2020 entre les pk 2400 et 2600 : déplacement vers l'aval du radier

- En aval du pk 3100 où le lidar 2020 est plus haut que celui de 2016 sans doute en lien avec les dépôts de la Bléone à la confluence.

On retrouve les mêmes évolutions sur la comparaison des profils en long faite par le SMAVD :

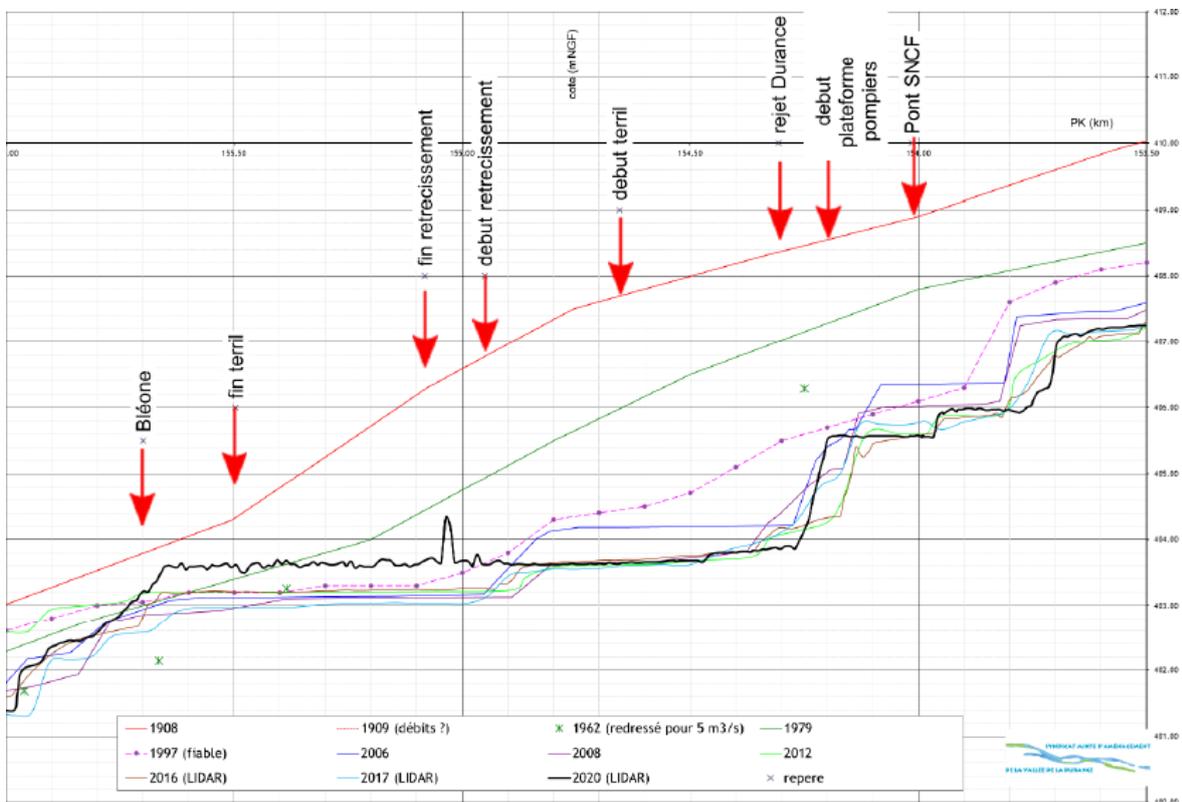
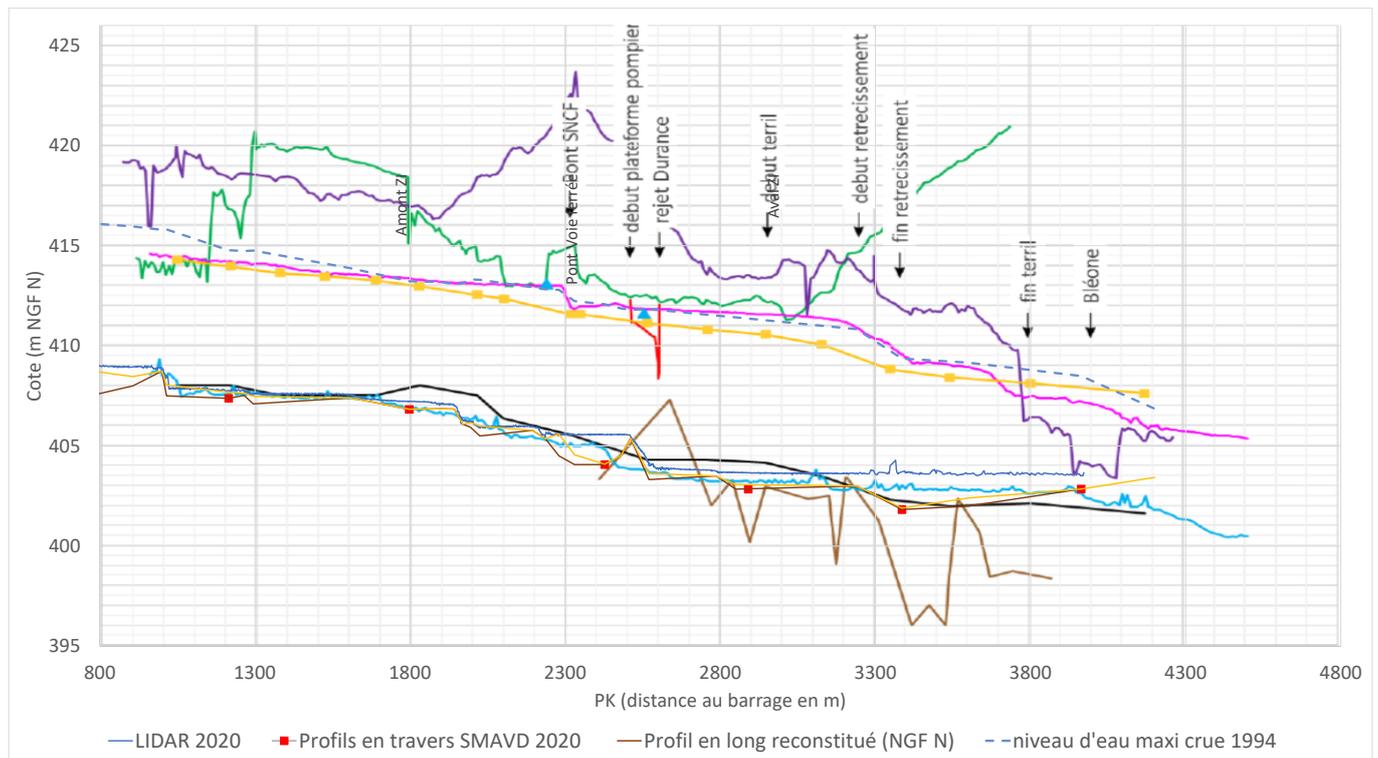


Figure 15. Profil en long du fil d'eau à l'étiage de la Durance dans le secteur d'étude (source : SMAVD)

A part à l'amont du pk 1800, mais qui est hors zone d'intérêt, les 2 lignes d'eau en crue centennale sont cohérentes (cf. Figure 13). A l'aval du pk 3400, le lidar 2020 étant plus haut que le lidar 2016, il est logique que le ligne d'eau en crue centennale soit plus haute, on est ici à l'extrémité aval de la zone d'intérêt.

3.2.2 Crue de 1994

Le débit utilisé est de 2000 m³/s dans Cavalcade pour la crue de 1994, ainsi que dans l'étude Artelia.



Légende **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** :

- Substratum
- Berge rive droite
- Berge exercice pompier
- Berge rive gauche
- Repères
- Fond ECOPERM 2008
- Fond modèle SMAVD
- 2 000 m³/s modèle SMAVD
- 2 000 m³/s ecoperm 2008
- ▲ Laisse crue janvier 1994

Figure 16. Comparaison des résultats du modèle de l'étude Artelia avec Cavalcade pour la crue de 1994

Il y a deux laisses de crue de 1994 dans la zone d'étude, de part et d'autre du pont SNCF. L'écart entre la ligne d'eau modélisée avec Cavalcade et les laisses de crue est inférieur à 20 cm et est le même que pour l'étude Artelia. Cet écart peut s'expliquer par des modifications du lit depuis 1994 et par des incertitudes de modélisation.

En comparaison de la ligne d'eau du modèle Telemac 2D, on retrouve les mêmes écarts que pour la crue centennale, cf. § 3.2.1.

3.2.3 Synthèse

Le modèle Cavalcade est jugé suffisamment fiable pour pouvoir intercomparer les résultats des différents scénarios en termes de ligne d'eau en crue centennale en fonction des évolutions des fonds modélisés, cf. 3.4.

3.3 EVOLUTION DES FONDS

Une première simulation est réalisée en injectant 27 500 m³ (volume maximal possible, cf. § 2.4). Cette réinjection est faite en 1000 ou 3000h en aval immédiat de la zone d'intérêt (pour représenter une érosion progressive des sédiments).

La cote maximale du fond est récupérée pour chaque profil, elle correspond au dépôt maximal obtenu pendant la simulation à chacun des profils. Ce dépôt maximal n'est pas obtenu au même temps de simulation, ce profil est donc fictif, mais représente la cote maximale en chaque point du modèle.

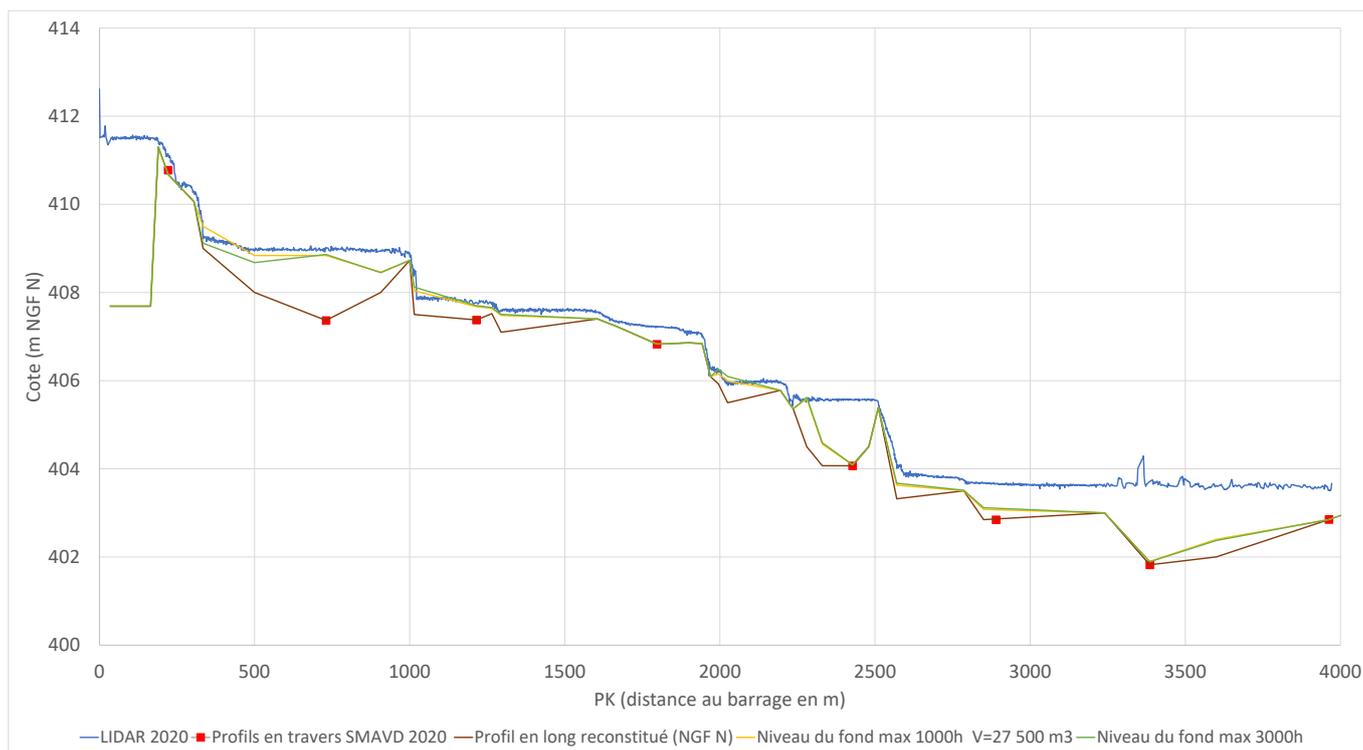


Figure 17. Profils en long maximum obtenus en réinjectant 27 500 m³

On voit que le dépôt se fait dans les mouilles successives. Ce dépôt avance progressivement vers l'aval :

- Au bout de 6 ans tous les sédiments ont quitté la première mouille (cette première mouille d'un volume important fait un effet tampon et homogénéise les résultats entre les 2 vitesses d'apport) ;
- Au bout de 9 ans tous les sédiments sont sortis du modèle.

Il y a très peu de différence entre les fonds maximum obtenus avec un apport en graviers réparti sur 1000h ou sur 3000h. Le cas avec un apport sur 1000h étant légèrement plus haut, il a été retenu dans la suite de l'analyse.

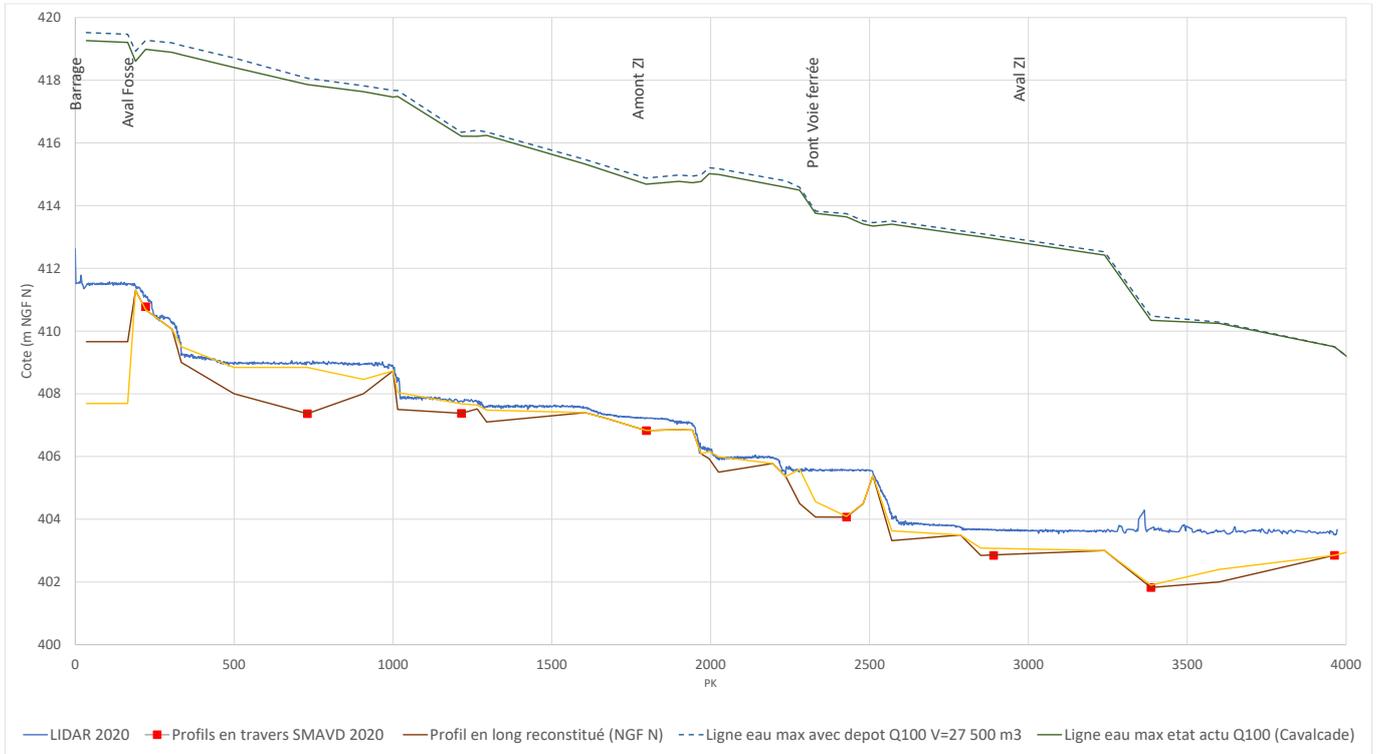
Il est important de noter que :

- Les résultats dépendent fortement du volume des mouilles or la donnée sur les cotes de fond est limitée (cf. § 3.1.1) ;
- Il n'y pas de dépôts sur les radiers.

L'évolution des fonds ne se traduit donc pas par un exhaussement similaire de la ligne d'eau en crue puisque les dépôts principaux se font dans les mouilles alors que le niveau d'eau est plutôt fonction de la cote des radiers.

3.4 IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU

Une modélisation de la ligne d'eau en crue centennale a été réalisée avec les fonds actuels et avec les fonds maximums obtenus. Ces modélisations ont été réalisées à fond fixe et sans apport sédimentaire de manière à pouvoir estimer l'impact de la réinjection.



L'exhaussement maximum de la ligne d'eau en crue centennale est de 30 cm en considérant l'ensemble du secteur d'étude et de 21 cm au niveau de la zone industrielle. En dehors de la zone industrielle, les enjeux sont nettement surélevés et ne risquent pas d'être touchés par des débordements en crue centennale.

3.5 RESULTATS POUR DIFFERENTS VOLUMES

Des réinjections d'un volume plus faible de 15 000 m³ puis 10 000 m³ ont été testées sur le modèle de manière à évaluer la différence d'impact. Les résultats sont les suivants :

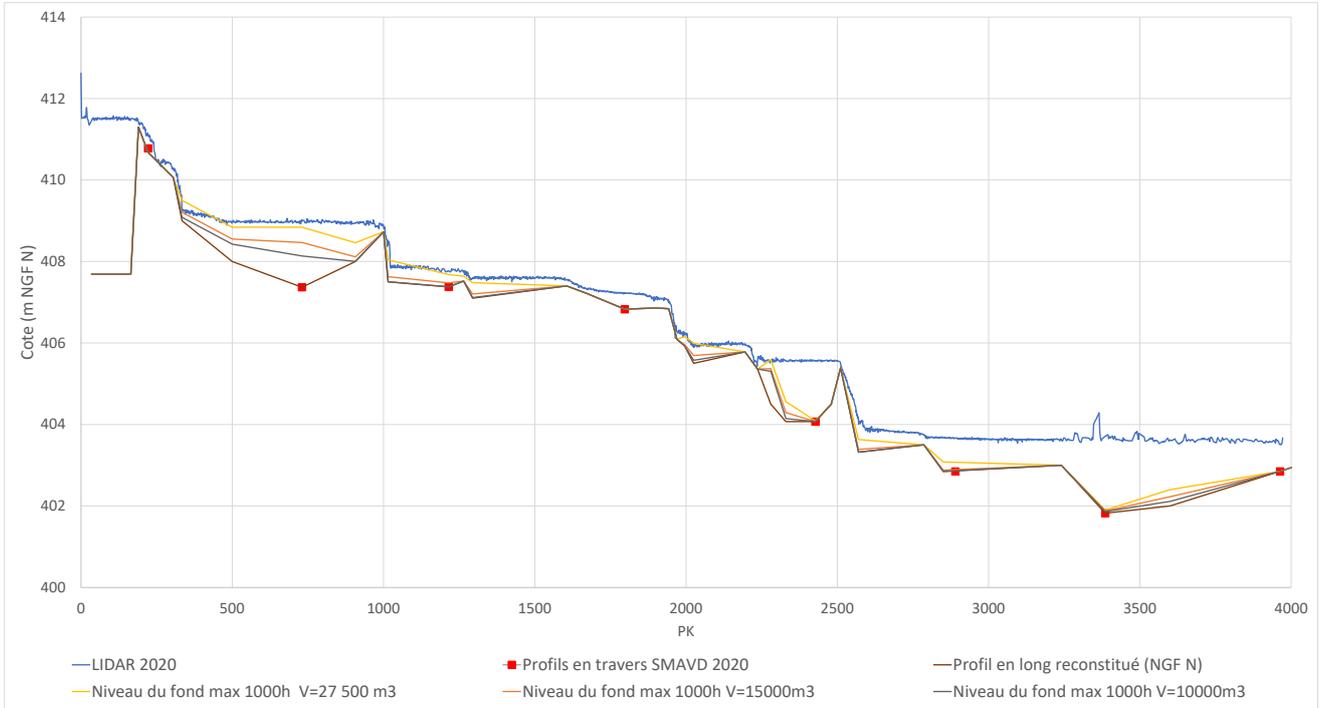


Figure 19. Profils en long des fonds maximums pour différents volumes de réinjection

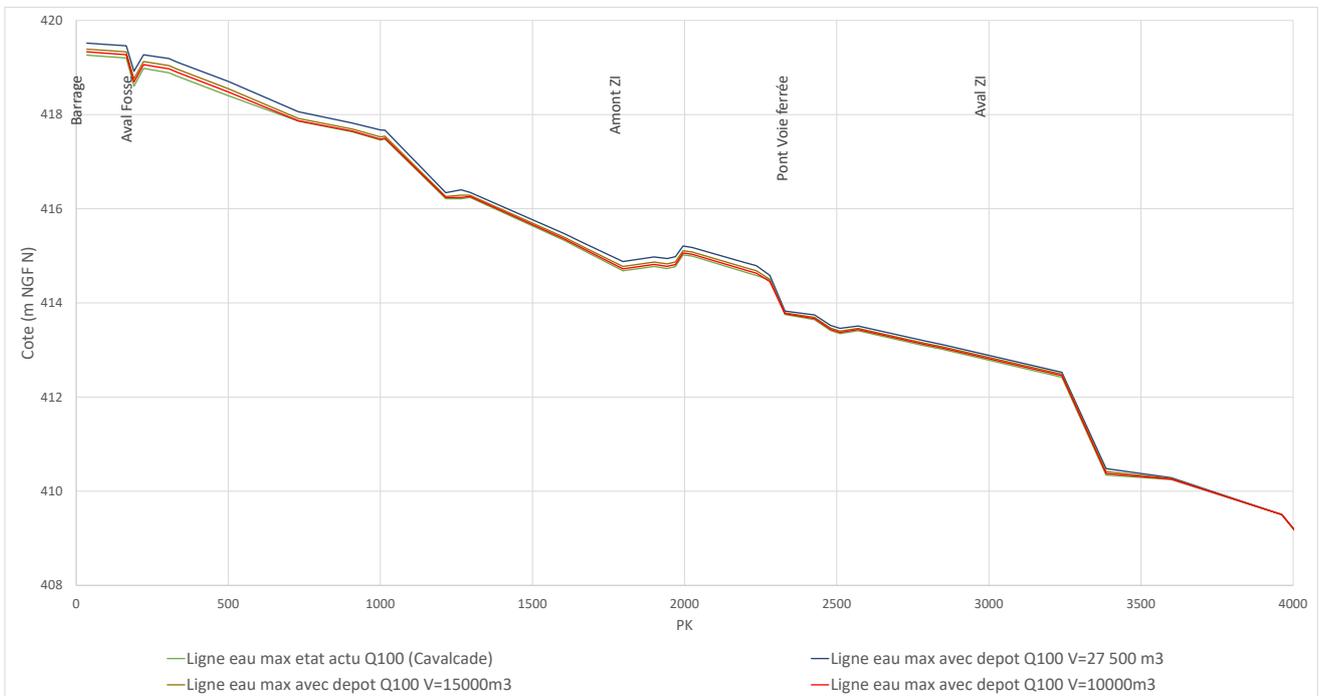


Figure 20. Profils en long des lignes d'eau maximum en Q100 pour différents volumes de réinjection

Volume réinjecté (m ³)	Passage des sédiments		Réhausse ligne d'eau en Q100 au niveau de la ZI (cm)	
	1ère mouille (années)	Secteur entier (années)	Max	Moyenne
27 500	6	9	21	15
15 000	6	9	10	7
10 000	3.5	6	5	3

Figure 21. Résultats obtenus pour différents volumes de réinjection

La rehausse de la ligne d'eau en crue centennale pour un volume réinjecté de 10 000 m³ est au maximum de 5 cm et de 3 cm en moyenne au niveau de la zone industrielle.

Le calcul de cette rehausse est plutôt conservatif puisque c'est le fond max en tout point qui a été retenu. Par ailleurs, la modélisation en crue centennale a été réalisée à fond fixe alors que les cailloux réinjectés auront tendance à être chassés ; à contrario les sédiments pouvant sortir du barrage, dont les vannes seront complètement ouvertes en crue centennale, n'ont pas été pris en compte dans la modélisation.

Ce calcul est entaché d'une forte incertitude, largement supérieure à la rehausse calculée. Toutefois, l'estimation par différence entre les scénarios (avec et sans réinjection) est beaucoup moins incertaine ; et la réhausse attendue de la ligne d'eau est ainsi plus fiable.

Au regard des enjeux en place et de la sensibilité de la zone industrielle au risque d'érosion de berge et de débordement (cf. § 2.5), il semble plus acceptable de réaliser une réinjection limitée à 10 000 m³. Cette réinjection pourrait être réitérée quand l'ensemble des cailloux seront descendus jusqu'à la confluence avec la Bléone, soit au bout de 6 ans d'après le modèle. L'avancée des cailloux est évidemment fonction de l'hydrologie réelle dans le tronçon court-circuité et son estimation via la modélisation comporte une forte incertitude ; il sera nécessaire de faire des suivis pour vérifier l'avancée des sédiments (cf. § 5.3).

Le « guide de mise en œuvre : réinjections et recharges sédimentaires en rivière », en cours d'écriture, met bien en avant l'impératif de se fixer des objectifs et des indicateurs de réussite : « Les objectifs (ex : création de substrats favorables à la fraie, exhaussement du plancher alluvial, etc.) sont, dès cette étape, quantifiés via des indicateurs de réussite (ex : on vise, 2,5 % de surfaces favorables pour la fraie, 0,5 cm d'épaisseur de plancher alluvial, une séquence de 5 faciès différents sur le tronçon, etc.). Le partage et la validation de ces indicateurs de réussite sont primordiaux car ce sont eux qui vont déterminer le dimensionnement « idéal » de l'opération. »

Il convient donc de s'interroger sur l'intérêt morphologique et environnemental de la réinjection. En effet, il a été noté que les cailloux se déposeront uniquement au niveau des mouilles sous des fortes hauteurs d'eau. Ces faciès ne sont pas des substrats très intéressants pour la faune piscicole. A contrario il y aura peu ou pas d'amélioration au niveau des radiers puisque les sédiments ne s'y déposeront pas (pente forte, granulométrie très grossière type pavage). Par ailleurs, les sédiments auront entièrement quitté la zone au bout de six ans environ donc la réinjection sera très peu durable. Même si celle-ci est réitérée, il n'y aura pas de changement dans le faciès global de la rivière qui sera toujours de type méandre, ni dans la profondeur d'incision (3m environ par rapport au profil en long des Grandes Forces Hydrauliques).

En effet, les enjeux en présence (notamment la zone industrielle) à risque d'érosion de berge et d'inondation élevé ne permettent pas d'envisager une réinjection suffisante pour que l'impact soit visible sur la qualité des milieux.

Il semble donc difficile de d'atteindre des objectifs et des indicateurs de réussite satisfaisants, car les gains attendus sur les milieux sont très faibles.

4. EROSION DE BERGE

Il y a également une problématique érosion de berge au niveau de l'usine Arkema, notamment en aval du pont de l'ancienne voie ferrée, où on peut voir des érosions de berge mais aussi au niveau du terril (plus en aval) particulièrement sensible au risque érosif.



Figure 22. Berges érodées au niveau de la zone industrielle

L'étude Artelia a pour objectif de dimensionner des aménagements et travaux de protections pour protéger notamment le terril. Les travaux à réaliser sont en cours de définition et donc pas encore effectués. La réinjection de sédiments dans le lit de la rivière pourrait entraîner une augmentation du risque d'érosion des berges en crue. Il serait donc préférable de ne réaliser la réinjection qu'une fois les travaux de protection de berge d'Arkema réalisés.



1934



2020

Figure 23. Implantation de la zone industrielle pour partie dans le lit de la Durance

Il convient de noter que la zone industrielle a été construite par remblaiement dans le lit de la rivière comme le montre la photographie de 1934. Le lit de la rivière est ici très contraint et il est donc logique que les berges s'érodent facilement, en l'absence de protection construite selon les règles de l'art et adaptée à ce secteur particulièrement contraint, cf. § 2.5.

5. TRAVAUX DE REINJECTION

5.1 ACCES

L'accès à la zone pour la réinjection devrait pouvoir se faire assez facilement depuis le barrage, après un défrichage des derniers mètres et le terrassement d'une piste pour descendre dans la zone.

La distance à parcourir est de 10.5 km pour aller du curage de Salignac jusqu'à la zone d'intérêt.

Toutefois, une analyse des conditions de réinjection ainsi qu'une analyse environnementale doivent être réalisées afin de minimiser les impacts de cette réinjection.



Figure 24. Accès à la zone pour la réinjection

5.2 COÛTS FINANCIERS ET CARBONE

Le tableau ci-dessous récapitule le coût approximatif de la réinjection en fonction du volume à réinjecter. La quantité de carbone émise est également estimée.

Volume à réinjecter (m ³)	Distance aller (km)	Coût réinjection et transport (€/m ³)	Coût (k€)	Nombre de rotations de camions	Nb de km parcourus en camion	Tonnes de CO ₂
10000	10.5	57	570	1 000	21 000	141
15000	10.5	57	855	1 500	31 500	211
27500	10.5	57	1 568	2 750	57 750	387

Figure 25. Coûts financiers et carbone de la réinjection

Les coûts estimés ci-dessus sont des ordres de grandeur basés sur des ratios classiques ; il est nécessaire de réaliser une étude de cette réinjection pour fiabiliser ces données.

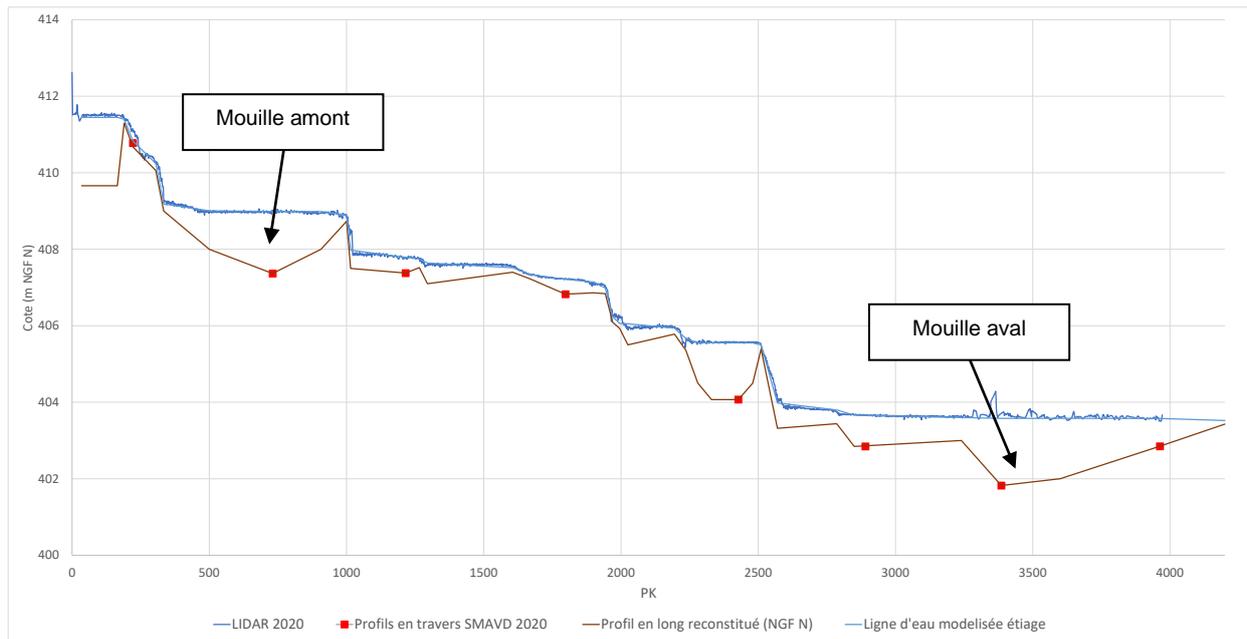
- Coût réinjection : 15 €/m³ ;
- Coût transport : 2 €/km/m³ ;
- Emission carbone pour le transport : 0.97 kgEqCO₂/m³.km ;
- Emission carbone pour des excavations en terrain meuble (pas de données disponibles pour la réinjection) : 3.9 kgEqCO₂/m³ ;
- Volume par camion : 10 m³.

Du fait de l'augmentation récente des coûts du carburant, les coûts de réinjection et de transport ont été augmentés respectivement de 12 à 15 €/m³ et de 1.5 à 2 €/km/m³ au regard du coût de référence des travaux EDF de 2022.

5.3 SUIVIS PRECONISES

Il sera nécessaire d'équiper certains cailloux réinjectés de Pit Tag actifs afin de pouvoir suivre leur avancée. Ce sont les cailloux correspondant à la taille moyenne des sédiments qui seront choisis préférentiellement. Des campagnes régulières de recherche des Pit Tags devront être menées.

En parallèle un suivi bathymétrique sera réalisé au niveau des mouilles ; Il est préconisé de suivre les 2 plus grosses situées en amont et en aval du secteur d'étude, cf. ci-dessous. Un levé bathymétrique devra être réalisé avant la réinjection pour servir de comparaison. Le suivi devra ensuite être réalisé après chaque crue, et annuellement les premières années (puis en espaçant à tous les 2 ans par la suite si les évolutions sont limitées).



Levé bathymétrique de la mouille amont à réaliser du pk 400 au pk 1000



Levé bathymétrique de la mouille aval à réaliser du pk 3240 au pk 3900

Figure 26. Mouilles à lever avant réinjection puis à suivre régulièrement

Le coût approximatif de ce suivi est évalué à ce stade à :

- 25k€ pour la mise en place (environ 100 Pit tags) et 7 k€ par campagne de prospection, soit environ 60 k€ par campagne de réinjection de 10 000 m³;
- 10 k€ par bathy, soit un budget d'environ 50 k€ par campagne de réinjection de 10 000 m³.

Le budget total prévisionnel des suivis est d'environ 130 k€ par campagne de réinjection de 10 000 m³.

Un suivi afin d'évaluer le gain en termes de qualité des milieux doit également être mené. Ce suivi devra être défini lors des études environnementales à réaliser en 2024.

6. SYNTHÈSE

Pour limiter les impacts sur les débordements et les érosions de berge au niveau de la zone industrielle, il est préconisé de réinjecter 10 000 m³ dans la zone d'intérêt. L'impact sur la ligne d'eau en crue centennale a été estimé à 3 cm en moyenne et à 5 cm au maximum au niveau de la zone industrielle.

Cette réinjection pourrait être réitérée quand l'ensemble des cailloux seront descendus jusqu'à la confluence avec la Bléone, soit au bout de 6 ans d'après le modèle. L'avancée des cailloux est évidemment fonction de l'hydrologie réelle dans le tronçon court-circuité ; il sera nécessaire de faire des suivis pour vérifier l'avancée des sédiments. Les suivis préconisés portent sur la mise en place de Pit Tags avec les cailloux réinjectés et sur le suivi par bathymétrie des 2 principales mouilles situées en amont et en aval de la zone d'étude.

La zone industrielle Arkema est également soumise à des érosions de berge. Des travaux de protection sont en cours de définition dans le cadre de l'étude Artelia ; il serait préférable d'attendre leur réalisation pour lancer la réinjection.

Le coût de la réinjection pour 10 000 m³ a été estimé (sur la base de ratios) à 570 k€ et le suivi associé à 130 k€.

Du fait du risque élevé d'érosion des berges et d'inondation de la zone industrielle, la réinjection doit être limitée en volume. L'intérêt morphologique et sur la qualité des milieux va donc être limité.

Il a été noté que les cailloux se déposeront uniquement au niveau des mouilles sous des fortes hauteurs d'eau. Ces faciès ne sont pas des substrats très intéressants pour la faune piscicole. A contrario il y aura peu ou pas d'amélioration au niveau des radiers puisque les sédiments ne s'y déposeront pas (pente forte, granulométrie très grossière type pavage). Par ailleurs, les sédiments auront entièrement quitté la zone au bout de six ans environ donc la réinjection sera très peu durable. Même si celle-ci est réitérée, il n'y aura pas de changement dans le faciès global de la rivière qui sera toujours de type méandre, ni dans la profondeur d'incision (3m environ par rapport au profil en long des Grandes Forces Hydrauliques).

Dans tous les cas, il convient d'attendre que des mesures de protection aient été réalisées au niveau de l'usine ARKEMA, du fait du fort risque d'érosion de berge et d'inondation actuel.

L'option d'une réinjection en aval de l'Escale est donc suspendue à la réalisation des mesures de protection au niveau d'Arkema et ne peut donc être envisagée dans le cadre des dossiers d'autorisations en cours pour les curages. Dans tous les cas, elle sera d'un volume faible et d'un intérêt limité.