

EDF Hydro Méditerranée
10 avenue Viton
13482 Marseille cedex 20

GEH DURANCE VERDON – GU SISTERON

MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE DU PIEGE A GRAVIERS DU BUECH

Rapport 2019



NOTE TECHNIQUE

MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE DU PIEGE A GRAVIERS DU BÜECH

Projet	Transport Solide UP Med			
Référence	H-30575706-2019-000033			
Date	01/06/2019	Indice	A	50 page(s)
				annexe(s)

Résumé	<i>L'objectif de cette modélisation hydrosédimentaire du piège à graviers (PAG) du Buëch et de la retenue de Saint Lazare est de vérifier la pertinence des curages réalisés dans le PAG et de les optimiser afin d'en limiter les conséquences et les coûts en utilisant le REX acquis grâce à 6 années d'exploitation</i>			
Unité propriétaire	CIH			
Sous-Unité	GEH DURANCE			
Site	SALIGH \ SALIGNAC			
Entité rédactrice	30575706 - SERVICE HYDRAULIQUE DES OUVRAGES ET RIVIERES			
Auteur(s)	ANDRE Aurélie			
EOTP	E115/DUEX07/EHDUTS-SALIG			
Accessibilité	Interne EDF			
(Classification et règles de protection des informations d'EDF SA, DSIE-2017-000046.)	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
02/05/2019	ANDRE Aurélie		VALETTE Eric		JAFFRE Alexandre	

LIEU DE CONSERVATION	
Original papier	Original numérique
	Alexandr'hy

DIFFUSION INTERNE AU CIH			
Destinataire	Département / Service	Nb ex.	Format
Eric VALETTE	DT/HY	1	@
Jean-Marie LOAEC	AMOA/MS	1	@
Jordan SAUVAGE	GC-MS	1	@
Rémi LOIRE	DT/ES	1	@

DIFFUSION EXTERNE AU CIH			
Destinataire	Organisme	Nb ex.	Format
Julie MOSSERI	UP Med	1	@
Norbert SCHALTENBRAND	GEH Durance Verdon	1	@
Jean-Claude BONAITI	GU Sisteron	1	@
	Membres du CSE (DREAL, DDT04, DDT05, AFB, AE, SMIGIBA, SMAVD..)	1	@

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS		
Ind.	Date	Nature des évolutions

SOMMAIRE

1. CONTEXTE.....	5
2. HISTORIQUE DU PIEGE A GRAVIERS	7
3. ANALYSE MORPHOLOGIQUE	8
3.1 AMONT DU PIEGE A GRAVIERS	8
3.2 AVAL DU PIEGE A GRAVIERS	11
3.3 RETENUE DE SAINT LAZARE	13
3.4 BRANCHE DURANCE EN AMONT DE LA RETENUE	15
4. DONNEES HYDROLOGIQUES	17
4.1 BUËCH	17
4.2 DURANCE.....	18
5. CALCUL DES CAPACITES DE TRANSPORT	19
5.1 BUËCH	19
5.1.1 Données utilisées	19
5.1.2 Apports moyens annuels	21
5.2 DURANCE.....	21
6. REALISATION DES MODELES HYDROSEDIMENTAIRES	22
6.1 MODELE REALISE	22
6.2 MODELE SEDIMENTS GROSSIERS VERSUS SEDIMENTS FINS ?	22
6.3 CALAGE	24
7. MODELISATION DE L'ARRET DES CURAGES.....	27
7.1 PARAMETRES DU MODELE	27
7.2 RESULTATS OBTENUS.....	27
8. OPTIMISATION DES CURAGES.....	30
8.1 PRINCIPES	30
8.2 VOLUME DU PIEGE	30
8.3 FONCTIONNEMENT DU PIEGE ACTUEL	32
8.4 FONCTIONNEMENT DU PIEGE RACCOURCI (100M).....	33
8.5 PIEGE CURE TOUS LES 2 ANS	36
8.5.1 Période 2009-2017.....	36
8.5.1.1 Données utilisées	36

8.5.1.2	Résultats obtenus	36
8.5.2	Période 2012-2018.....	39
8.5.2.1	Données utilisées	39
8.5.2.2	Résultats obtenus.....	40
8.6	FONCTIONNEMENT DU PIEGE RACCOURCI (300M).....	42
8.7	PIEGE CURE TOUS LES ANS (PERIODE 2009-2017).....	43
8.7.1.1	Données utilisées	43
8.7.1.2	Résultats obtenus.....	45
8.8	SYNTHESE DE L'OPTIMISATION DES CURAGES	47
9.	REFERENCES	48
10.	ANNEXES.....	49
11.	PRESENTATION DU MODELE CAVALCADE D'ARTELIA	50

1. CONTEXTE

Les modélisations hydrosédimentaires sont réalisées dans le cadre du renouvellement du dossier d'autorisation de curage du piège à graviers du Büech (PAG) 2020-2030. L'objectif est :

- De mieux apprécier qualitativement et quantitativement l'influence du piège à graviers sur le risque d'inondations à l'aval ;
- De challenger les modalités de curage (volume, fréquence,...) dans la perspective du renouvellement des autorisations administratives pour la période 2020-2030 ;

Dans ce contexte, il s'agit donc d'évaluer dans quelle mesure le PAG, en évitant le dépôt de sédiments grossiers dans la Durance au droit des bas quartiers de Sisteron, participe à la protection de ce secteur vis-à-vis des risques de débordement en crue centennale. Sur la base du REX de 6 années d'exploitation, il est analysé :

- les conséquences de l'arrêt des curages dans le PAG (5 à 15 ans) sur l'évolution des fonds en aval de manière à objectiver son niveau d'impact ;
- dans la mesure où l'intérêt du PAG est confirmé, des propositions de curage optimisé sont formulées.

L'objectif est de maintenir les fonds cibles fixés au droit des bas quartiers et ainsi de garantir des volumes de sédiments grossiers passant le PAG quasiment nuls.

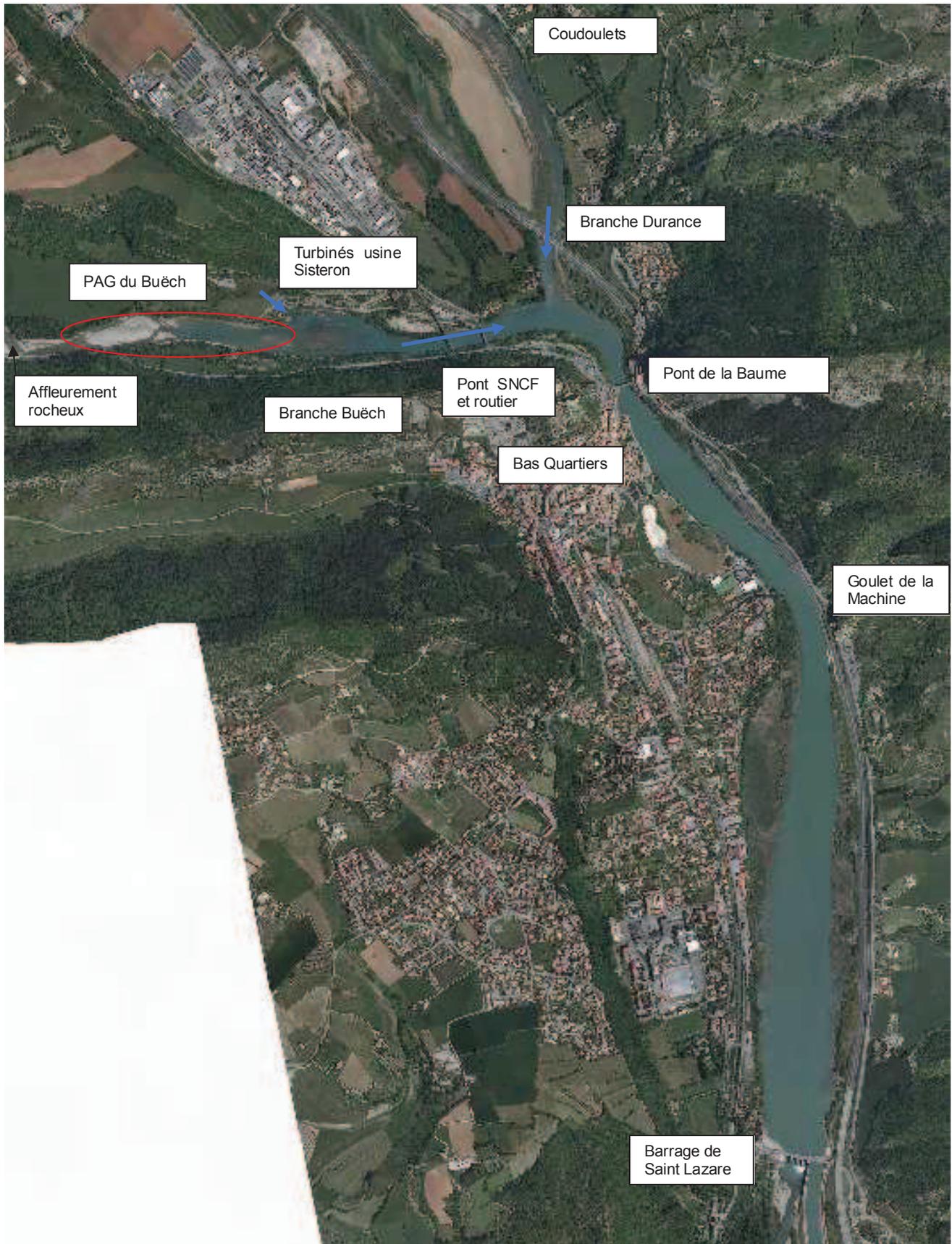


Figure 1. Carte de localisation

2. HISTORIQUE DU PIEGE A GRAVIERS

Le piège à graviers du Büech a été préconisé dans l'état cible de 2010 [1]. Il a été mis en place par 2 campagnes successives en 2010 et 2011 et s'est accompagné d'un recalibrage de toute la branche Büech et de la confluence avec la Durance.

Le piège à graviers a été initialement dimensionné par une étude du bureau d'étude SOGREAH pour le compte du SMIGIBA [2] avec les caractéristiques suivantes :

- volume : 180 000 m³ environ ;
- longueur : 670 m ;
- largeur : 90 m ;
- cote de fond : 458.5 m NGF ;
- pente latérale, amont, aval : 1V/2H ;
- initialement il disposait d'une rampe à 4% en amont qui a finalement été supprimée et remplacée suite à validation avec l'AFB par un merlon fusible sur la longueur de la zone d'extraction

Il a été curé avec une fréquence quasi-annuelle depuis sa création : seules les années 2015 et 2018 ont fait l'objet d'années blanches. Il y a eu également de multiples bathymétries totales ou partielles permettant d'évaluer le remplissage sédimentaire du bassin avec une fréquence infra-annuelle. L'ensemble des levés et des curages réalisés sont rappelés sur la *Figure 2*.

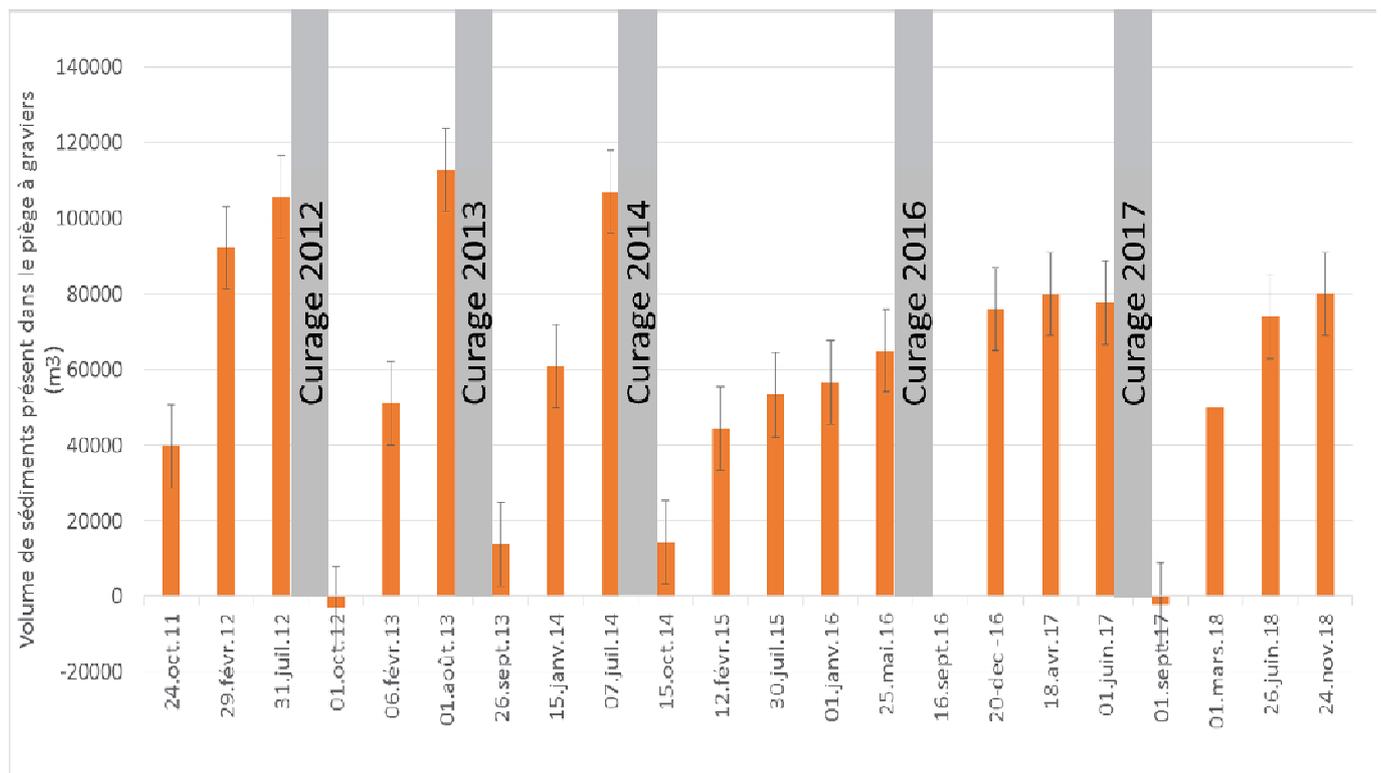


Figure 2. Historique de gestion du PAG, source [3]

3. ANALYSE MORPHOLOGIQUE

Les paragraphes suivants visent à décrire l'évolution morphologique du lit du Büech en amont du piège à graviers (notamment au niveau de l'affleurement rocheux) et en aval du piège, au niveau des ponts routier et SNCF, cf. *Figure 1*.

3.1 AMONT DU PIEGE A GRAVIERS

Le lit du Büech n'a pas subi depuis la mise en place du PAG une érosion régressive suffisamment importante pour qu'elle soit nettement visible sur les profils en long. Toutefois, le lit a quand même plutôt une tendance à l'abaissement comme en témoigne la visibilité de plus en plus forte d'un affleurement rocheux en amont immédiat du piège. Cette visibilité peut subir une variabilité infra-annuelle au gré du remplissage et du curage du piège ; mais, il semble que globalement, l'affleurement soit de moins en moins recouvert de graviers.





Figure 3. Evolution de l'affleurement rocheux sur les photos aériennes

L'avantage de cet affleurement est qu'il permet le blocage de l'incision régressive ; à contrario si le lit s'incise davantage, il pourrait finir par former un infranchissable pour les poissons (ce qui n'est absolument pas le cas aujourd'hui).



Figure 4. Photographie de l'affleurement rocheux en janvier 2019

Sur le profil en long des points bas moyennés sur l'ensemble de la largeur du lit, l'affleurement rocheux n'apparaît pas, cf. Figure 5. A contrario, sur le profil en long du chenal vif (moyenne des points les plus bas des transects sur 5 m de large), on voit le blocage du profil en long par ce point dur, cf. Figure 6.

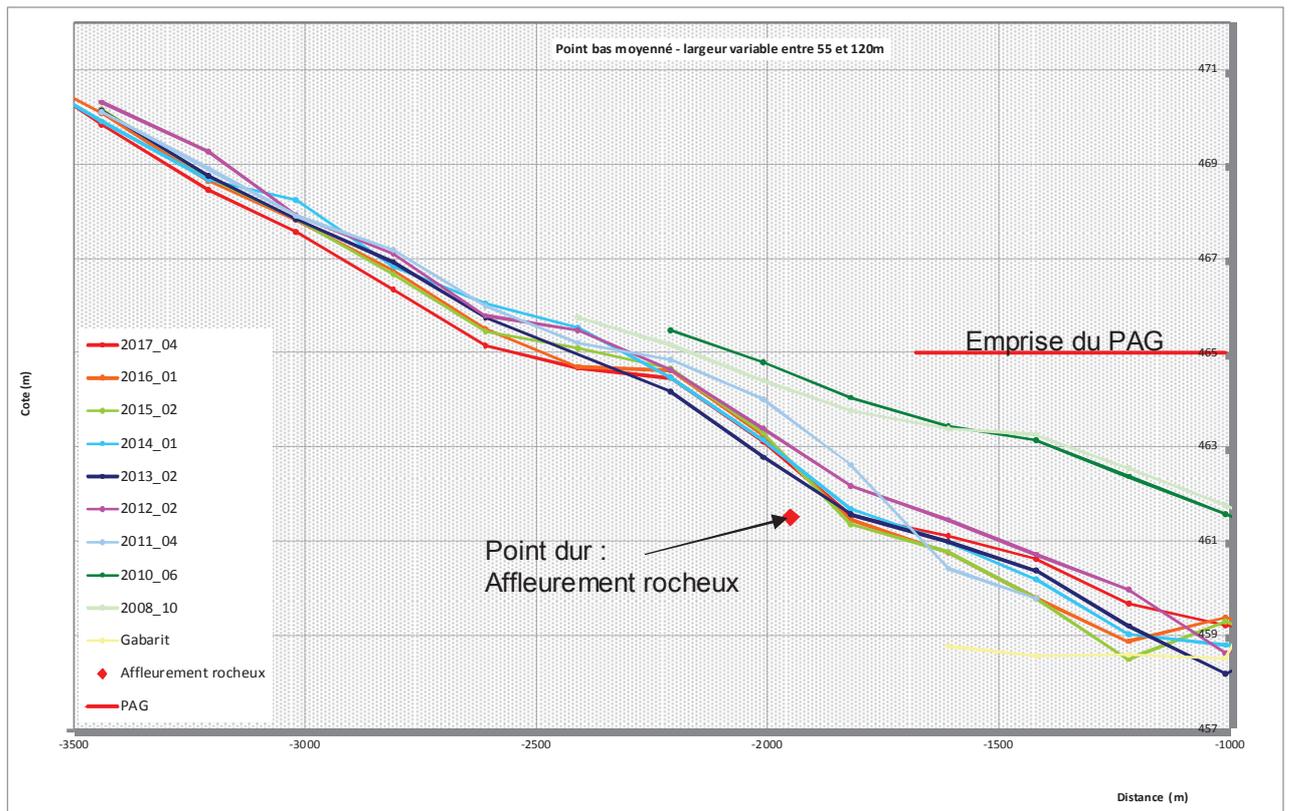


Figure 5. Profils en long des points bas sur l'ensemble de la largeur du lit

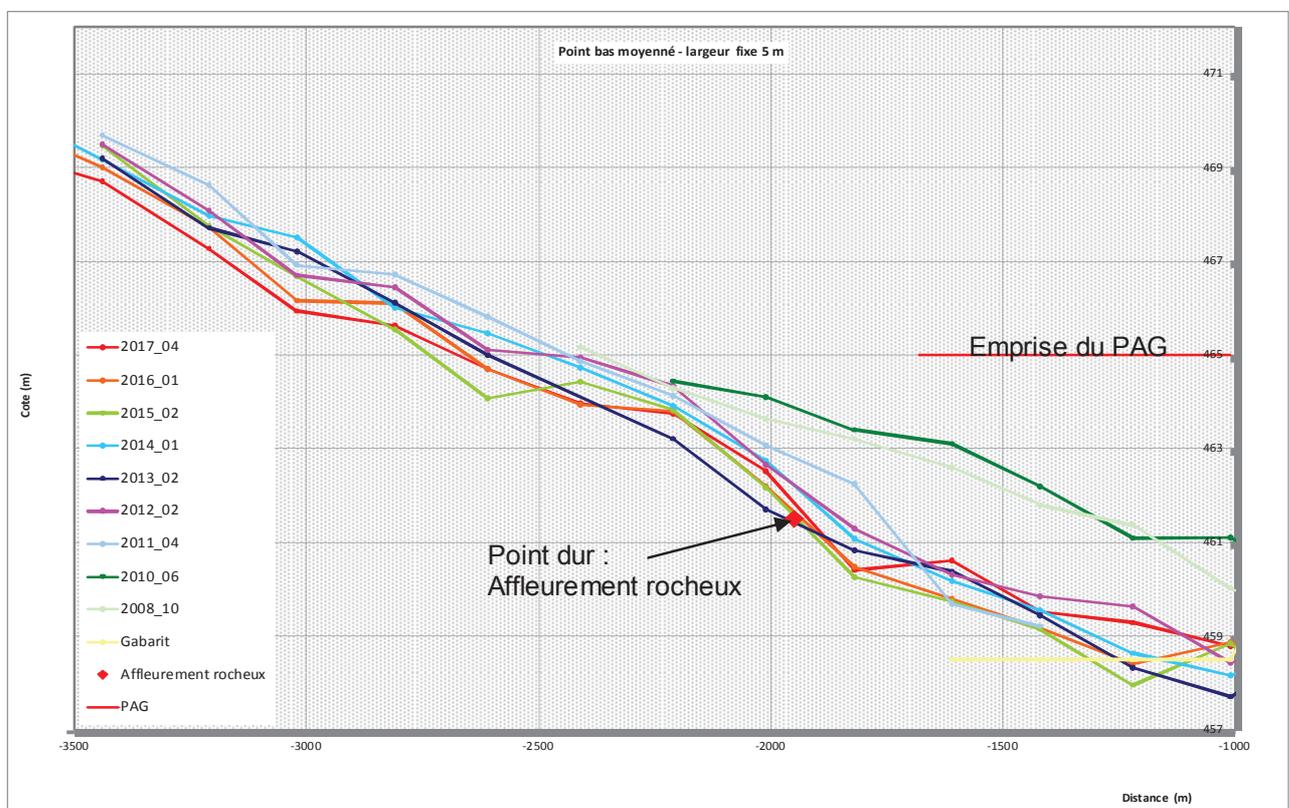


Figure 6. Profils en long du lit vif (5 m de large)

3.2 AVAL DU PIEGE A GRAVIERS

L'enjeu se situe au droit des ponts SNCF et routier avec une tendance du lit à la baisse qu'il est nécessaire de surveiller au regard de la stabilité des ouvrages. Le secteur est sous l'influence du niveau de la retenue de Saint Lazare mais en aval de la restitution des turbines de Sisteron et dans un secteur peu large.

Entre 2012 et 2017, soit entre la construction du piège et aujourd'hui, on note globalement une faible tendance à l'exhaussement dans la partie large en aval de la restitution de Sisteron. A contrario, dans la partie resserrée, au droit des ponts, la tendance est plutôt à un léger abaissement.

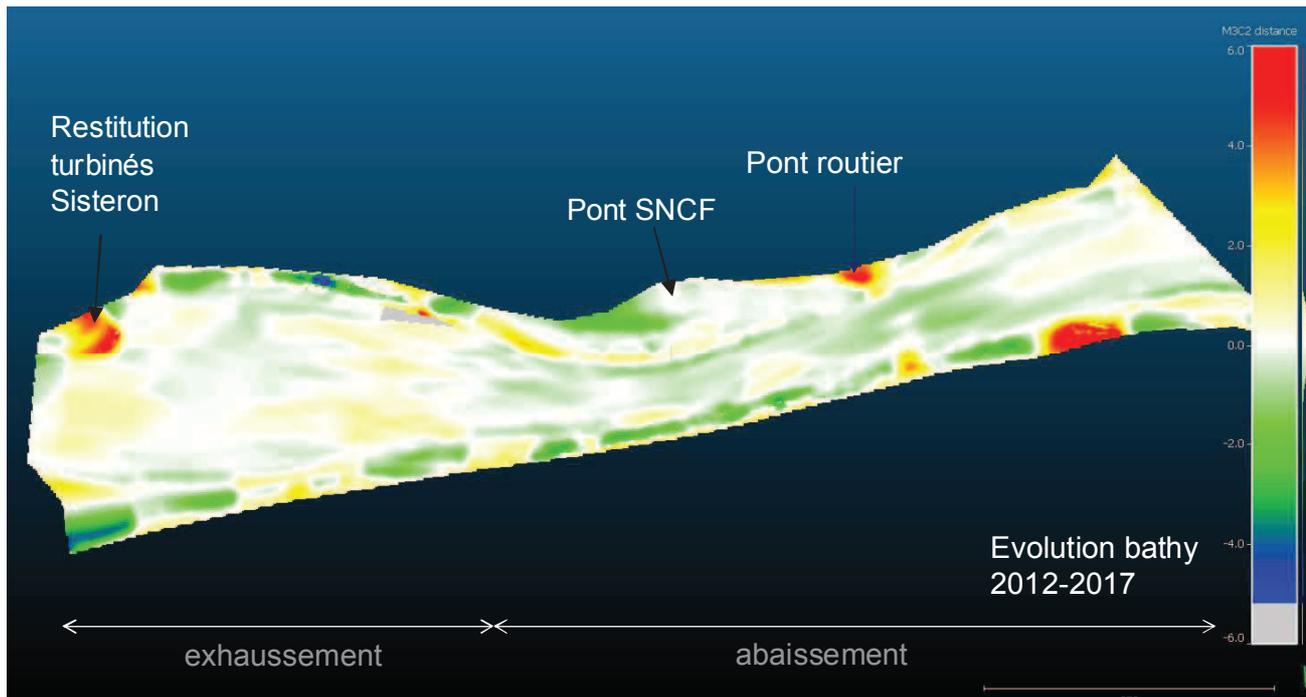


Figure 7. Evolution bathymétrique au droit des ponts

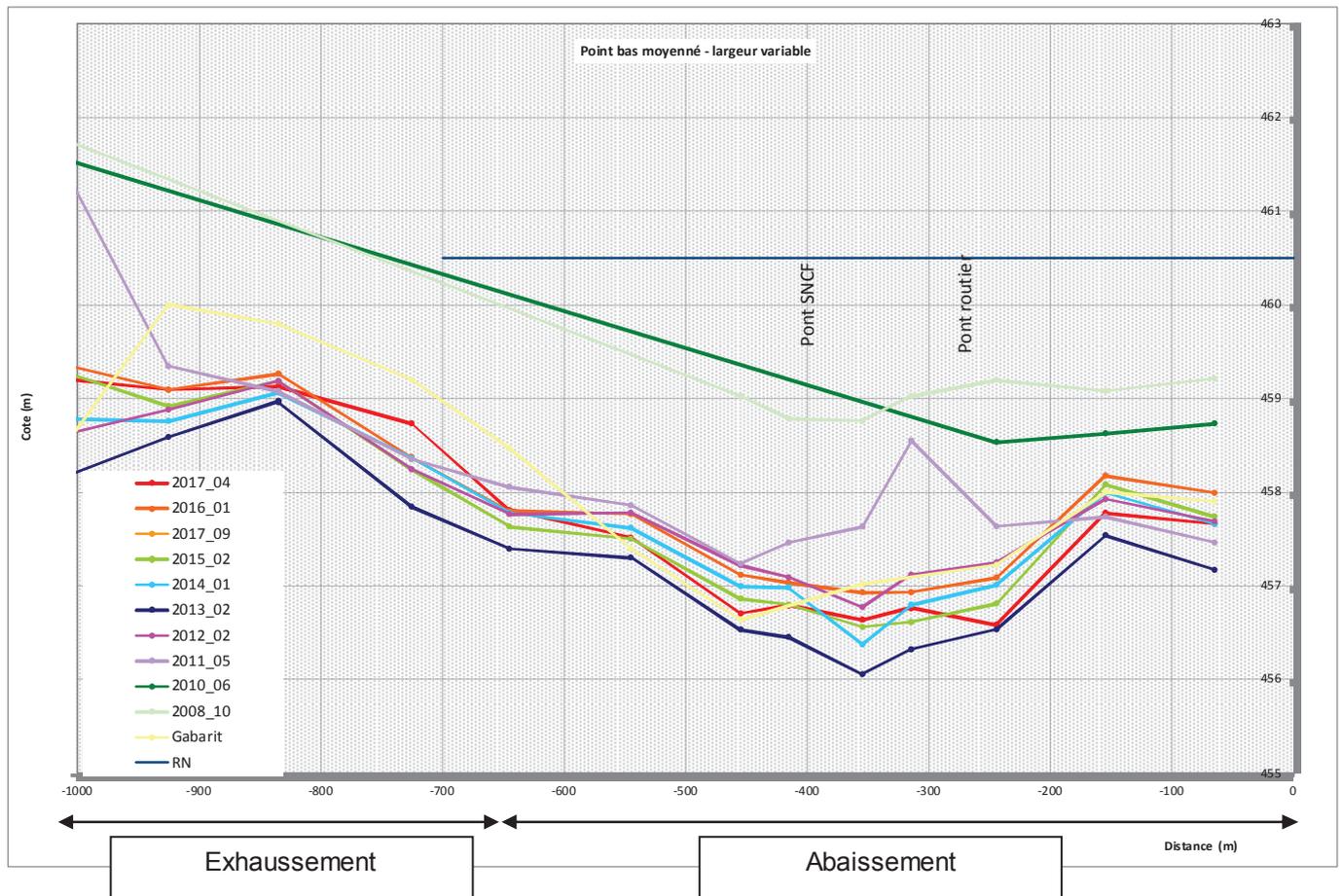


Figure 8. Profils en long au droit des ponts

Dans le détail, on note un niveau très bas en 2013, sans doute en lien avec la crue de 2012 ou à un rééquilibrage suite aux travaux de construction du PAG et au recalibrage du lit de la branche Buëch jusqu'à la confluence. Depuis, les fonds sont remontés, puis se sont ré-incisés au droit des ponts lors de la crue de 2016.

Ce sont ainsi principalement les abaissements en crue de la retenue de Saint Lazare, qui en permettant le transit des sédiments (par augmentation des vitesses d'écoulement à côte basse) entraînent une érosion du lit au niveau des ponts. Par contre, c'est bien la présence du PAG, qui empêche les exhaussements du lit au niveau des ponts dans les périodes où la retenue est à RN. Ces 2 actions de gestion sédimentaire (exploitation par abaissement en crue et exploitation du piège à graviers du Buech) se compensent en termes d'évolution des fonds.

NB : le gabarit en aval du PAG correspond au niveau des fonds recalibrés tels que préconisé dans l'état cible de 2010

3.3 RETENUE DE SAINT LAZARE

La retenue de Saint Lazare se comble essentiellement par des sédiments fins, notamment depuis la mise en place du PAG qui limite drastiquement les apports de graviers dans la retenue de Saint Lazare. Les apports résiduels de sédiments grossiers viennent de la branche Durance (cf. § 5.2).

L'absence d'abaissement de la retenue de Saint Lazare entre 2012 et 2016 a entraîné un exhaussement important des fonds. L'ouverture et l'abaissement lors de la crue de novembre 2016 a permis de retrouver les niveaux de 2012, avec une érosion de près de 4m par rapport aux niveaux de 12/2015.

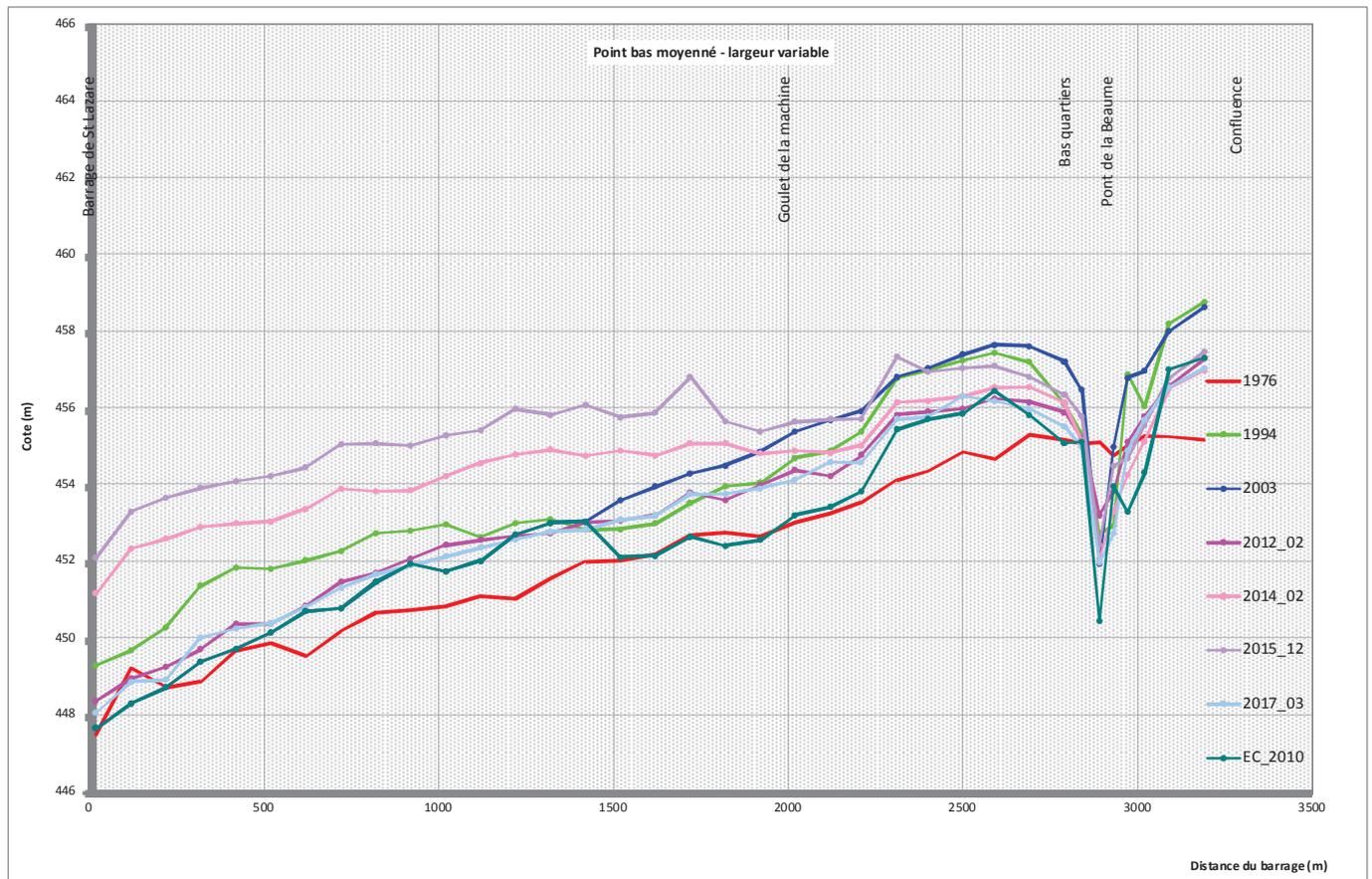


Figure 9. Profils en long dans la retenue de Saint Lazare

Le niveau des points bas de 2017 a atteint le niveau d'état cible (Géométrie 1¹). Toutefois, l'élargissement du lit étant plus faible que dans la définition de la géométrie d'état cible Géom1, le profil en long moyenné sur la largeur du lit reste plus haut que celui de l'état cible. Le creusement de la géométrie 2 de l'état cible 2010 (profil en long 2003) vers celui de l'état cible Géom1 est en cours grâce aux abaissements réalisés lors des crues de 2008 et 2016.

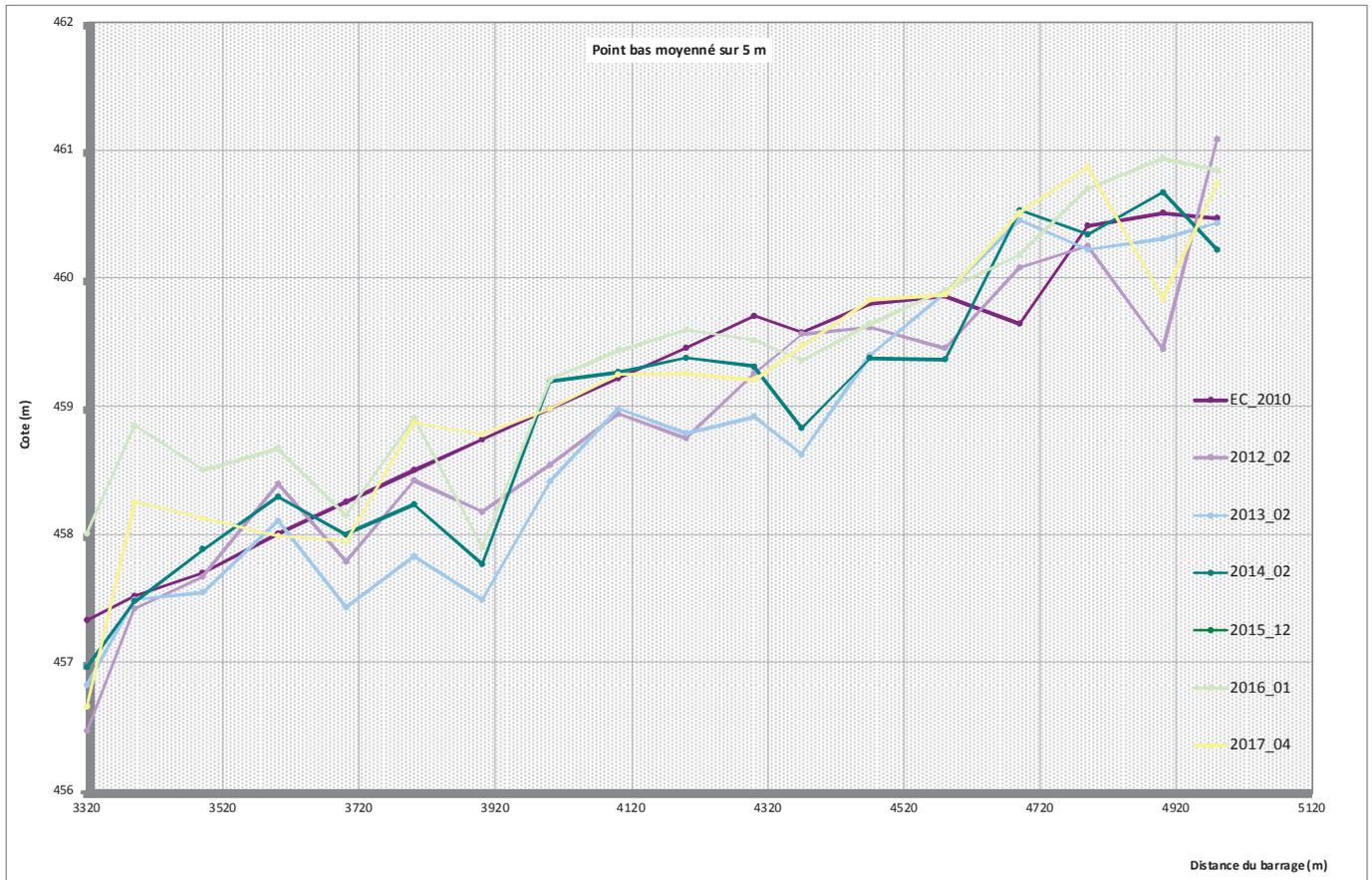
On note la faible évolution de la partie en aval immédiat du pont de la Baume (partie amont des bas quartiers) entre 2012 et 12/2015 et les niveaux atteints plus bas que pendant la période précédente (1994-2003), sans doute

¹ Pour rappel, 2 géométries différentes avaient été définies au droit et en aval du pont de La Baume : Géom2 correspond au niveau des fonds de 2003 ; Geom1 à un élargissement et un approfondissement des fonds de 2003 sur 1500 m en aval du Pont de La Baume. Géom 1 permettait un abaissement de ligne d'eau en crue centennale de 1.5 m au droit des Bas Quartiers, mais les 2 géométries permettaient de respecter la cote de référence de 462.8 m NGF. Les travaux pour atteindre Géom1 n'avaient pas été réalisés avec pour objectif d'atteindre ces niveaux de fond grâce aux abaissements de la retenue de Saint Lazare en crue.

en lien avec la faible quantité de sédiments grossiers entrants dans la retenue depuis la mise en place du PAG du Büech.

3.4 BRANCHE DURANCE EN AMONT DE LA RETENUE

Les travaux de recalibrage de la branche Durance de la confluence avec le Buëch jusqu'aux Coudoulets ont été réalisés en 2012.



Le graphique ci-dessus, montre une sédimentation continue mais limitée dans le lit mineur de la Durance d'environ 50 cm depuis les travaux de 2012 (bathymétrie 2013). La crue de 2016 entraîné une légère érosion des fonds notamment à proximité de la confluence mais qui ne compense pas les dépôts.

Les travaux de 2012 ont consisté à un recalibrage du lit mineur mais également à la création de banquettes en rive (cf. Figure 11), qui n'ont pas subi de dépôt.

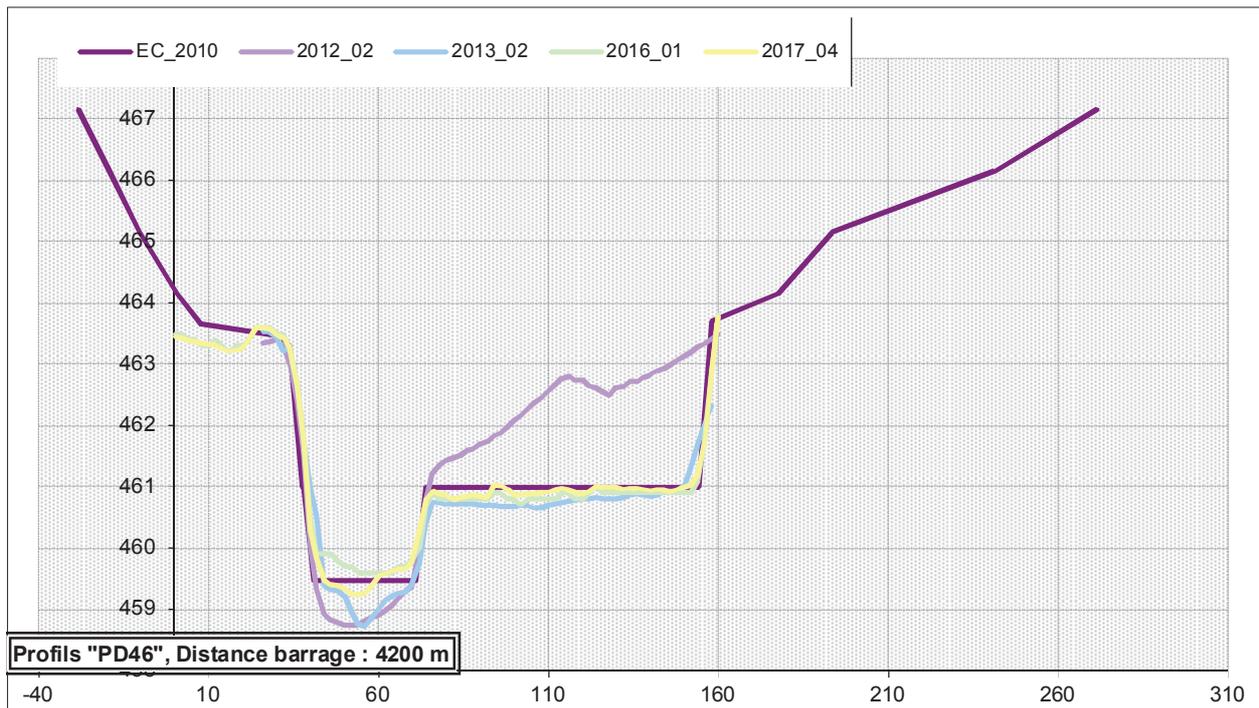


Figure 11. Profil en travers recalibré au droit des Coudoulets

4. DONNEES HYDROLOGIQUES

L'ensemble des données hydrologiques utilisées sont décrites dans le graphique ci-dessous et détaillées ci-après.

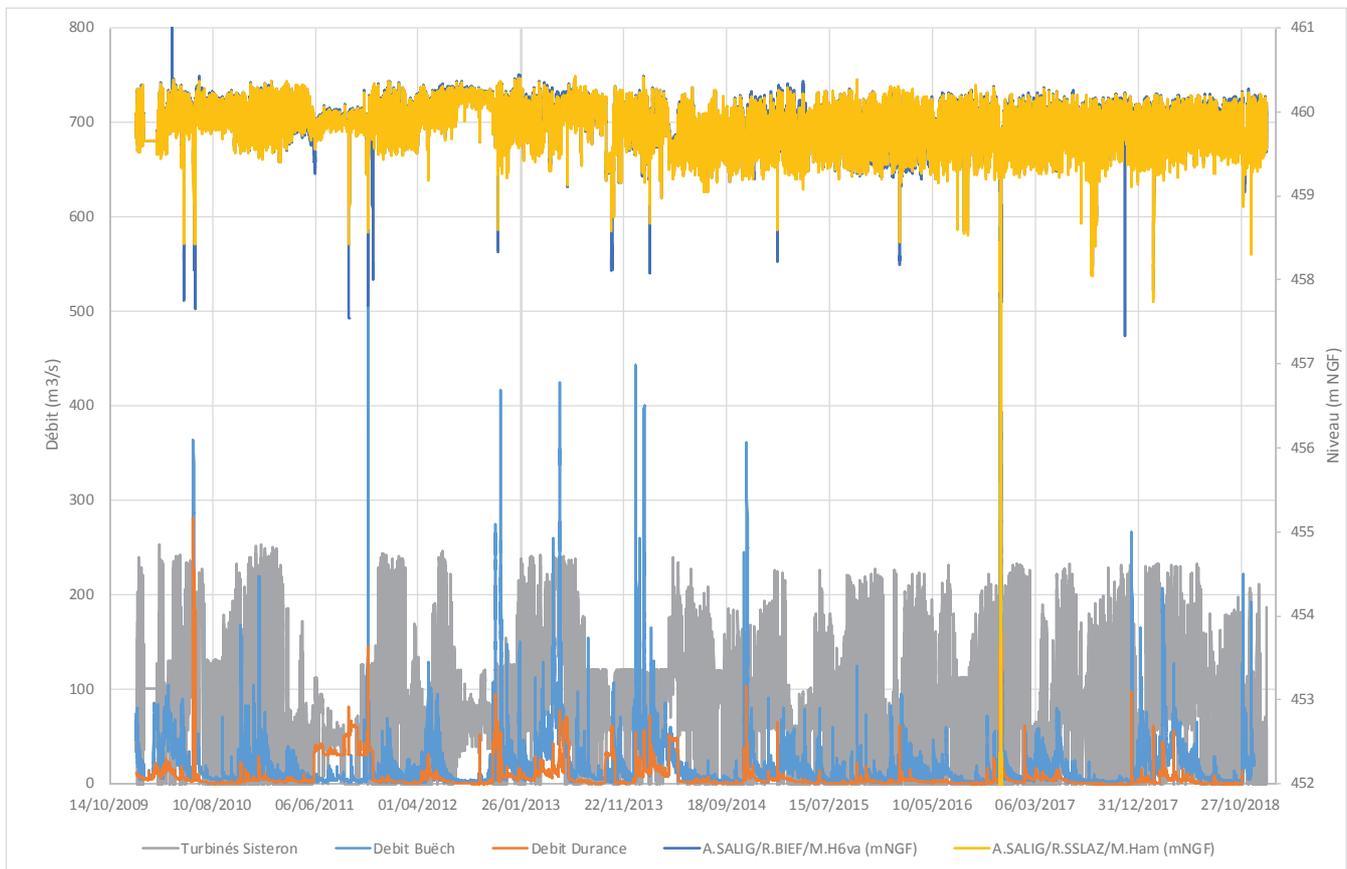


Figure 12. Données débits et niveaux utilisés

4.1 BUËCH

Le débit du Buëch était jusqu'en 2015 mesuré à la station du Chambon ; depuis 2012 il est mesuré à la station de Serres. Ces 2 stations sont situées en amont du barrage de Saint Sauveur. Il existe également une station sur la Méouge, affluent du Buëch entre le barrage de Saint Sauveur et le PAG.

Les débits entrant dans le PAG sont calculés via la relation suivante :

$$Q_{ZC}(t) = 1.8Q_{Serres}(t - 4h) - Q_{deriv}(t - 4h) + Q_{Meouge}(t - 2h)$$

Pour déterminer le débit du Buëch :

- On utilise le débit mesuré à la station de Serres ou à la station du Chambon² ;
- Pour prendre en compte la différence de bassin versant du Buëch entre Serres (771 km²) et la confluence Durance (1490 km², dont BV Méouge 221 km²), un coefficient de 1.8 est utilisé.
- On soustrait le débit turbiné à Lazer ;
- Si le débit obtenu est inférieur au débit réservé, on retient le débit réservé ;

² La station était initialement aux Chambons puis elle a été déplacée à Serres. Le débit à Serres est obtenu en multipliant le débit mesuré aux Chambons par 1/0.94723 km²)

- On ajoute à ce débit celui de la Méouge, avec un décalage temporel.

4.2 DURANCE

Une étude DTG (en cours) a établi les débits du Sasse sur la période 2009-2017 sur la base d'une modélisation hydrologique basée sur des mesures de pluie et un calage sur des jaugeages ponctuels. Ces données ont été utilisées pour le Sasse (BV 292 km²) et pour le bassin versant de la Durance entre la Saulce et la confluence avec le Büech (BV : 620 km² intégrant le Sasse).

Les débits déversés au barrage de la Saulce ont été établis par une analyse GEH pour la période 2010-2017.

Les débits de la branche Durance sont calculés comme étant la somme des déversés au barrage de la Saulce, des apports du Sasse et du bassin versant Durance intermédiaire.

5. CALCUL DES CAPACITES DE TRANSPORT

5.1 BUËCH

5.1.1 Données utilisées

Les données de remplissage du piège depuis 2012 ont permis de définir précisément les apports sédimentaires dans le PAG et ainsi de recalculer à la marge certains paramètres :

- Granulométrie : différents tests ont été réalisés avec les données existantes (granulométrie dans la masse ou en surface de Sogreah, granulométrie dans la masse et de surface établie par le CEREGE)

	Granulométrie Sogreah, cf. [2]		Granulométrie Cerege, cf. [3]	
	Moyenne des 3 granulos dans la masse	Moyenne des 3 granulos de surface	Moyenne des 2 granulos dans la masse (2014-2016 et 2016-2017)	Moyenne des 3 granulos dans masse
Dm	3.6	3.9	3.4	2.8
D16	0.6	1.4	0.7	0.6
D30	1.3	2.1	1.5	1.4
D50	2.3	3	3.1	2.7
D84	6.8	6.5	9.1	7.4
D90	8.4	7	12	9.8

Tableau 1 : Diamètres granulométriques disponibles (cm)

- Largeurs : les largeurs ont été mesurées sur les graphiques issus de Visu-Profiles et sur photo aériennes mais elles sont variables suivant les secteurs. Il est donc possible de faire varier la largeur retenue dans une faible gamme autour des valeurs mesurées.

Aux valeurs d'apports solides, ont été ajoutées 5% de fines pour retrouver les volumes de remplissage du piège, source [3]. Enfin, l'hypothèse prise est qu'aucun sédiment grossier n'est sorti du piège depuis 2012 ; ce point sera vérifié sur le modèle à postériori.

Différents couples granulométrie-largeur ont permis de se recalculer sur les volumes déposés sur le piège : le plus cohérent au regard des mesures réalisées est défini ci-après.

La capacité de transport du Büech et ainsi les apports en sédiments grossiers au droit du PAG, ont été calculés avec les paramètres suivants :

- Formule : Lefort 2014 ;
- Pente amont : 0.5% ;
- Largeur active : 85 m
- Granulométrie : moyenne des 3 granulométries dans la masse utilisées par Sogreah pour le dimensionnement du PAG (cf. [2])
 - o Dm = 36 mm
 - o D50 = 23 mm
 - o D30 = 13 mm
 - o D90 = 84 mm
- Hydrologie : chronique horaire établie au § 4.1.

L'apport total estimé sur la période 2011-2019 (7.5 ans) est de 460 000 m³.

Le graphique *Figure 13* met en regard les volumes calculés cumulés et les volumes cumulés mesurés dans le piège à partir des bathymétries :

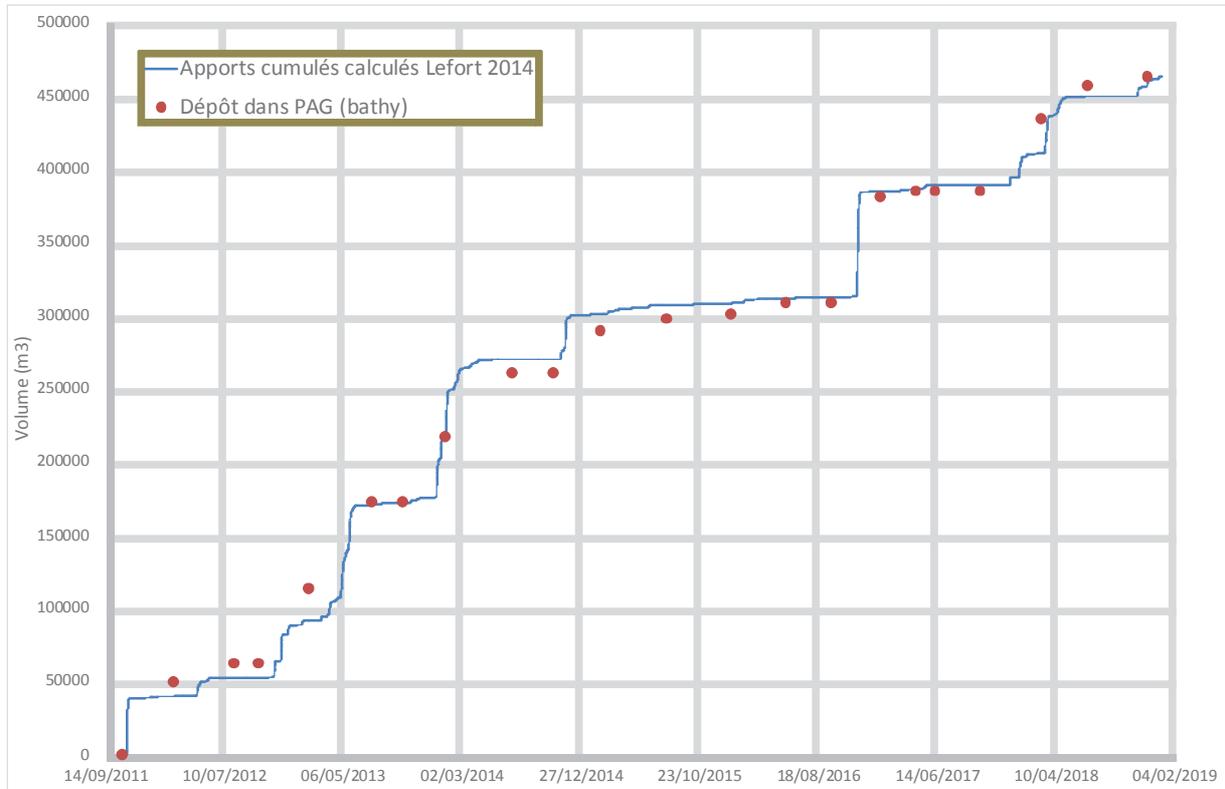


Figure 13. Volumes d'apport calculés et mesurés dans le piège

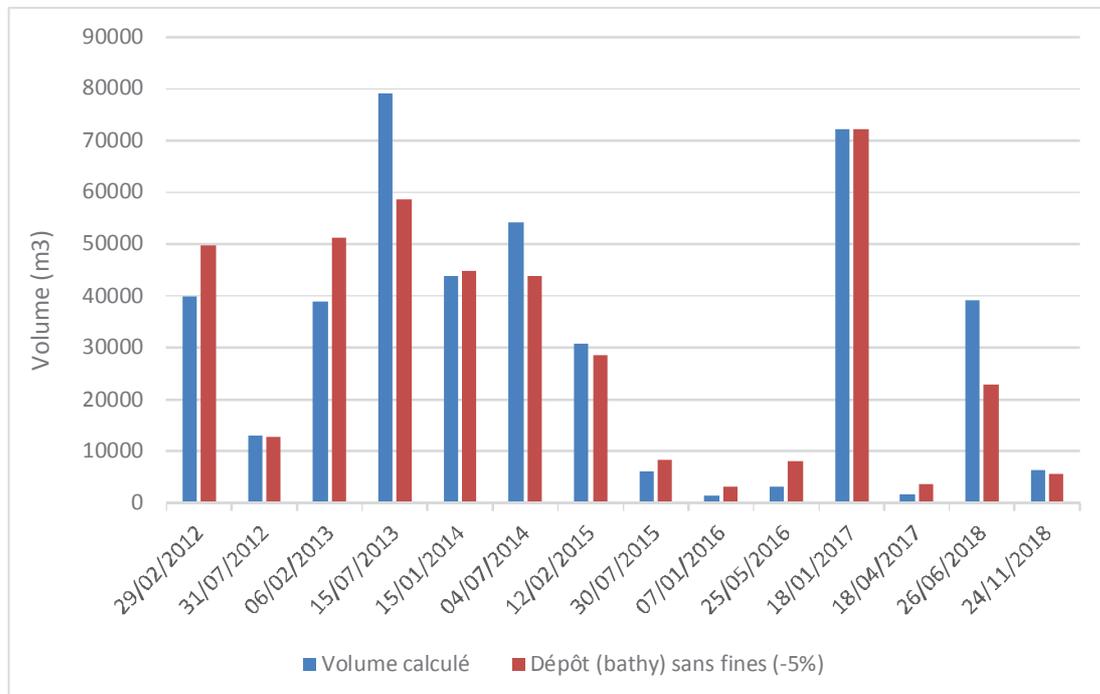


Figure 14. Comparaison du volume d'apport calculé et mesuré pour chaque période

Le graphique *Figure 14* met en regard, pour chaque période où les apports sont non négligeables, les apports calculés et les apports mesurés. L'écart est en moyenne de 6000 m³, soit un écart moyen pondéré de 20%.

On voit que les calculs réalisés reproduisent particulièrement bien les apports sédimentaires réels. Il faut noter qu'il y a des fortes incertitudes sur les calculs (formules analytiques, données d'entrée, etc.) mais également sur les bathymétries (précisions des mesures et surtout étendue du levé : les zones en eau ne sont pas toujours bien levées) et enfin sur la nature même des phénomènes que l'on cherche à représenter. Il paraît ainsi difficile de faire mieux en termes de précision des calculs réalisés.

5.1.2 Apports moyens annuels

Les apports sédimentaires grossiers moyens annuels du Büech ont été estimés à 60 000 m³/an environ avec une très forte variabilité interannuelle en lien avec la variabilité hydrologique. Le graphique montre les apports sédimentaires calculés entre le 01/08 de l'année N et le 01/08 de l'année N+1 sur la période 2007 à 2018 : les apports annuels sont estimés entre 5 000 et 120 000 m³ suivant les années.

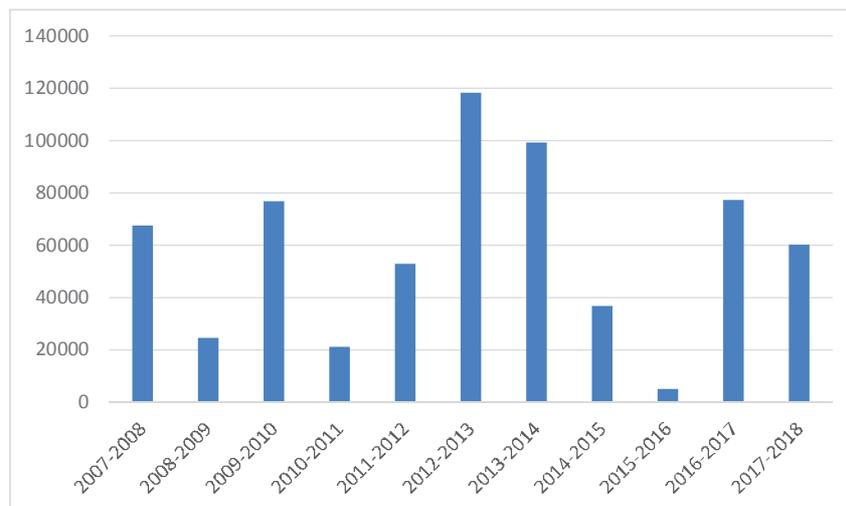


Figure 15. Apports sédimentaires annuels calculés

5.2 DURANCE

Du fait de la présence de la retenue de Serre Ponçon et de l'absence de crues morphogènes, les apports sédimentaires amont de la Durance sont drastiquement limités. On ne dispose pas de données de calage pour affiner l'estimation.

La capacité de transport de la Durance et ainsi les apports en sédiments grossiers dans la retenue de Saint Lazare, ont été calculés avec les paramètres suivants :

- Formule : Lefort 2014 ;
- Pente amont : 0.28% ;
- Largeur active : 80 m ;
- Granulométrie : moyenne des granulométries de surface estimées dans [4] pour les dépôts de type forme fine sans colmatage.
 - o Dm = 25 mm
 - o D50 = 21 mm
 - o D30 = 15 mm
 - o D90 = 48 mm
- Hydrologie : chronique horaire établie au § 4.2.

Les apports annuels moyens de la Durance en sédiments grossiers ont été estimés à 3 500 m³/an sur la période 2010-2018, soit 5% de ceux du Büech.

6. REALISATION DES MODELES HYDROSEDIMENTAIRES

6.1 MODELE REALISE

Dans un premier temps, l'objectif de la modélisation hydrosédimentaire est de tester quel serait l'impact de l'arrêt des curages puis d'optimiser les curages du piège. Pour cela, le logiciel Cavalcade (logiciel de modélisation hydrosédimentaire 1D @ARTELIA) a été utilisé.

Le modèle réalisé s'étend depuis la carrière sur le Büech jusqu'à la confluence avec la Durance puis sur l'ensemble de la retenue de Saint Lazare de la confluence au barrage. La Durance, en amont de la confluence avec le Büech, est considérée comme un apport liquide et solide mais n'est pas modélisée directement.



Figure 16. Etendue du modèle

Les principales données et paramètres utilisés ont été décrits dans les paragraphes précédents.

La cote aval du modèle correspond au niveau mesuré au barrage pendant la période modélisée (code Archimède A.SALIG/R.SSLAZ/M.Ham). Le capteur est hors de sa plage de fonctionnement lors des abaissements en dessous de la cote 458.5 m NGF environ. Le principal abaissement modélisé est celui de la crue de 11/2016, les données ont été remplacées par celles mesurées au capteur Vega pour cette crue.

6.2 MODELE SEDIMENTS GROSSIERS VERSUS SEDIMENTS FINS ?

La modélisation hydraulique réalisée dans le cadre de l'état cible de 2010 est limitante car à fond fixe, elle ne prend donc pas en compte les évolutions au cours de la crue.

La retenue de Saint Lazare ainsi que les 2 branches Büech et Durance ont un fonctionnement morphologique particulièrement complexe :

- Des apports de sédiments grossiers importants depuis le Büech et limités depuis la Durance ;
- Des apports en sédiments fins non négligeables et qui se stockent préférentiellement dans la retenue, entraînant un exhaussement des fonds importants entre 2 abaissements en crue.

Cette étude a pour objectif d'utiliser le REX acquis grâce à l'exploitation du PàG pendant 6 ans pour optimiser sa gestion. Le PàG a un fonctionnement directement lié aux sédiments grossiers (la proportion de sédiments fins stockés dans le piège a été estimée à 5 %, cf. [3]).

La modélisation de la branche Büech et du PàG nécessite de disposer d'un niveau d'eau connu en aval : la modélisation de la retenue et des niveaux au barrage est donc indispensable. Or, la retenue, notamment sa partie aval, est le siège d'un dépôt de sédiments fins. Toutefois, il n'existe pas de logiciel de modélisation hydrosédimentaire permettant de modéliser des sédiments grossiers et fins simultanément.

Il a donc été décidé pour modéliser le PàG, de modéliser également la retenue avec un logiciel hydrosédimentaire sédiments grossiers et :

- de ne pas prendre en compte le dépôt de sédiment fin dans les phases où le barrage est fermé,
- de prendre en compte l'érosion des fins en crue en considérant que cette érosion est immédiate : le profil post-crue est imposé en aval de la confluence dès le début de la modélisation lorsque la crue seule est modélisée.

Ces limites du modèle sont précisées et prises en compte dans l'analyse des résultats.

6.3 CALAGE

Préalablement à son utilisation en prédictif, le modèle doit être calé sur la période de fonctionnement du piège.

Le modèle hydrosédimentaire a ainsi été calé sur la période 2012-2017 :

- 2012 : début du fonctionnement réel du piège
- 2017 : fin de la disponibilité de certaines données.

En réalité, pour plus de précisions, le calage a été réalisé sur les 5 périodes entre les curages puis le profil en long a été mis à jour avec les bathymétries pour reprendre le calage suivant.

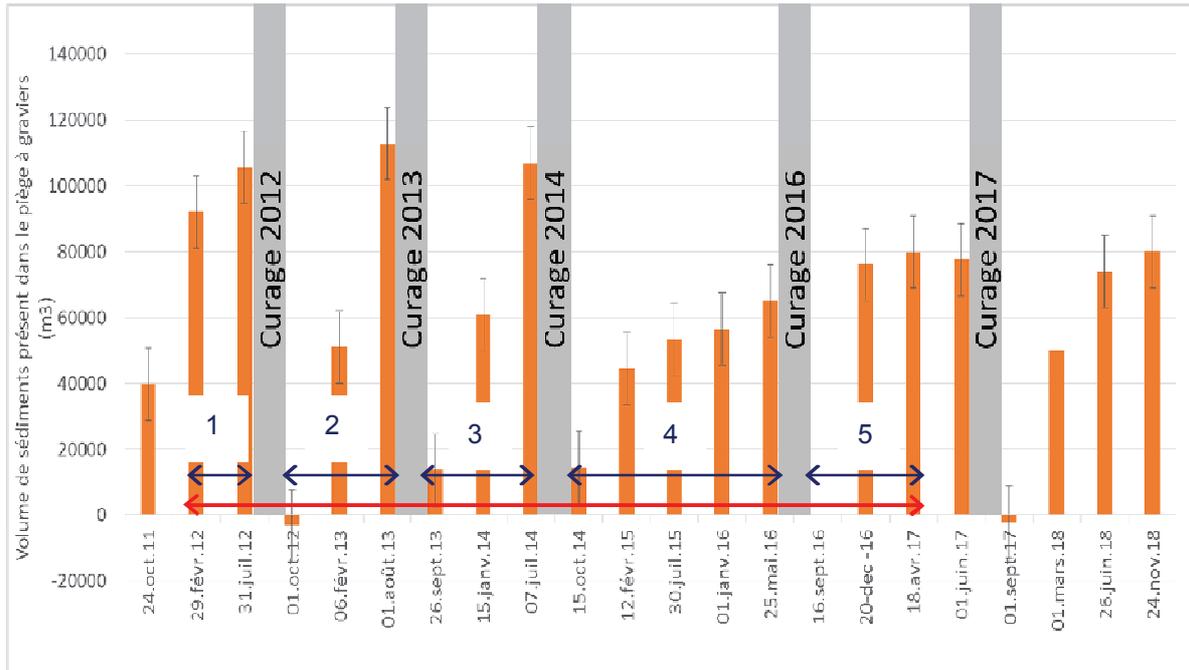


Figure 17. Période de calage des modèles

Le calage s'est fait principalement sur la branche Büech pour les 4 premiers modèles du fait de l'absence d'évolution de la partie retenue de Saint Lazare en lien avec les sédiments grossiers hors abaissement de la retenue.

Les résultats obtenus sont les suivants pour la période 4 (les résultats pour les périodes 2 et 3 sont détaillés en annexe. La période 1 n'est pas figurée car les évolutions sont très faibles) :

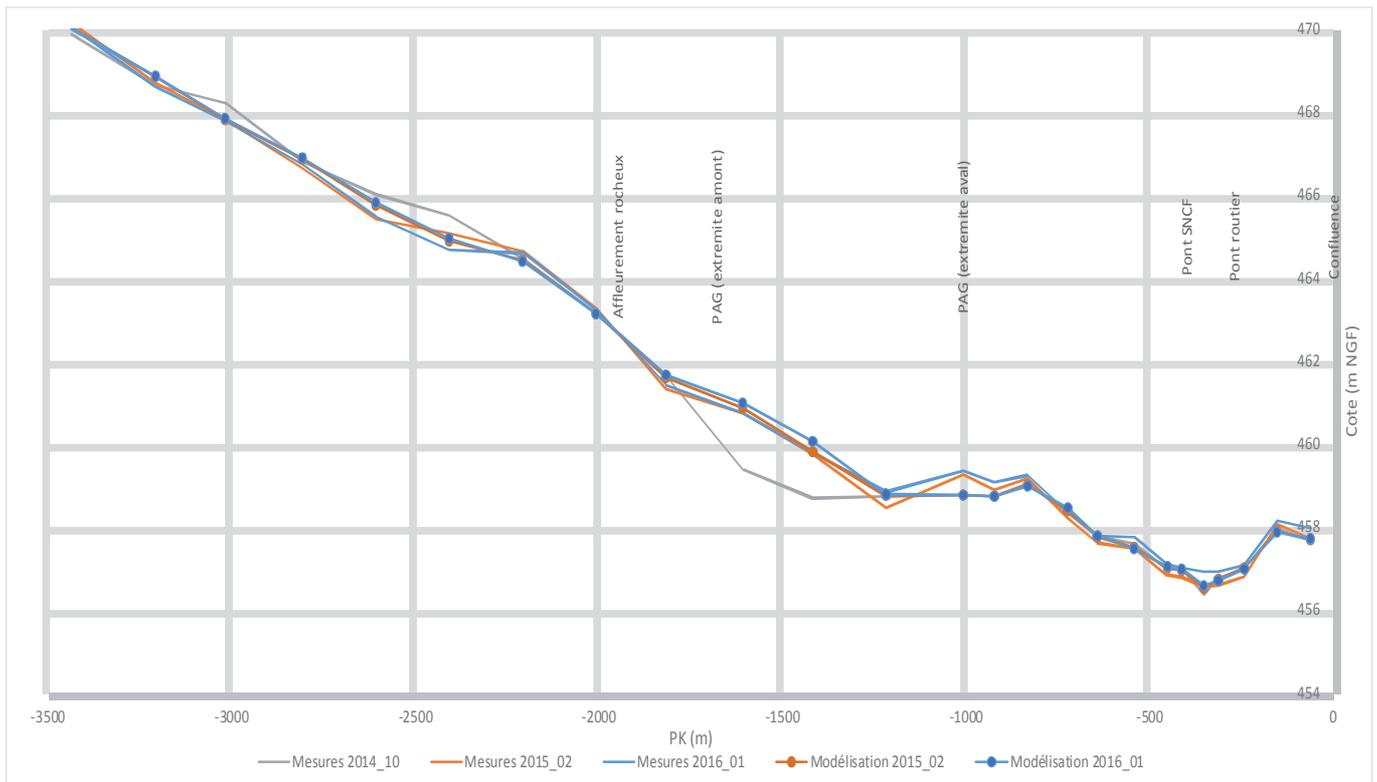
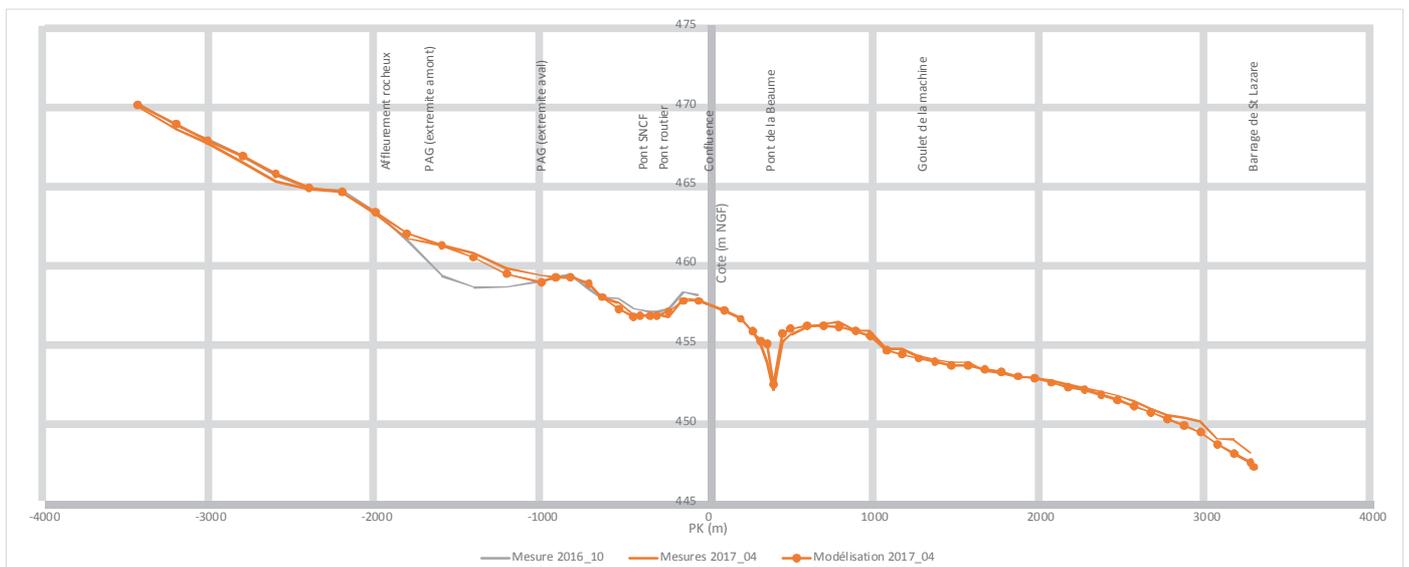


Figure 18. Comparaison des profils en long mesurés et simulés pour le calage 4

Pour la période 5, qui entoure la crue de novembre 2016, le niveau des fonds dans la retenue de Saint Lazare est important. Or, cf. § 3.3, l'absence d'abaissement de la retenue de Saint Lazare entre 2012 et 2016 a entraîné un important exhaussement des fonds du fait des dépôts de sédiments fins. L'ouverture du barrage et l'abaissement lors de la crue de novembre 2016 a permis de retrouver les niveaux de 2012, avec une érosion de près de 4m par rapport aux niveaux de 12/2015. Ces évolutions : dépôt entre 2012 et 2016 et érosion entre 2016 et 2017 sont en lien avec les sédiments fins et ne peuvent donc pas être reproduites avec un modèle de sédiments grossiers. Pour modéliser cette période et reproduire les évolutions des fonds sur la branche Buëch, il a été choisi de partir artificiellement du niveau des fonds après la crue en aval de la confluence, cf. § 6.2.



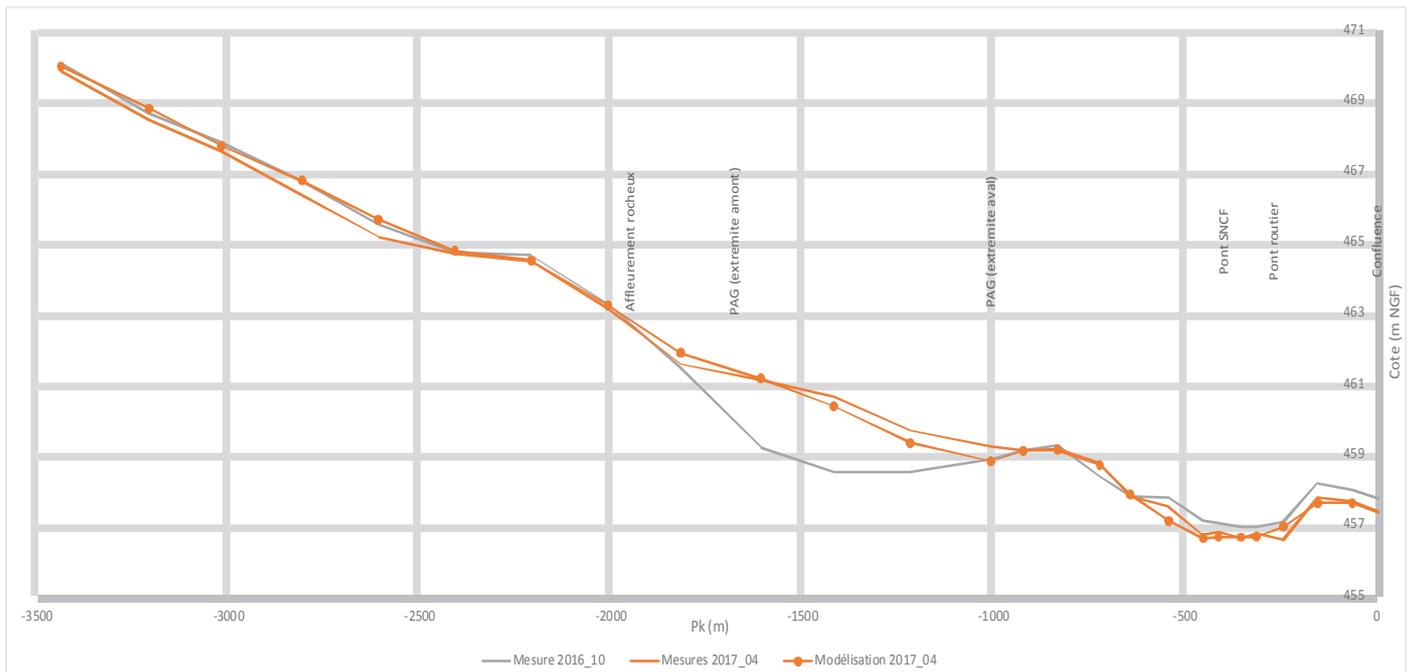


Figure 19. Comparaison des profils en long mesurés et simulés pour le calage 5

Le calage a été jugé très correct pour les 5 périodes. Le modèle peut alors être utilisé en prédictif.

NB : Ces résultats sont basés sur des modélisations hydrosédimentaires à fond mobile. L'ensemble de ces calculs et les données de base utilisées sont soumis à une forte incertitude. La poursuite d'un suivi in-situ est nécessaire pour valider les tendances données par le modèle.

7. MODELISATION DE L'ARRET DES CURAGES

7.1 PARAMETRES DU MODELE

Le modèle calé tel que décrit au paragraphe 6.3 est réutilisé pour évaluer quel serait l'impact en terme d'évolution des fonds de l'arrêt des curages réalisés depuis 2012 dans le PAG.

La période utilisée pour le calage, soit entre le 29/02/2012 et le 18/04/2017, est réutilisée et modélisée 3 fois successivement de manière à représenter 15 ans d'apport sans curage.

Le modèle est prolongé en amont jusqu'au pont de Ribiers de manière à pouvoir visualiser la prolongation du remous solide vers l'amont sur un linéaire plus conséquent.

Comme on peut le voir sur la *Figure 9*, le niveau de fond de 2012 et 2017 sont très proches dans la retenue de Saint Lazare (les érosions lors de la crue de novembre 2016 ont compensé les dépôts de sédiments fins lors de la période 2012-2016). Cela nous a permis de laisser le niveau de fond de 2012 pour les modèles afin de voir jusqu'où se propagent les graviers non arrêtés par le PAG et quelles sont les conséquences sur les niveaux de fond dans la branche Durance. Les apports de sédiments fins et leur dépôt ne sont pas représentés ici.

Les apports sédimentaires grossiers sur la période 2012-2017 ont été estimés à 310 000 m³ depuis la branche Buëch et à 10 000 m³ depuis la branche Durance, soit près de 1 millions de m³ en 15 ans.

7.2 RESULTATS OBTENUS

On note un dépôt régressif en 15 ans sur plus de 8 km en amont de la confluence. L'ensemble des sédiments entrants se stockent dans la retenue et dans le remous solide de la branche Buëch. Les sédiments sortants du modèle sont évacués uniquement pendant la crue de 11/2016 mais ils correspondent à des sédiments déjà présents dans la partie aval de la retenue.

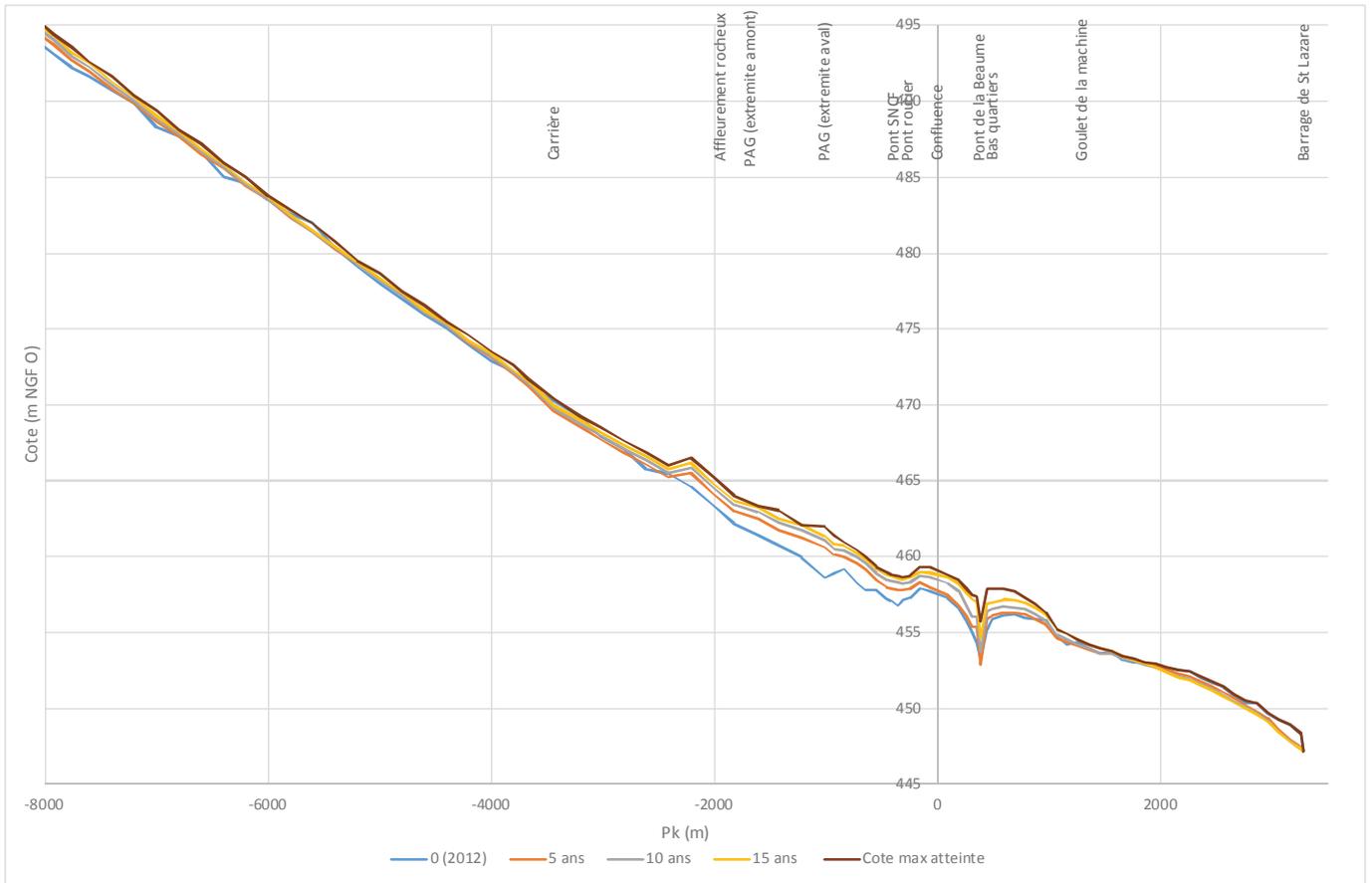


Figure 20. Exhaussement suite à l'arrêt des curages

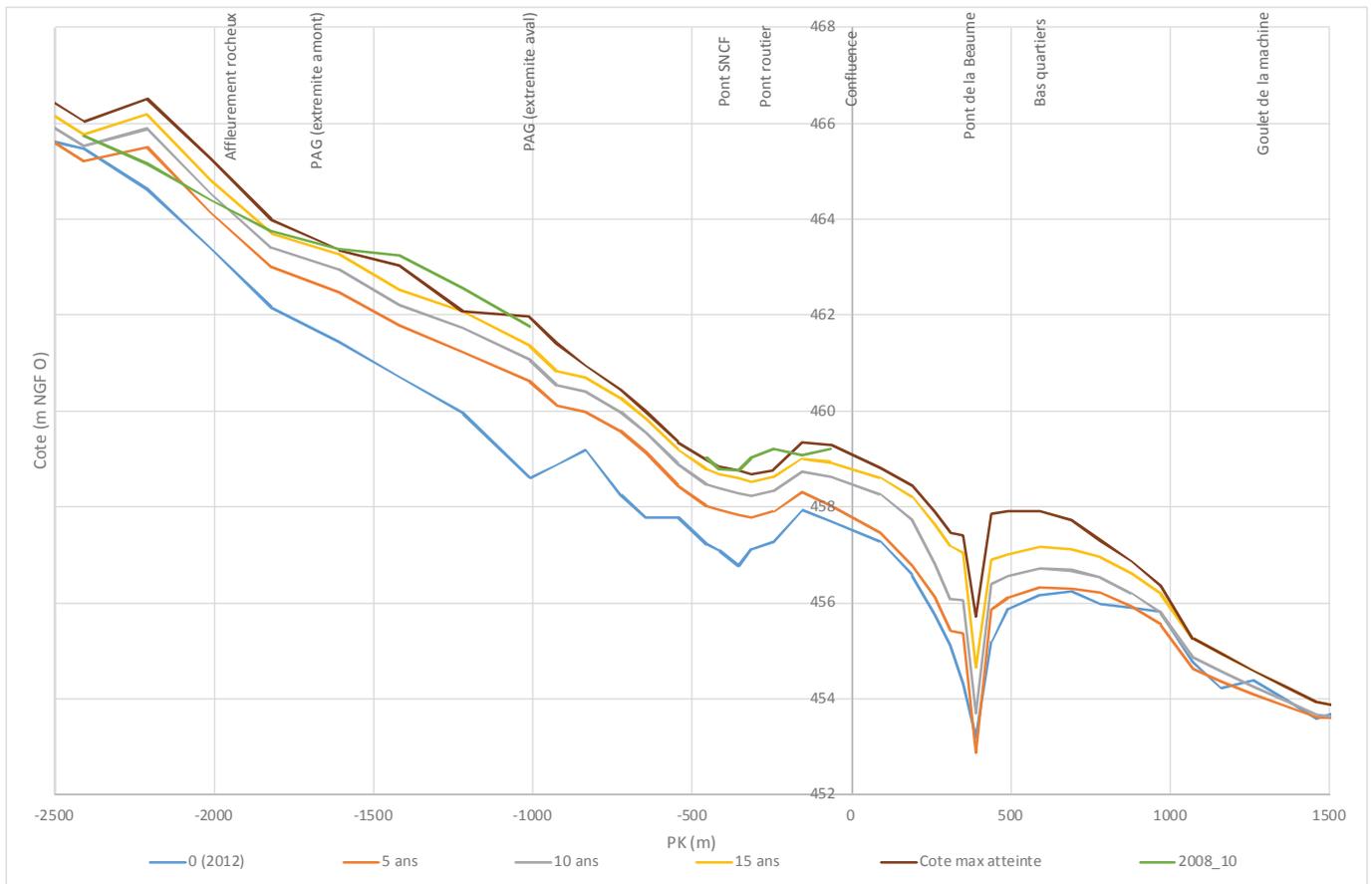


Figure 21. Exhaussement suite à l'arrêt des curages (zoom)

On note (cf. Figure 21) :

- un exhaussement sur la branche Büech où on réatteint les niveaux d'avant le recalibrage de 2010-2011, cf. niveau en 10/2008 ;
- l'exhaussement de la branche Büech et le remous solide qui se propage vers l'amont limite les apports solides dans la retenue de Saint Lazare ;
- un exhaussement de plus de 1 m (457.2 m NGF) au niveau des bas quartiers en 15 ans et qui atteint près de 2 m (457.9 m NGF) avant le passage de la 3^{ème} itération de la crue de 11/2016 ; Les cotes atteintes sont de 1.4 à 2.5 au-dessus du niveau d'état cible
- un exhaussement de 1.5 m à 2 m à la confluence Büech-Durance avec un impact certain sur la ligne d'eau au droit des Coudoulets (non modélisée) ;
- au bout de 15 ans, la pente dans la retenue n'est toujours pas suffisante pour laisser passer les sédiments entrants avec les abaissements (niveaux aux barrages mesurés sur la période 2012-2017). La restriction de largeur au droit du goulet de la Machine favorise probablement les dépôts de cailloux en amont du fait des niveaux d'eau qu'elle provoque en amont avec pour conséquence des apports en sédiments grossiers faibles en aval.

L'objectif de l'état cible 2010 est d'essayer d'atteindre des niveaux de fonds plus bas que ceux de 2012, notamment au droit des bas quartiers. L'arrêt des curages, avec la gestion actuelle des aménagements, nous éloignerait largement de cette cible.

Les principales conséquences d'un arrêt des curages se produisent sur la branche Büech où les enjeux existants sont limités et permettent une remontée du lit. Mais une part des apports du Büech atteint la Durance (190 000 m³ soit 20 %) avec une forte augmentation entre les cycles modélisés de 5 ans (9% puis 24% puis 29 %).

En cas d'arrêt des curages, les apports en sédiments grossiers dans la retenue de Saint Lazare ne sont pas acceptables du fait des exhaussements cumulés qu'ils provoquent dans des zones à forts enjeux soumis au risque d'inondation (confluence et donc Coudoulets et Bas Quartiers). Par contre, le fait que la majorité des dépôts se produisent sur la branche Buëch où les enjeux sont limités, laisse penser que si certaines années avec un apport sédimentaire exceptionnel, le piège est plein et qu'une part des sédiments passe à l'aval du piège, les conséquences seront limitées.

Par conséquent, il a été décidé de travailler sur l'optimisation des curages dans le piège.

8. OPTIMISATION DES CURAGES

8.1 PRINCIPES

Les objectifs d'une optimisation des curages réalisés dans le piège sont de curer moins afin de limiter l'érosion régressive notée à l'amont et de limiter les coûts. Limiter les volumes curés permet également éventuellement de limiter la fréquence de curage. Un curage avec une fréquence de 2 ans versus 1 an permet de limiter les interventions sur le milieu et les coûts d'amené-replis et donc les coûts de curage. La méthodologie retenue est la suivante :

- dans un premier temps, définir un volume de curage en cas de curage annuel ou tous les 2 ans
- dans un second temps, bien comprendre le fonctionnement du piège actuel.
- Enfin, modéliser une période type afin d'évaluer les conséquences des modifications des curages sur les volumes de sédiments sortants du piège ainsi que sur les exhaussements constatés dans la branche Durance et sur les érosions coté Buëch.

8.2 VOLUME DU PIEGE

Un traitement des données hydrologiques puis des calculs d'apport du Büech ont été réalisés sur la période la plus large avec des données disponibles, soit entre 2007 et 2018. Les résultats en terme de volume d'apport annuel (du 01/08/N au 01/08/N+1) sont indiqués ci-dessous :

NB : les calculs ont été réalisés du 01/08/N au 01/08/N+1 car les curages sont réalisés autour de cette date.

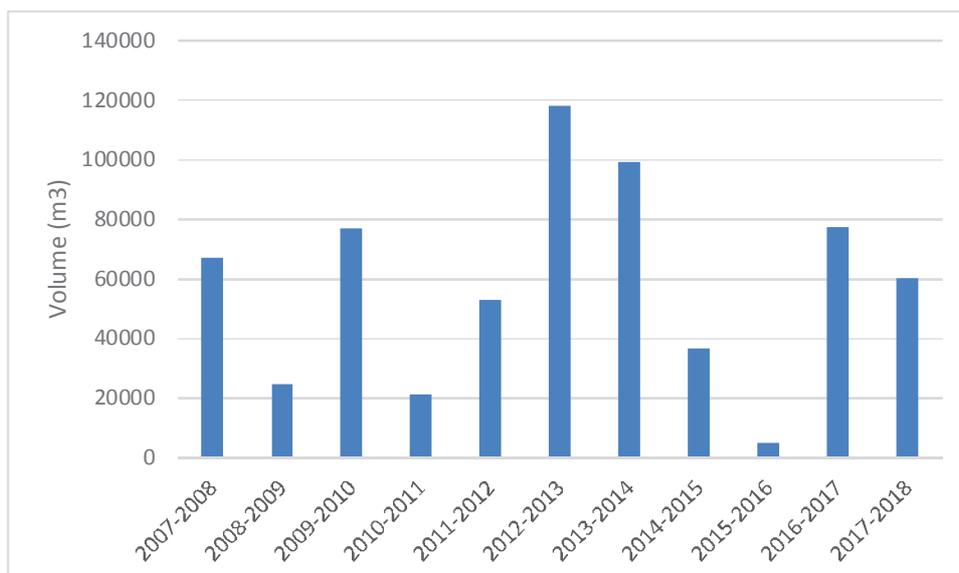


Figure 22. Variabilité interannuelle des apports sédimentaires grossiers du Büech au niveau de l'emplacement du PAG

On note une forte variabilité des apports sédimentaires.

	Apports annuels	Apports 2 ans cumulés
Min	5 000	42 000
Max	120 000	220 000
2ème max	100 000	170 000
Moyenne	58 000	115 000

Tableau 2 : Analyse des apports sédimentaires (2007-2018)

Les analyses réalisées sur l'arrêt des curages et les connaissances sur le fonctionnement des pièges en rivière permettent de se fixer les règles suivantes :

- Il faut stocker l'ensemble des apports sédimentaires du Büech ;
- Si certaines années d'apport exceptionnel, une faible part des apports sort du piège, cela reste acceptable car avec des conséquences limitées sur la branche Durance, sensible aux inondations ;
- Jusqu'à 80% de remplissage environ, un piège stocke la quasi intégralité des apports sédimentaires grossiers ; à contrario avec un remplissage supérieur à 80%, il ne stocke qu'une part limitée des apports ;
- Il est nécessaire que le piège soit quasi plein pour exhausser le lit à l'amont immédiat du piège grâce au remous solide, et ainsi annuler la chute au droit de l'affleurement rocheux.

Il a donc été retenu comme objectif :

- Pour un curage annuel :
 - o pouvoir stocker 120 000 m³ ;
 - o c'est à dire l'apport maximal annuel sur les 10 dernières années
- Pour un curage tous les 2 ans :
 - o pouvoir stocker 170 000 m³ ;
 - o c'est-à-dire le deuxième cumul maximum de 2 années consécutives ;
 - o sur 10 ans : il y a moins d'une chance sur 2 qu'il y ait une année où des sédiments passent à l'aval du piège car si c'est la première des 2 années qui est exceptionnelle, on peut décider de curer.

8.3 FONCTIONNEMENT DU PIEGE ACTUEL

Une modélisation du piège actuel sur la période 2012-2017 a été réalisée sans le curer pour voir à partir de quel volume entrant, il est suffisamment plein pour laisser passer des sédiments :

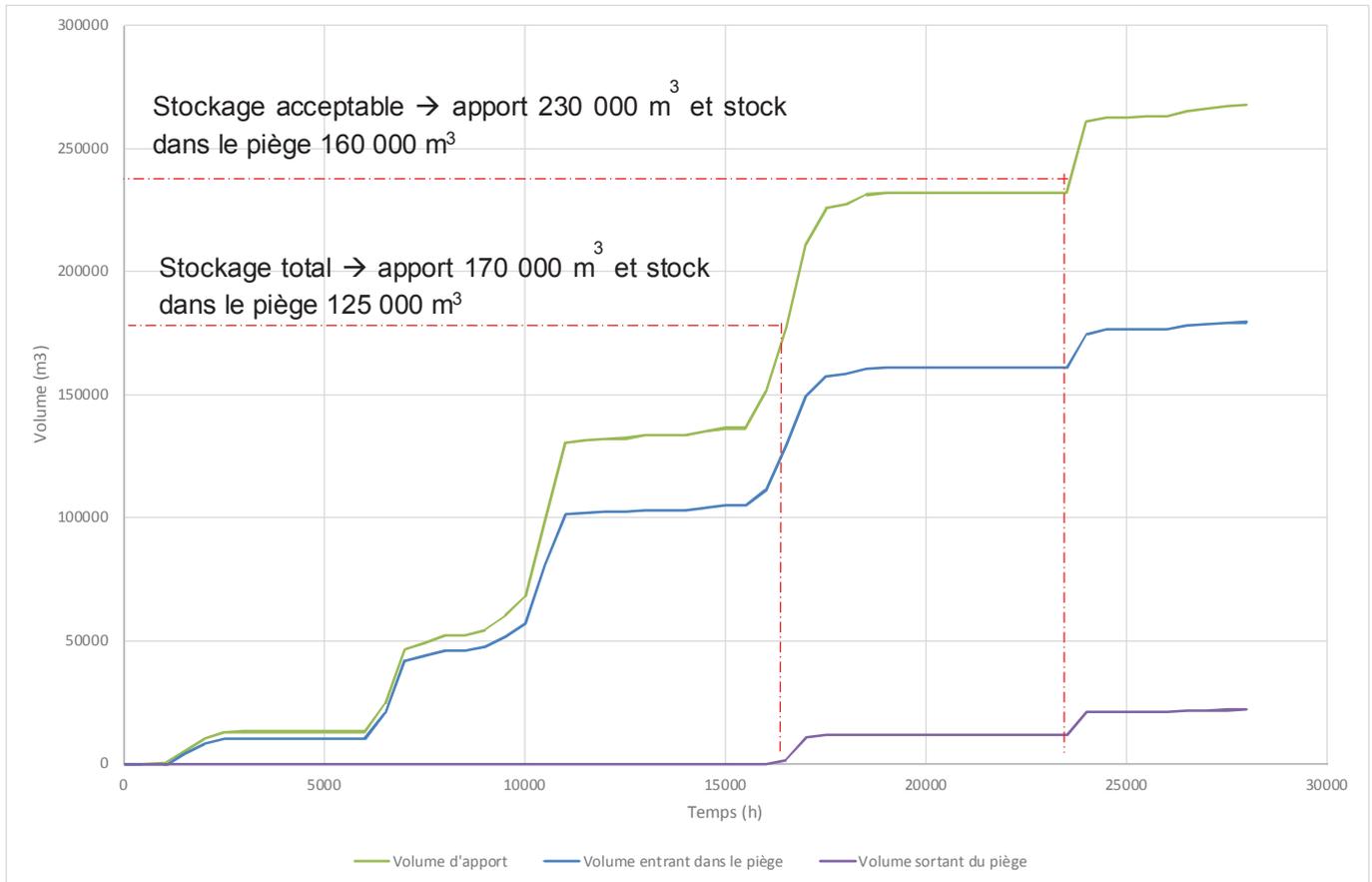


Figure 23. Fonctionnement du piège actuel

Le volume d'apport à stocker souhaité est de respectivement 120 000 et 170 000 m³ pour un curage tous les ans ou tous les 2 ans. Le piège actuel est capable de supporter un apport de 230 000 m³ avant que les volumes sortants soient conséquents.

Comme on a vu qu'il est acceptable qu'une faible part des matériaux sorte du piège et qu'on souhaite qu'il soit parfois plein pour limiter la chute au droit de l'affleurement rocheux, des tests ont été réalisés sur un piège raccourci de 100 mètres en longueur (sur 600m initialement) depuis l'amont afin de s'éloigner de l'affleurement rocheux.

NB : La différence entre volume d'apport et volume entrant dans le piège est due aux dépôts qui se produisent en amont du piège en lien avec les premiers dépôts dans le piège qui entraînent un remous solide (illustration Figure 26).

8.4 FONCTIONNEMENT DU PIEGE RACCOURCI (100M)

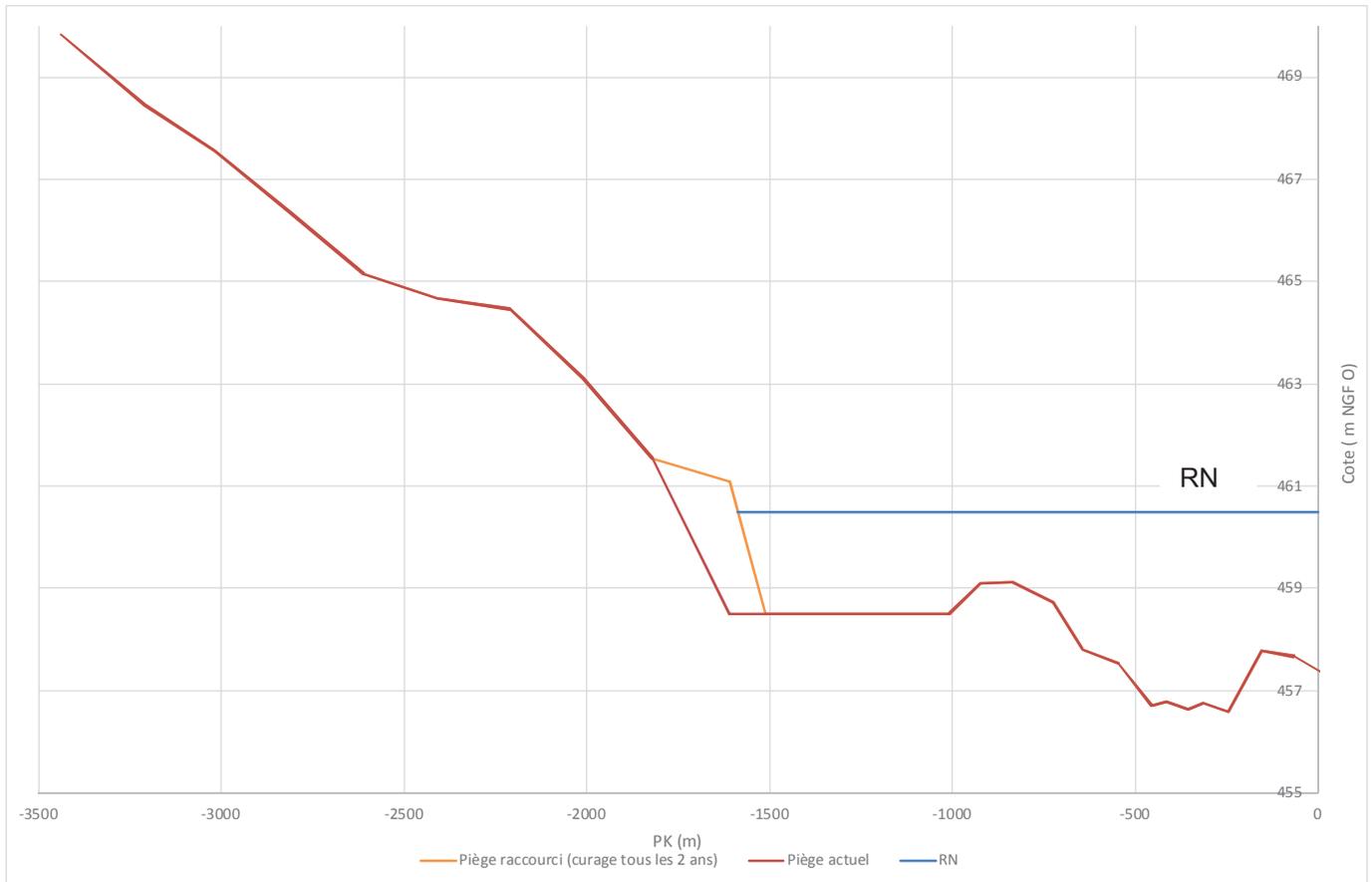


Figure 24. Piège à gravier raccourci de 100m depuis l'amont

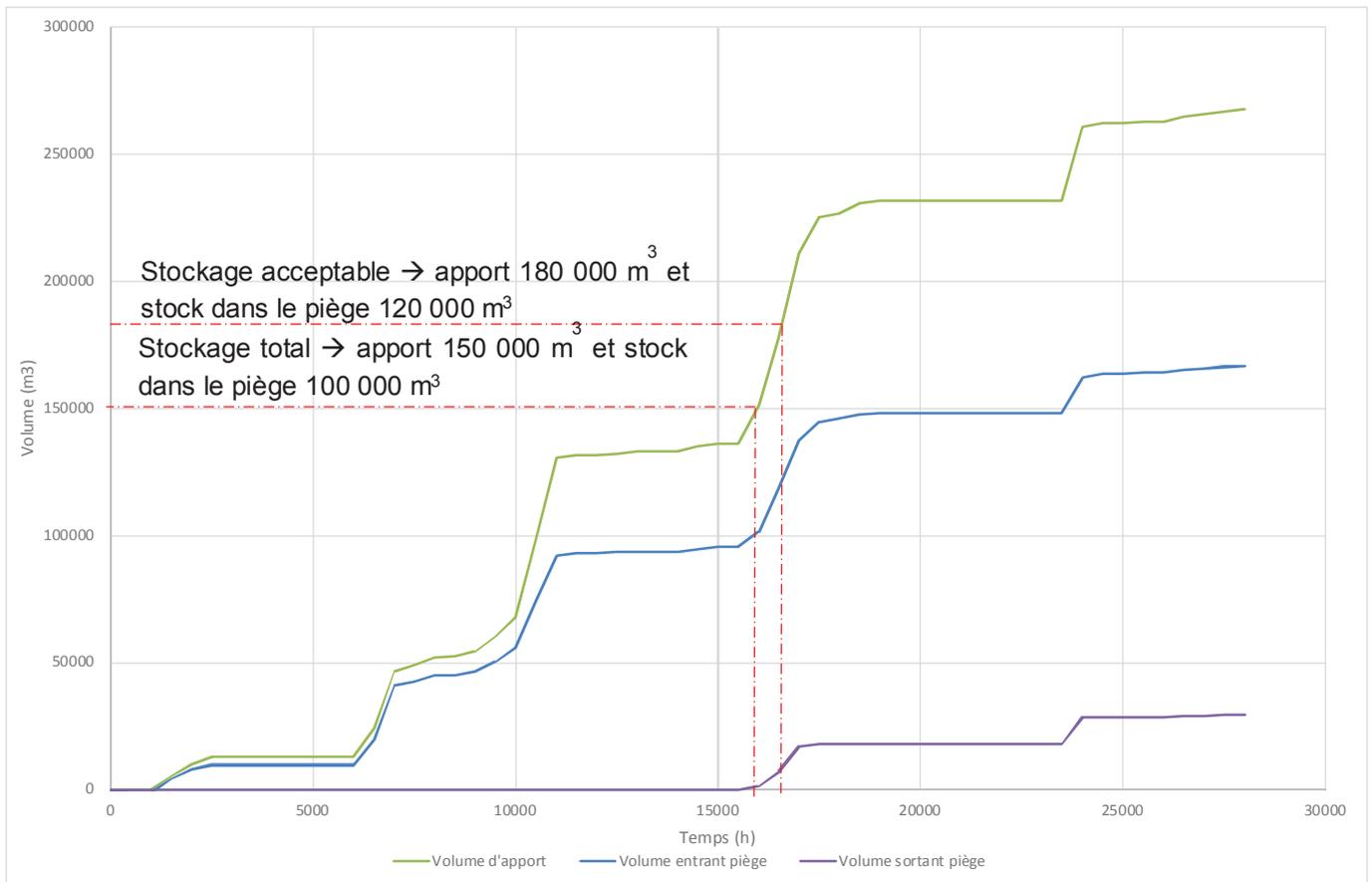


Figure 25. Fonctionnement du piège raccourci de 100 m

Un stockage acceptable (c'est-à-dire qui ne laisse passer qu'une faible part des entrants) dans ce piège raccourci est estimé à 180 000 m³ d'apports ; soit notre objectif pour un curage tous les 2 ans.

La modélisation a également permis de déterminer pour quel apport, les dépôts commencent à protéger l'affleurement rocheux.

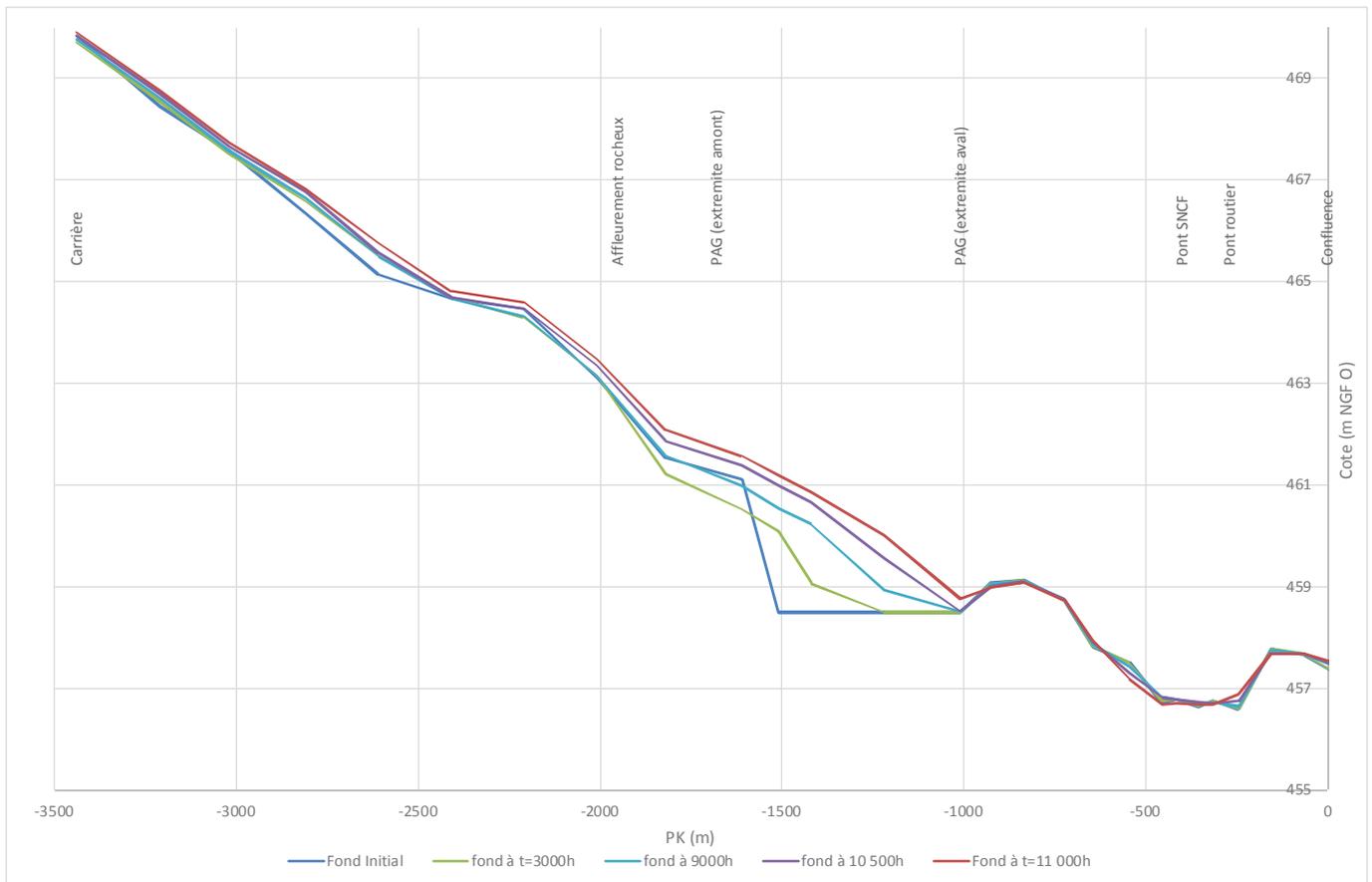


Figure 26. Protection de l'affleurement rocheux (configuration piège raccourci)

On voit sur la Figure 26 que l'affleurement est recouvert par le remous solide au temps 10 500 h, ce qui correspond (cf. Figure 25) à un apport de 100 000 m³, soit quasi 2 ans d'apport moyen et à un stockage de 75 000 m³ dans le piège.

En premier approche un piège raccourci de 100 m paraît donc convenir à un curage tous les 2 ans.

8.5 PIEGE CURE TOUS LES 2 ANS

8.5.1 Période 2009-2017

8.5.1.1 Données utilisées

Une modélisation du fonctionnement de ce piège raccourci avec apport réels et curages a été réalisée avec les paramètres suivants :

- La période de modélisation utilisée va du 01/08/2009 au 01/08/2017 ;
- Un curage du piège est modélisé tous les 2 ans soit au 01/08/2011, 01/08/2013, 01/08/2015 ; quels que soient les apports entrants réels ;
- Les curages sont réalisés jusqu'à la cote 458.5 m NGFO ;
- La topographie initiale correspond à celle de 04/2017 (données topographiques complètes et récentes) ;

Les apports calculés pour les différentes périodes sont les suivants :

Période	Volume d'apport (m ³)
2009-2011	100 000
2011-2013	170 000
2013-2015	135 000
2015-2017	80 000

Tableau 3 : Volume d'apport pour 2 années consécutives (période 2009-2017)

Aucun de ces volumes ne dépasse le volume de dimensionnement du piège. Une autre période sera modélisée pour tester une situation plus critique (cf. § 8.5.2).

8.5.1.2 Résultats obtenus

Le graphique présente les niveaux de fond obtenus avant chacun des curages tous les 2 ans :

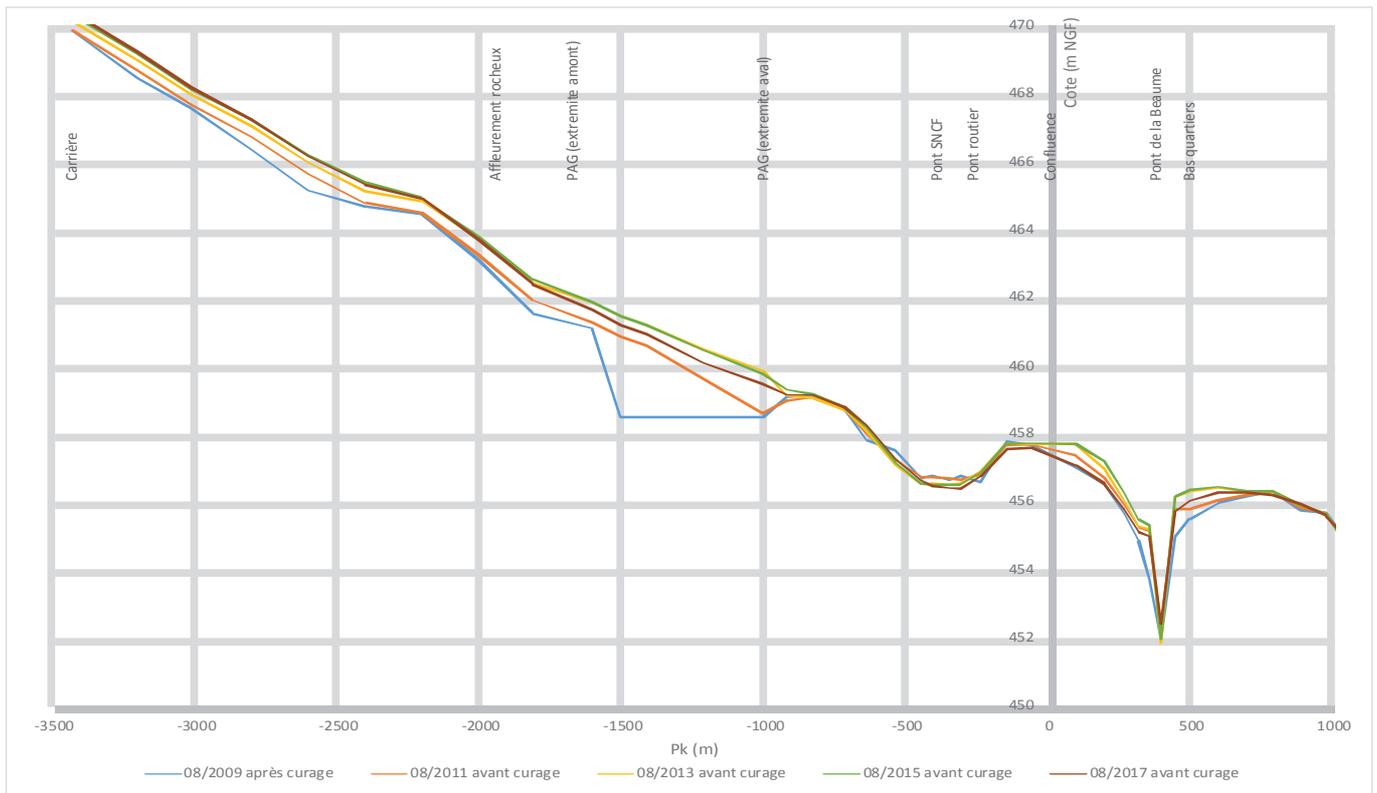


Figure 27. Evolution du fond avec un piège raccourci curé tous les 2 ans (période 1)

Il n'y a pas d'évolution majeure des niveaux de fond en aval du piège. L'abaissement lors de la crue de novembre 2016 permet de retrouver les niveaux de fonds initiaux au niveau de la confluence. Il reste un dépôt résiduel de 30 cm (456.3 m NGF) au niveau des bas quartiers (hors prise en compte des dépôts de sédiments fins non modélisés ici). Le dépôt maximal est de 0.5 m au niveau des bas quartiers, avant la crue de 2016 (456.5 m NGF).

Les niveaux atteints sans curage dans le piège sont respectivement de 457.3 et 457.9 après ou avant la crue de 2016, soit plus d'1 m plus haut (non représentés sur la Figure 27, cf. Figure 21).

On note un exhaussement continu en amont du piège qui permet d'éviter toute érosion au niveau de l'affleurement rocheux, celui-ci est recouvert par les sédiments.

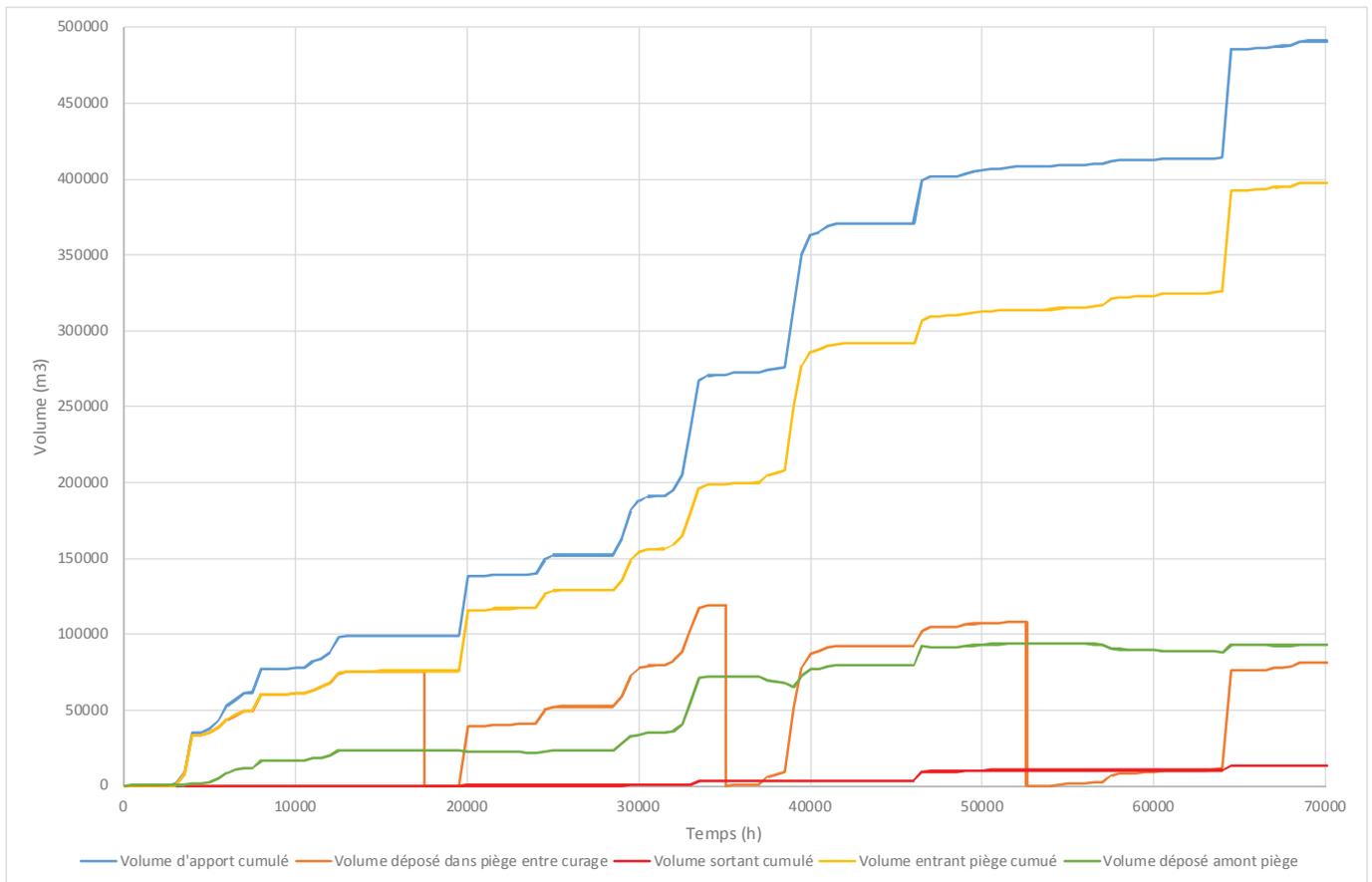


Figure 28. Fonctionnement du piège raccourci en termes de volume sur la période 1

La Figure 28 montre le fonctionnement du piège en termes de volume. On voit que les sédiments sortants du piège ne représentent que 13 000 m³ en cumulé en 8 ans, soit moins de 3% du volume d'apport (490 000 m³). Une part non négligeable (95 000 m³, soit 20%) se stocke en amont du piège du fait du remous solide.

Le volume stocké dans le piège est en cumulé de 385 000 m³ ; ce qui représenterait 4 campagnes en 8 ans :

- 2011 : 75 000 m³ ;
- 2013 : 120 000 m³ ;
- 2015 : 110 000 m³ ;
- 2017 : 80 000 m³.

On ne curerait que 80 % des apports entrants du fait du stockage sur le linéaire amont du piège, ce qui représente un gain par rapport au fonctionnement actuel. Par ailleurs, le curage ne se ferait qu'un an sur 2, donc avec moins d'intervention sur le milieu et d'amenés-replis.

Les résultats obtenus sont conformes aux attendus et montrent qu'il semble possible d'optimiser les curages en ne curant qu'un an sur 2 et en diminuant la taille du piège.

Il faut toutefois noter que les exhaussements visibles notamment avant l'abaissement de 2016 sont le signe qu'il est indispensable de réaliser en parallèle des chasses régulières de la retenue de Saint Lazare dès que l'hydrologie est suffisante, d'autant plus que les dépôts de sédiments fins n'ont pas été modélisés ici. La nouvelle consigne de crue (2015) permet de réaliser ces chasses plus fréquemment.

On peut également craindre un risque de remplissage excédentaire du piège, notamment la 2^{ème} année après un curage ; qui nécessitera de se fixer des règles en cas de remplissage excessif la première année. Une configuration moins favorable va ainsi être testée, cf. § 8.5.2.

8.5.2 Période 2012-2018

8.5.2.1 Données utilisées

Une deuxième modélisation du fonctionnement de ce piège raccourci a été réalisée sur une période moins favorable et comparable avec le fonctionnement réel du piège depuis 2012, avec les paramètres suivants :

- La période de modélisation utilisée va du 01/08/2012 au 01/08/2018 ;
- Un curage du piège est modélisé tous les 2 ans soit au 01/08/2014, 01/08/2016, 01/08/2018 ; quels que soient les apports entrants réels ;
- Les curages sont réalisés jusqu'à la cote 458.5 m NGFO ;
- La topographie initiale correspond à celle de 04/2017 ;

Les apports calculés pour les différentes périodes sont les suivants :

Période	Volume d'apport (m ³)
2012-2014	215 000
2014-2016	40 000
2016-2018	140 000

Tableau 4 : Volume d'apport pour 2 années consécutives (période 2012-2018)

Cette période pourra être comparée à ce qui s'est réellement passé puisqu'elle correspond à la période d'exploitation du piège.

La période 2012-2014 a été sujette à des apports sédimentaires importants : 215 000 m³ en deux ans pour des apports moyens annuels évalués à 60 000 m³/an.

Il faut noter que l'année 2012-2013, les apports ont été de près de 120 000 m³, soit 2 ans d'apport moyen ; il aurait donc peut-être été décidé de curer. Un seuil de remplissage du piège devra être défini.

8.5.2.2 Résultats obtenus

Le graphique présente les niveaux de fond obtenus avant chacun des curages tous les 2 ans :

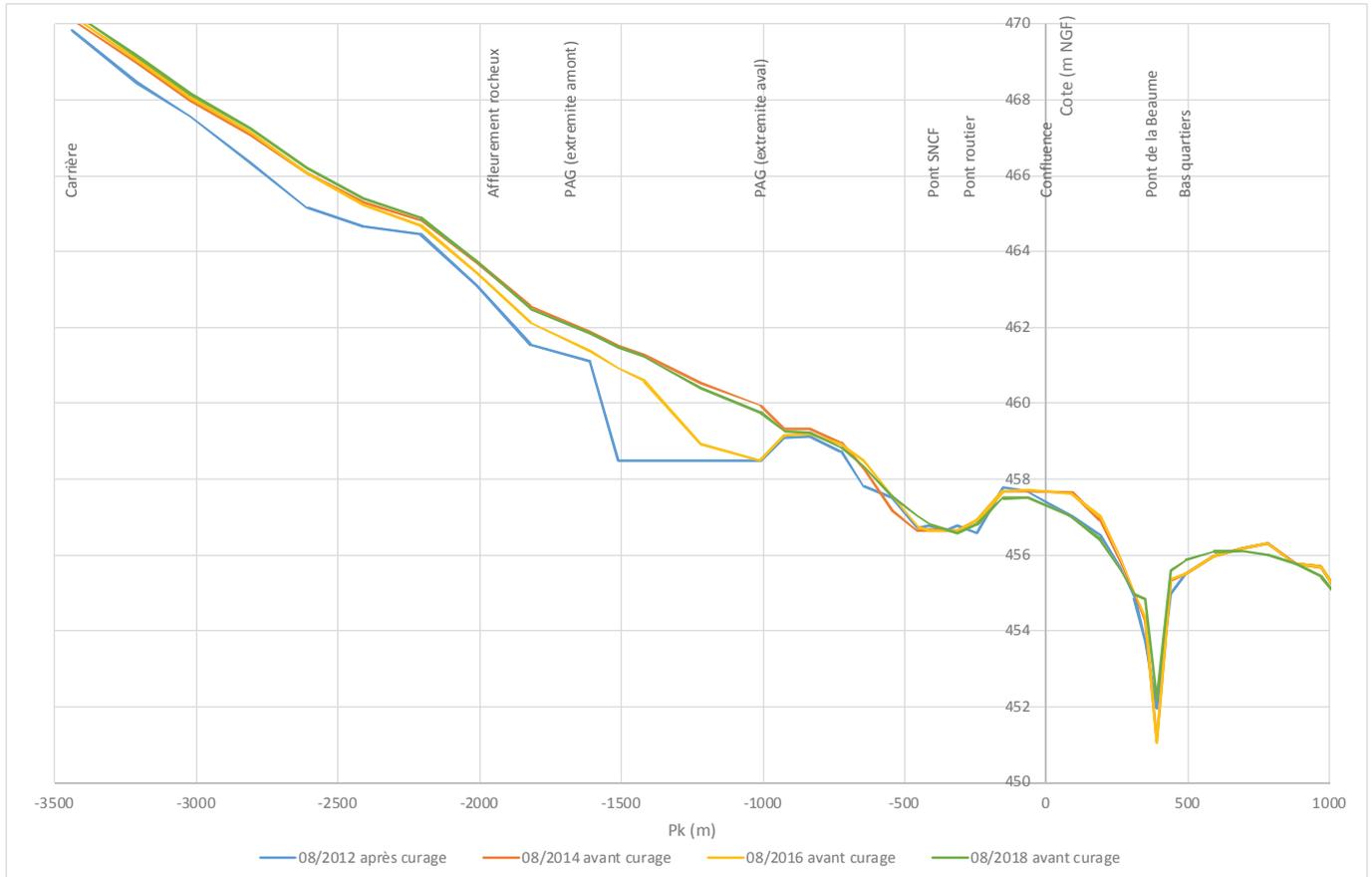


Figure 29. Evolution du fond avec un piège raccourci curé tous les 2 ans (période 2)

Il n'y a pas d'évolution majeure des niveaux de fond en aval du piège. L'abaissement lors de la crue de novembre 2016 permet de retrouver les niveaux de fonds initiaux au niveau de la confluence. Il reste un dépôt résiduel de 10 cm (456.1 m NGF) au niveau des bas quartiers (hors prise en compte des dépôts de sédiments fins non modélisés ici). Les niveaux atteints sans curage dans le piège sont respectivement de 457.3 et 457.9 après ou avant la crue de 2016, soit plus d'1 m plus haut (non représentés sur la Figure 29, cf. Figure 21).

On voit que le remplissage important du piège à graviers en 08/2014 après les forts apports sédimentaires de 2012-2013 et 2013-2014 n'entraîne pas d'évolution majeure dans les zones à enjeux (confluence et bas quartiers).

On note un exhaussement continu en amont du piège qui permet d'éviter toute chute au niveau de l'affleurement rocheux.

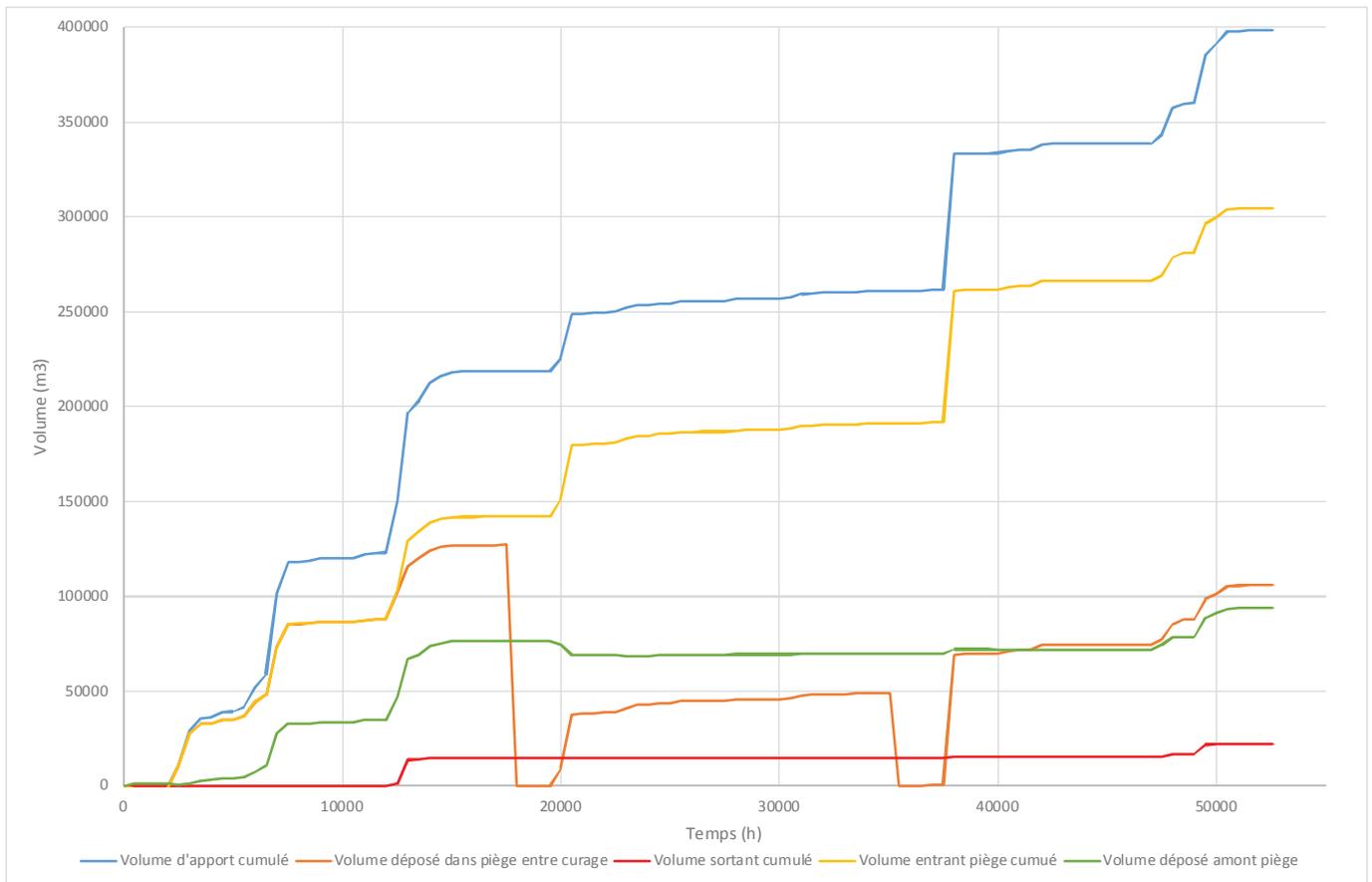


Figure 30. Fonctionnement du piège raccourci en termes de volume sur la période 2

La Figure 30 montre le fonctionnement du piège en termes de volume. On voit que les sédiments sortants du piège représentent 22 000 m³ en cumulé en 6 ans, soit 6% du volume d'apport (400 000 m³) ; ce n'est pas très important mais supérieur à ce qu'il se passe lors de la période 1 du fait de la saturation du piège en 2014. Une part non négligeable (95 000 m³, soit 25%) se stocke en amont du piège du fait du remous solide.

Les résultats obtenus sont conformes aux attendus et montrent qu'il semble possible d'optimiser les curages en ne curant qu'un an sur 2 et en diminuant la taille du piège :

- les risques d'apport excessif en aval et de montée importante des fonds au niveau de la confluence et des bas quartiers sont limités même si une année le piège est saturé (2014)
- dans cette configuration, il aurait peut-être été décidé de curer en 2013 puisqu'il y avait 85 000 m³ de sédiments dans le piège ;
- la limitation des curages permet de créer un remous solide en amont du piège qui limite les apports et qui permet de protéger l'affleurement rocheux.

Il faut toutefois noter que les exhaussements visibles notamment avant l'abaissement de 2016 sont le signe qu'il est indispensable de réaliser en parallèle des abaissements réguliers de la retenue de Saint Lazare dès que l'hydrologie est suffisante, d'autant plus que les dépôts de sédiments fins n'ont pas été modélisés ici, cf. § 6.2. La nouvelle consigne de crue (2015) permet de réaliser ces abaissements plus fréquents.

8.6 FONCTIONNEMENT DU PIÈGE RACCOURCI (300M)

Pour le prédimensionnement du piège pour un curage annuel, le piège a été raccourci de 300 m par rapport au piège actuel :

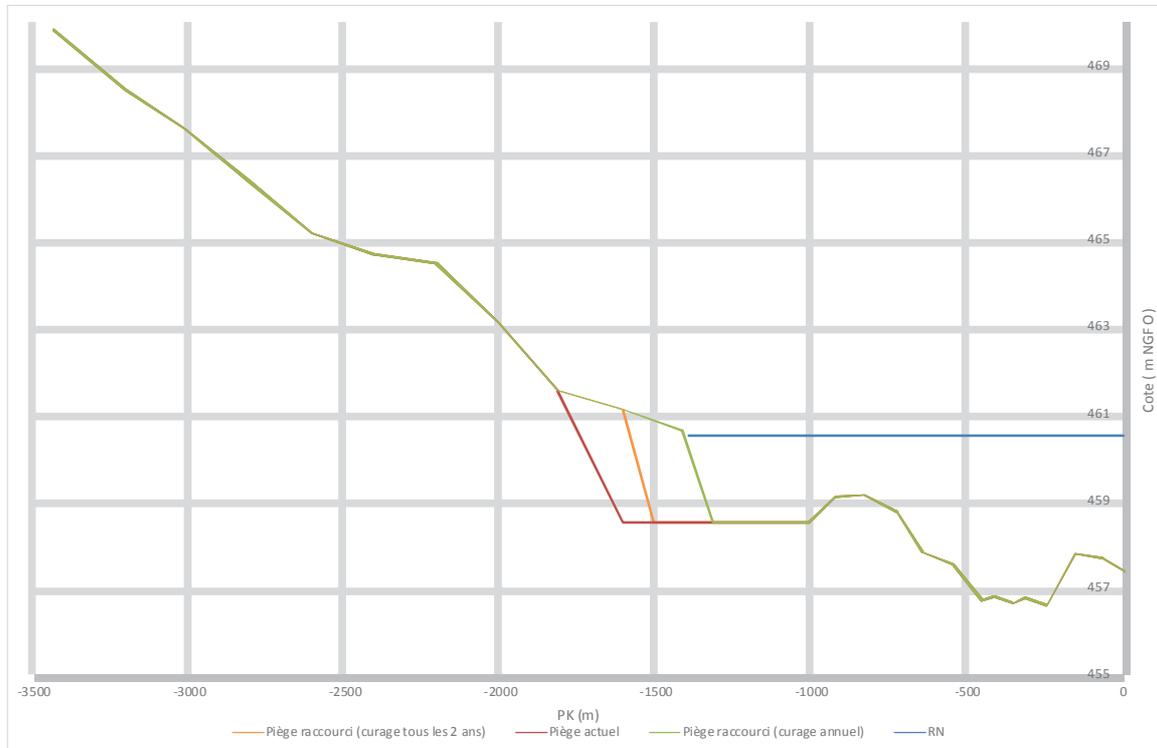


Figure 31. Profil en long du piège raccourci de 300 m

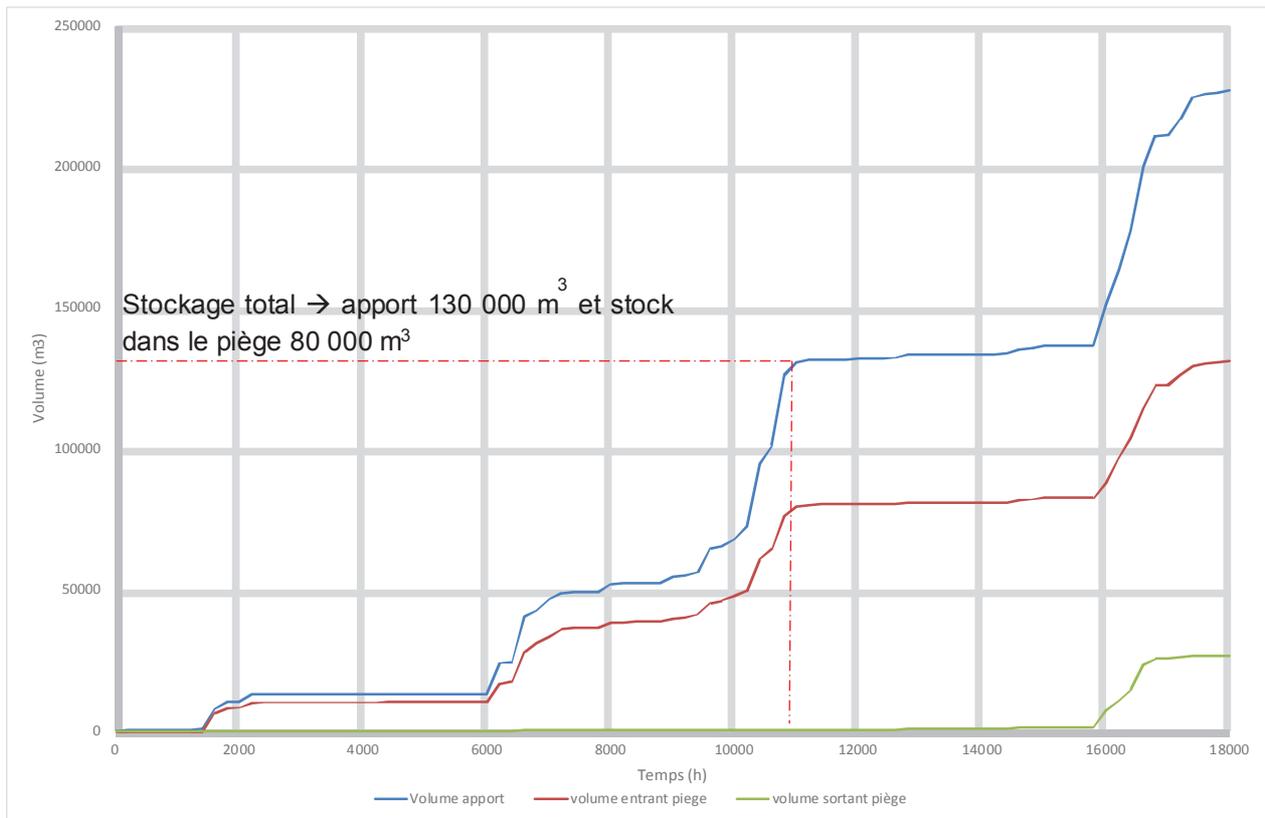


Figure 32. Fonctionnement du piège raccourci de 300 m

Le stockage est total dans ce piège raccourci pour des apports inférieurs à 130 000 m³ ; soit notre objectif pour un curage annuel. On passe directement d'un stockage total à un stockage faible.

8.7 PIEGE CURE TOUS LES ANS (PERIODE 2009-2017)

8.7.1.1 Données utilisées

Une modélisation du fonctionnement de ce piège raccourci de 300 m avec apport réel et curages a été réalisée avec les paramètres suivants :

- La période de modélisation utilisée va du 01/08/2009 au 01/08/2017 ;
- Un curage du piège est modélisé tous les ans au 01/08 ; quels que soient les apports entrants réels ;
- Les curages sont réalisés jusqu'à la cote 458.5 m NGFO ;
- La topographie initiale correspond à celle de 04/2017 ;

Les apports calculés pour les différentes périodes sont les suivants :

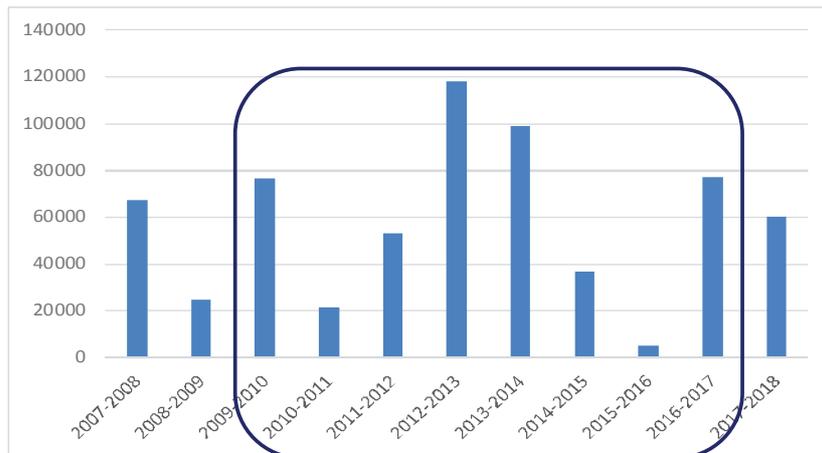


Figure 33. Apports sédimentaires annuels pendant la période 2009-2017

Le piège est dimensionné pour un volume entrant de 120 000 m³.

8.7.1.2 Résultats obtenus

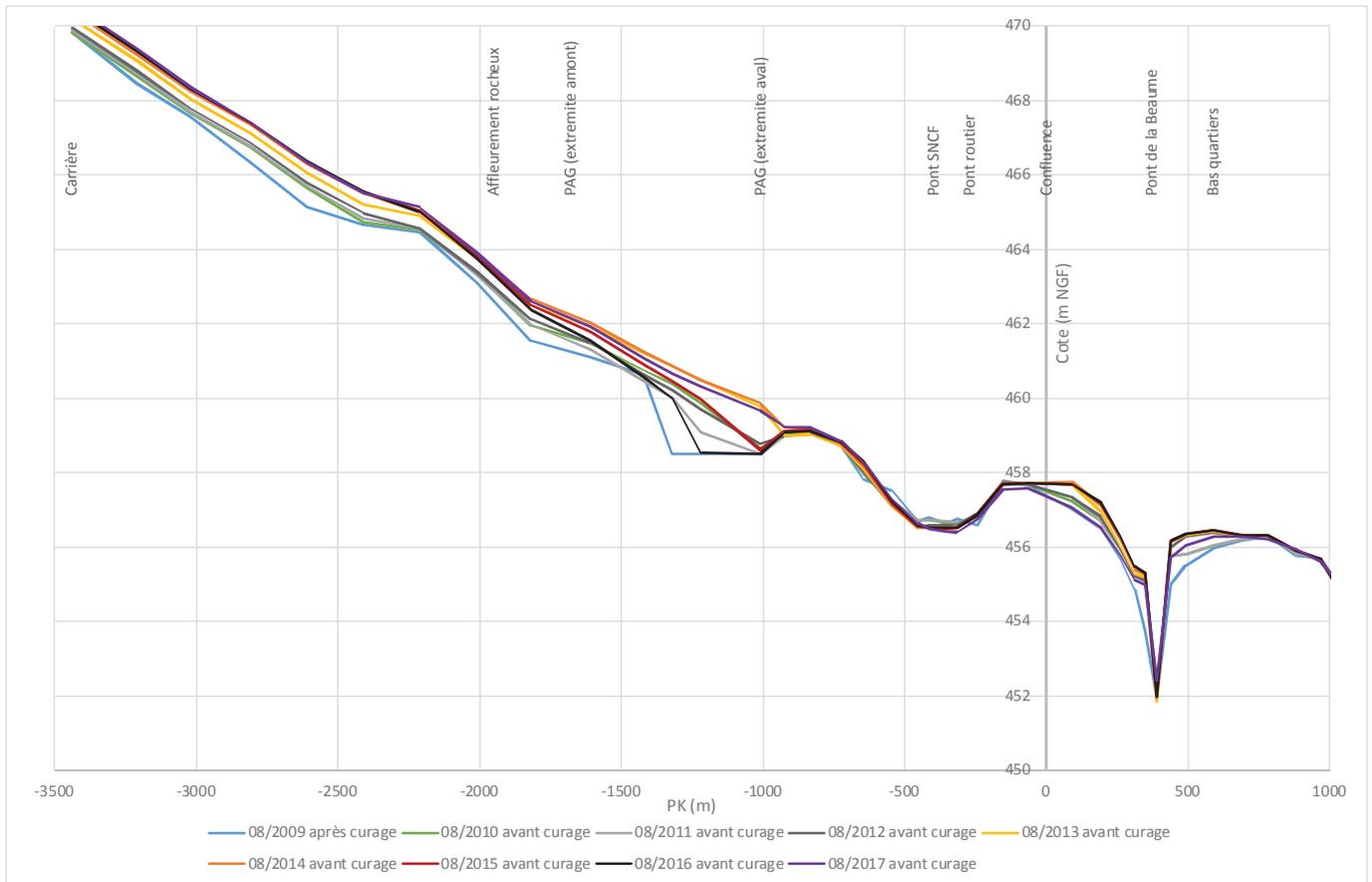


Figure 34. Evolution du fond avec un piège raccourci curé tous les ans

Là encore, il n'y a pas d'évolution majeure des niveaux de fond en aval du piège. L'abaissement lors de la crue de novembre 2016 permet de retrouver les niveaux de fonds initiaux au niveau de la confluence. Il reste un dépôt résiduel de 30 cm (456.3 m NGF) au niveau des bas quartiers (hors prise en compte des dépôts de sédiments fins non modélisés ici).

On note un exhaussement continu en amont du piège qui permet de recouvrir l'affleurement rocheux.

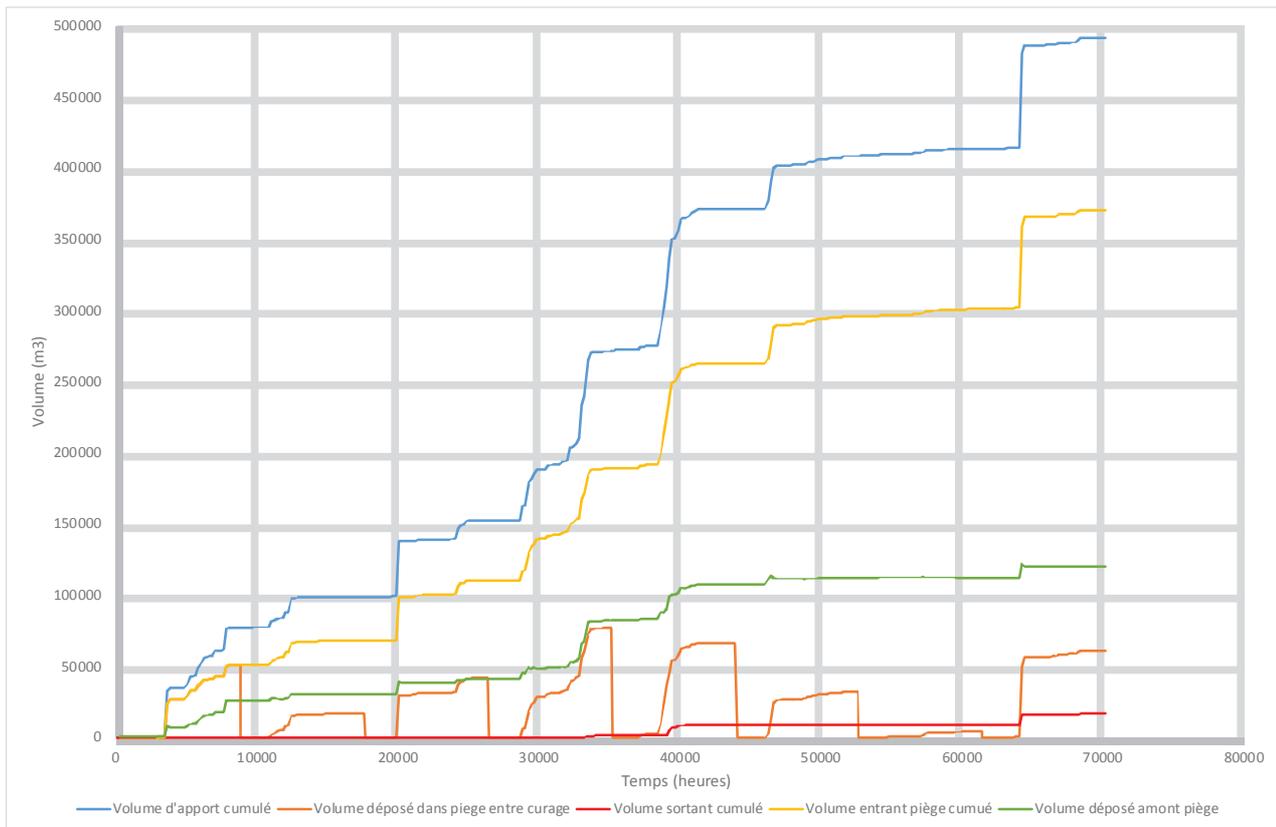


Figure 35. Fonctionnement du piège raccourci de 300m en termes de volume

La Figure 35 montre le fonctionnement du piège en termes de volume. On voit que les sédiments sortants du piège représentent 17 000 m³ en cumulé en 8 ans, soit 3% du volume d'apport (490 000 m³). Une part non négligeable (120 000 m³, soit 25%) se stocke en amont du piège du fait du remous solide.

Les résultats obtenus sont similaires à ceux des curages tous les 2 ans et montrent qu'il semble possible d'optimiser les curages en diminuant drastiquement la taille du piège.

Il est vraisemblablement plus intéressant de conserver un piège plus gros mais ne curer que tous les 2 ans :

- d'un point de vue environnemental : moins d'intervention sur le milieu
- d'un point de vue financier : moins d'amené-replis de chantier ;
- d'un point de vue risque : plus de latitude de curage la première année en cas d'apport excessif et moyenne des apports sur 2 ans qui permet de lisser la variabilité interannuelle des apports.

8.8 SYNTHÈSE DE L'OPTIMISATION DES CURAGES

La configuration avec piège raccourci de 100 m depuis l'amont et curage tous les 2 ans répond aux différents critères d'optimisation des curages actuels du PAG :

- Recouvrement de l'affleurement rocheux ;
- Risques limités d'exhaussement en aval ;
- Diminution des volumes curés et des coûts associés.

L'économie de curage représente environ 20% des apports et correspond à ce qui se déposera en amont du piège dans le remous solide.

NB : il est probable qu'une fois atteint un nouvel équilibre sur le Büech, ce pourcentage de dépôt dans le remous solide diminue.

De plus, le curage tous les 2 ans laisse plus de latitude en termes de risques, la moyenne des apports sur 2 ans permettant de lisser la variabilité interannuelle des apports, et avec toujours la possibilité de s'adapter en procédant à un curage en cas d'apport excessif la première année. Rappelons que le piège à graviers est dimensionné pour reprendre les apports annuels, il n'est pas dimensionné pour des crues exceptionnelles.

Cette gestion s'inscrit en complémentarité avec l'exploitation par abaissement en crue de la retenue de St Lazare. La nouvelle consigne de crue (2015) permet de réaliser ces abaissements plus fréquents.

9. REFERENCES

[1] : Etat-cible – Retenue de St Lazare, EDF 2010

[2] : Etude des modalités de curage régulier des apports graveleux du Buëch à la confluence Buëch-Durance », SOGREAH pour le compte du SMIGIBA, Rapport n°4240575 R1 v4, 11/2007

[3] : Suivi morphologique du Buëch aval, J. Coutaz, thèse en cours - Aix Marseille Université, CEREGE UMR 7330.

[4] : Etude du transport de graviers depuis le cône de déjection du Sasse jusqu'à la retenue de Saint Lazare, H-P73-2011-02453-FR, LNHE, 2011

10. ANNEXES

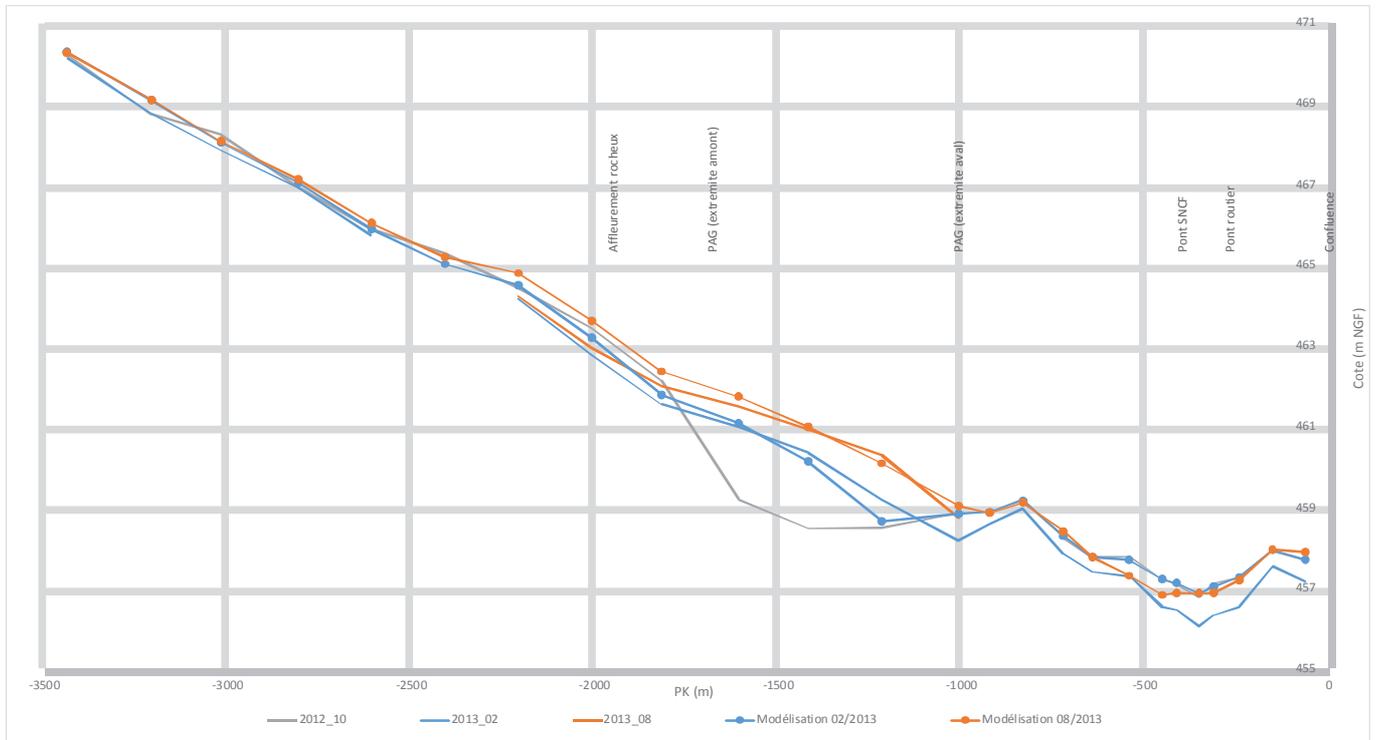


Figure 36. Comparaison des profils en long mesurés et simulés pour le calage 2

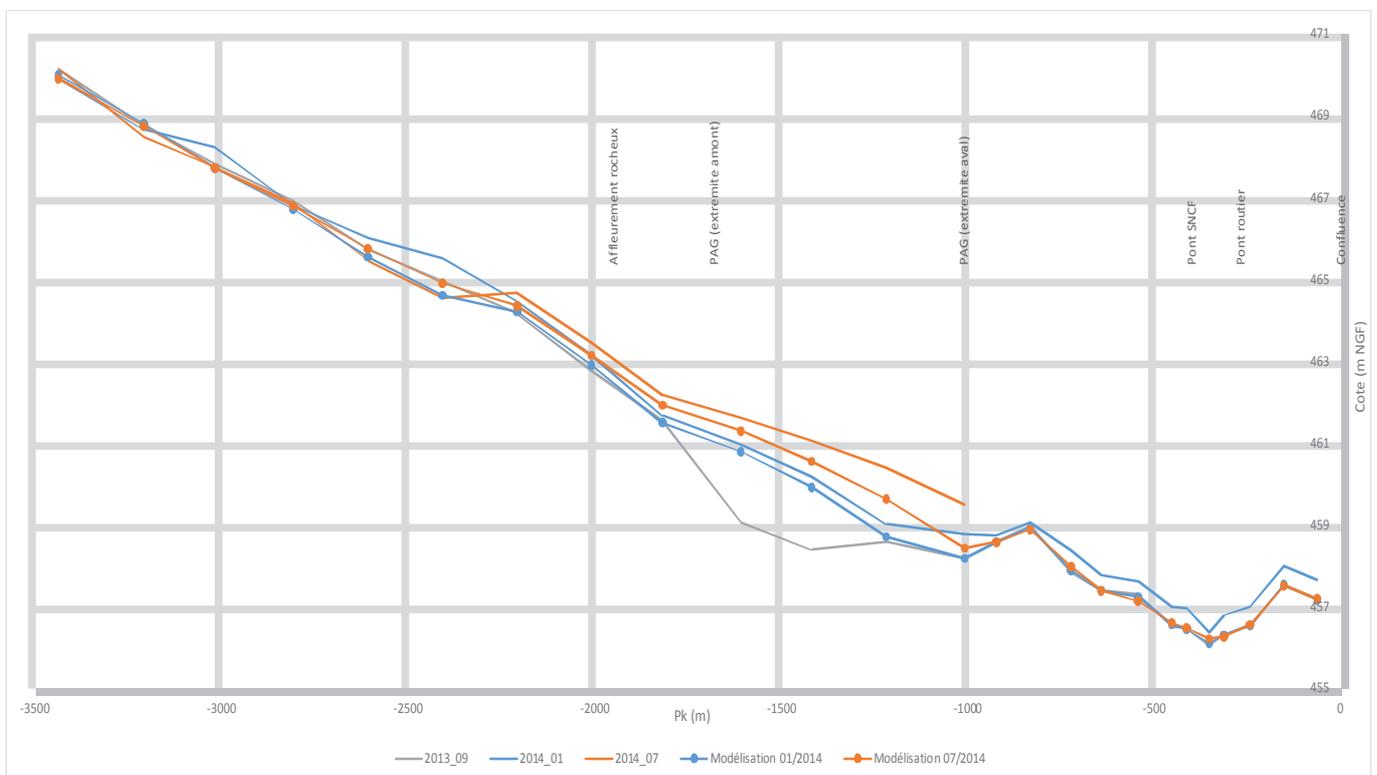


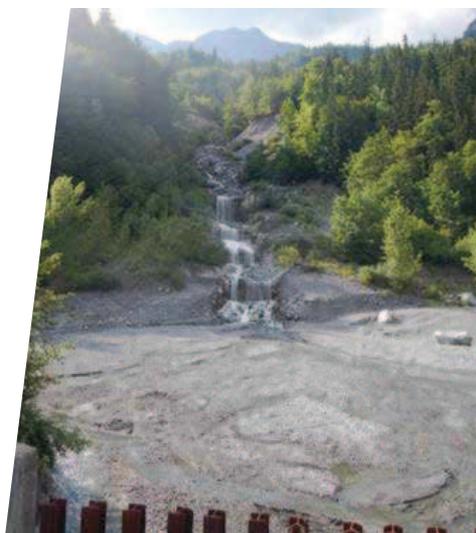
Figure 37. Comparaison des profils en long mesurés et simulés pour le calage 3

11. PRESENTATION DU MODELE CAVALCADE D'ARTELIA

CAVALCADE

MODÉLISATION HYDRO-SÉDIMENTAIRE

CAVALCADE est un logiciel de simulation couplée de l'hydraulique et du transport solide. Il permet de simuler l'évolution des fonds moyens d'un cours d'eau et le calcul simultané des lignes d'eau au cours d'une crue ou d'un cycle hydrologique. CAVALCADE est particulièrement adapté pour l'étude des rivières torrentielles et permet l'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement des cours d'eau.



DESCRIPTION

LE LOGICIEL CAVALCADE, DÉVELOPPÉ PAR ARTELIA, EST UN OUTIL DE SIMULATION DU TRANSPORT SOLIDE ET D'ÉVOLUTION DU FOND DU LIT.

Ses principaux domaines d'applications sont les suivants :

- Evolution du lit des torrents et rivières,
- Evaluation du délai de retour à l'équilibre après une perturbation,
- Evaluation de l'effet d'un ouvrage (seuil, barrage, pont, plage de dépôt, etc.),
- Evolution des retenues (remplissage sédimentaire, chasses),
- Respiration au débouché d'un torrent affluent.

Il permet d'appréhender les processus hydro-sédimentaires selon deux échelles de temps : évolution à long terme, au travers de la simulation de plusieurs cycles hydrologiques (retour à l'équilibre après perturbation, évolution d'une retenue ...) ou évolution rapide au cours d'une crue (engravement au droit d'un ouvrage ou d'une confluence, fonctionnement d'une plage de dépôt ...).

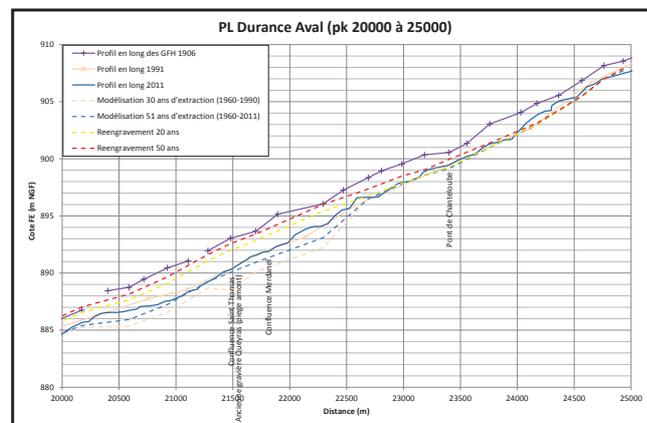


LOGICIEL CAVALCADE MODÉLISATION HYDRO-SÉDIMENTAIRE

CARACTÉRISTIQUES

La modélisation du transport solide sous CAVALCADE repose sur les éléments suivants :

- Calculs (1D) simultanés d'hydraulique et de transport solide,
- Possibilité d'imposer un hydrogramme de crue ou une courbe des débits classés,
- Evaluation du transport solide au travers de différentes formules classiques de la littérature : Meyer Peter Muller, Sogreah, Lefort, Engelund et Hansen, Recking, Meunier,
- Evolution du lit par bilan de matériaux,
- Prise en compte des débordements du lit mineur vers le lit majeur,
- Prise en compte des affluents (introduction de débit et de matériaux solides),
- Représentation des ouvrages ou singularités (seuils, barrages, plage de dépôt, pont, convergent/divergent ...),
- Possibilité d'imposer une loi charge/débit au droit d'un ouvrage (consigne de gestion d'un barrage, loi de seuil ...),
- Possibilité de représenter un pavage du lit ou un fond fixe dans certains secteurs.



REFERENCE TECHNIQUE

La gestion des rivières – Transport solide et atterrissements – Guide méthodologique », Les études des Agences de l'Eau n°65, 1999

PUBLICATION

“Approach to morphodynamic processes of the lower Argens river and sediment transport modelling at the mouth”, E. Tiriau, R. Grinda, M. Vincent.

QUELQUES RÉFÉRENCES

- Etude de la conjonction entre crue et submersion marine à l'embouchure de l'Argens : modélisation hydrosédimentaire de l'estuaire et du comportement du bouchon sableux lors des crues,
- Mise en sécurité de la plage de dépôt du Sonnant d'Uriage sur la commune de Gières,
- Plan de gestion et d'entretien des cours d'eau Haute-Durance, Guisane, Clarée et Gyronde,
- De nombreuses références sur la Durance, le Var, le Buëch...