

EDF Hydro Méditerranée
10 avenue Viton
13482 Marseille cedex 20

GEH DURANCE VERDON – GU SISTERON

MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE DE LA RETENUE DE SAINT LAZARE

Rapport 2019



NOTE TECHNIQUE

MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE DE LA RETENUE DE SAINT LAZARE

Projet	Transport Solide UP Med			
Référence	H-30575706-2019-000033			
Date	01/07/2019	Indice	A	26 page(s)
				annexe(s)

Résumé	<i>L'objectif de cette note est de requestionner les cotes de référence de l'état cible 2010 de la retenue de St Lazare à partir de modélisation hydrosédimentaire à fond mobile.</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
12/06/2019	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	AMO/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 BONAÏTI	GU Sisteron	1	@
	Parties prenantes externes	1	@

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS		
Ind.	Date	Nature des évolutions

SOMMAIRE

1.	CONTEXTE.....	4
2.	MODELISATION DE LA RETENUE DE SAINT LAZARE EN CRUE.....	6
2.1	CONTEXTE ET HISTORIQUE	6
2.2	CALAGE EN CRUE.....	7
2.2.1	Méthodologie	7
2.2.2	Calage sur la crue de 2003	8
2.2.2.1	Données utilisées	8
2.2.2.2	Résultats de calage.....	9
2.2.3	Calage sur la crue de 2016	12
2.2.3.1	Données utilisées	12
2.2.3.2	Résultats de calage.....	13
2.2.4	Synthèse du calage.....	14
2.3	NIVEAU AUX BAS QUARTIERS EN Q100.....	15
2.3.1	Données utilisées	15
2.3.2	Evolution des fonds en crue centennale	17
2.3.3	Niveaux d'eau en crue centennale	18
2.3.4	Sensibilité à la répartition de débit Buëch/Durance.....	19
2.3.5	Impact du remplissage du PàG sur les niveaux atteints en crue centennale	21
2.4	NIVEAU AUX COUDOULETS EN Q50	22
2.4.1	Données utilisées	22
2.4.2	Evolution des fonds en crue cinquantennale issus du modèle Cavalcade	23
2.4.3	Niveaux d'eau en crue cinquantennale sur la Branche des Coudoulets	23
2.5	SYNTHESE SUR LES NIVEAUX EN CRUE	24
3.	REFERENCES	26

1. CONTEXTE

Cette étude est réalisée, en complément de la modélisation hydrosédimentaire du piège à graviers du Buech [1]. L'objectif est de se questionner sur les niveaux de fond objectif dans la retenue de Saint Lazare pour la protection des Bas Quartiers contre les inondations en crue centennale.

En effet, l'état-cible de la retenue de St Lazare [2] repose sur une modélisation à fond fixe du passage de la crue sur les fonds de 2003. Le modèle hydrosédimentaire est donc repris pour affiner l'estimation de la criticité hydraulique au passage des crues au niveau des Bas Quartiers et des Coudoulets, du fait de l'utilisation d'une modélisation fond mobile et de l'évolution des fonds depuis l'état cible de 2010.

Les évolutions morphologiques et la méthodologie sont décrites en [1].

Nota : Complément méthodologique

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 Buëch et Durance ont un fonctionnement morphologique particulièrement complexe :

- *Des apports de sédiments grossiers importants depuis le Buëch 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.*

L'objectif ici, est d'évaluer quel peut être l'impact de l'utilisation d'une modèle hydrosédimentaire fond mobile sur les niveaux de fonds et la ligne d'eau en crue au droit des Bas Quartiers de Sisteron par rapport à un modèle à fond fixe. Un choix du type de logiciel est nécessaire : sédiments grossiers ou fins ?

Dans la note [3], JP Bouchard (EDF-LNHE) montre la dichotomie entre l'amont et l'aval du goulet de la Machine en terme de fonctionnement morphologique : « L'approfondissement dû à la crue ou à la chasse se fait sentir jusqu'au point d'abscisse 2000, soit au milieu du goulet de la Machine. Plus à l'amont on observe au contraire après les crues un exhaussement des fonds. Une explication peut être avancée à ce comportement opposé. L'engravement au confluent du Buech permet maintenant le passage de gravier sous le pont de la Baume à l'occasion des crues. A l'aval, l'écoulement devant Sisteron est plus calme et a une capacité de transport moindre, d'autant plus que le goulet de la Machine occasionne une surélévation locale des niveaux d'eau. Il y a donc dépôt de ces graviers et exhaussements des fonds au droit de Sisteron. La dynamique sédimentaire dans ce secteur n'est donc plus celle des limons mais appartient à celle, très différente, liée au transport des graviers. »

Depuis la mise en place du PàG, il n'y a plus d'exhaussement des fonds en amont du goulet de la Machine lors des crues. Mais le fonctionnement hydrosédimentaire reste le même : dépôt de sédiments fins en aval et fond tenu par un mélange de sédiments contenant sans doute une forte part de sédiments grossiers au droit des Bas Quartiers.

Le secteur d'intérêt, étant la zone des Bas Quartiers, en amont du Goulet de la Machine, il est préférable d'utiliser un modèle hydrosédimentaire sédiments grossiers qu'il est indispensable de caler en niveau, pour des fortes crues. Le modèle est calé sur les crues de 2003 et 2016 grâce au niveau levé en continu aux Bas Quartiers. Il peut ainsi être vérifié si le modèle est capable de représenter l'évolution réelle des fonds.

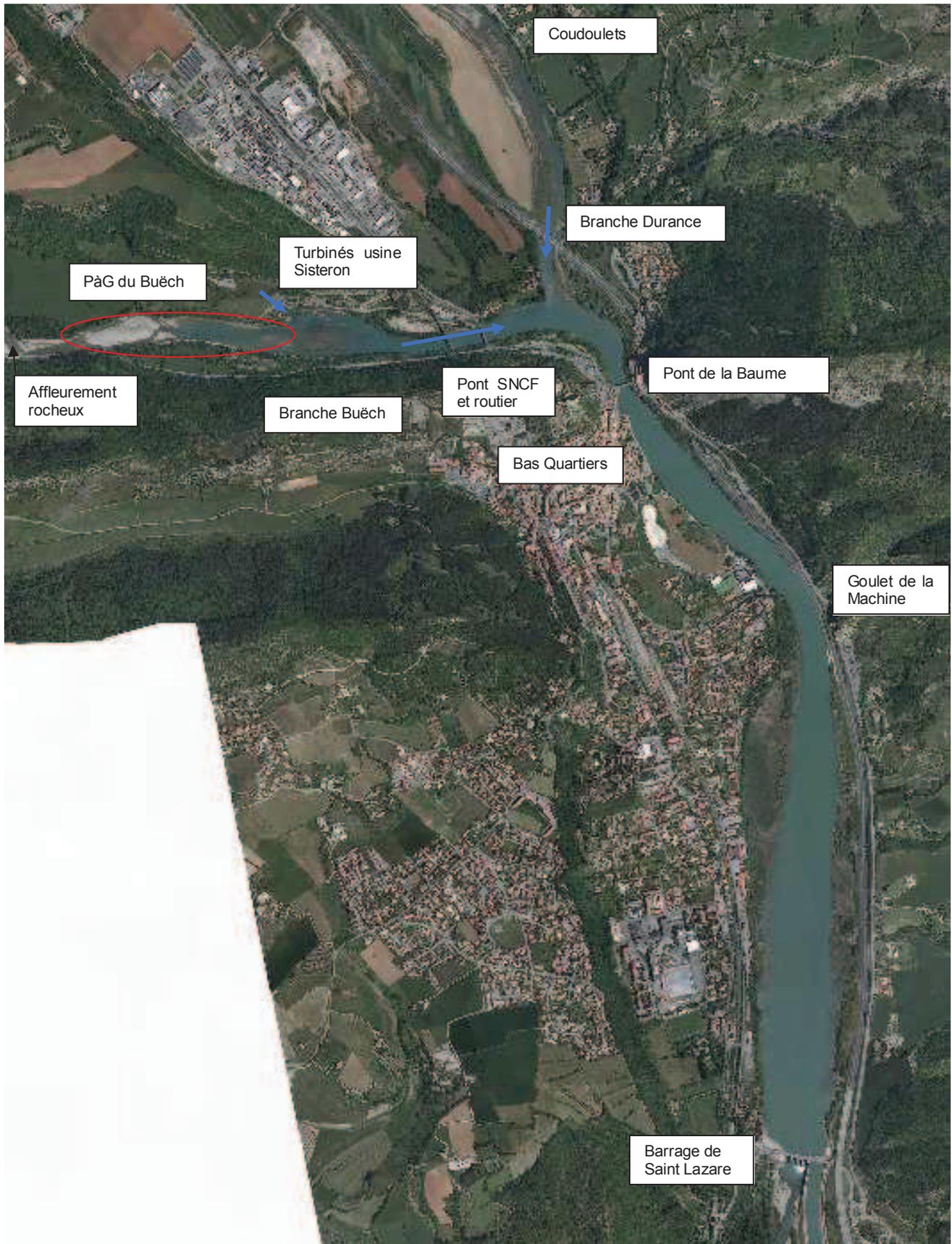


Figure 1. Carte de localisation

2. MODELISATION DE LA RETENUE DE SAINT LAZARE EN CRUE

2.1 CONTEXTE ET HISTORIQUE

Le rapport d'état cible de 2010 (cf. [1]) a défini des niveaux maximums admissibles en crue dans la retenue de Saint Lazare au droit des enjeux :

- Niveau pour la crue centennale du BVi, inférieur à 0.5 m sous le mur des Bas Quartiers (soit 462.8 m = 463.3 m NGF -0.5 m)
- Niveau pour la crue cinquantennale du BVi, inférieur à 464.43 m NGF au PK 4720 m au niveau des Coudoulets. Toutefois cette cote est obsolète puisque les 2 maisons les plus sensibles (celle du PK 4720, cote 464.43 m NGF et celle du PK 4755 cote 464.53) ont été rachetées puis rasées par EDF en 2012.

NB : Les crues cinquantennale et centennale du BVi sont définies respectivement aux § 2.4.1 et § 2.3.1.

Une géométrie cible des fonds dans la retenue a été définie afin de respecter ces niveaux maximums en crue sur la base de modèles hydrauliques 1D à fond fixe (Mascaret).

Il est important de noter que :

- 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.
- Au niveau des Coudoulets, le recalibrage était le même pour les 2 géométries et a été réalisé. Au droit du PK 4720 m, le gain de ligne d'eau grâce à Géom 1 n'était plus que de 14 cm. Les 2 géométries ne permettaient pas de respecter la cote de référence au PK 4720 de quelques centimètres, les solutions techniques pour respecter cette cote étaient difficilement envisageables car cela aurait nécessité un approfondissement important du fait de l'étroitesse de la vallée, non compatible avec un auto-entretien du lit lors des abaissements ou des lâchers de la Saulce. A contrario, les 2 géométries respectent la cote des maisons présentes actuellement du fait du rachat et arasement par EDF de 2 maisons en 2012.
- L'objectif indiqué dans la note d'état cible de 2010 était d'atteindre les niveaux de fond de Géom1 grâce aux abaissements de la retenue de Saint Lazare en crue.

Les objectifs de la présente analyse sont les suivants :

- Il a été noté un abaissement des niveaux des fonds dans la retenue depuis 2003 (référence de l'état cible de 2010) pendant les crues de 2008 et 2016, cf. [1] - § 3.3. Le premier objectif est de voir quel est l'impact de cette évolution des fonds sur les niveaux d'eau atteints pour les crues de référence ;
- Les modélisations réalisées pour l'état cible sont des modèles hydrauliques à fond fixe. Le second objectif est de voir sur un modèle hydrosédimentaire à fond mobile quelle est l'évolution des fonds au cours d'une crue et notamment comment cela impacte la ligne d'eau atteinte au pic de crue ;
- Le piège à graviers du Buëch mis en place suite à l'état cible de 2010 est dimensionné pour reprendre les apports grossiers du Buëch et éviter l'apport de ces sédiments dans la retenue de Saint Lazare. Le troisième objectif est de voir quel est l'impact du remplissage du PàG avant la survenance d'une crue centennale sur la ligne d'eau maximum au droit des zones à enjeux.

Pour répondre à ces objectifs, le modèle Cavalcade a été repris et un calage plus fin a été réalisé dans la retenue de Saint Lazare pour les crues de 2003 et de 2016.

2.2 CALAGE EN CRUE

2.2.1 Méthodologie

Le modèle utilisé est déjà calé sur la partie sédimentaire, cf. [1] - § 6.3. Il est nécessaire d'affiner ce calage sur la partie hydraulique (niveau d'eau) en crue, notamment au droit des Bas Quartiers. Le principal paramètre calé est le coefficient de Strickler.

Pour cela, le calage est réalisé en utilisant le fond mobile notamment de manière à évaluer les érosions sous le pont de la Baume et les dépôts consécutifs en aval immédiat.

Ces calages sont réalisés en niveau d'eau sur les crues de 2003 et 2016 : 2003 car elle correspond au calage utilisé pour les modélisations hydrauliques fond fixe de l'état cible et 2016 car elle est récente et bien documentée. Il est nécessaire que le jeu de paramètres retenu commun entre les événements permette d'optimiser le calage pour ces 2 événements. Le calage est donc un compromis entre les 2 épisodes.

Pour la bathymétrie, il a semblé plus juste de partir de la bathymétrie post-crue car les fortes évolutions sont dues majoritairement aux fins qui sont érodés rapidement quand la retenue est abaissée en crue. Or, les sédiments fins ne sont pas modélisés ici. Ce choix n'est valable que si les évolutions réelles des fonds au droit de notre zone d'intérêt (Bas Quartiers) sont limitées notamment entre le début et le pic de crue. Ceci sera vérifié par la suite. Il faut également noter que les bathymétries post-crue ne sont pas réalisées juste après la fin de l'épisode (notamment la bathymétrie post crue de 11/2016 a été réalisée en 03/2017).

Le coefficient de Strickler a été calé pour retrouver le niveau mesuré au Bas Quartiers et aux Coudoulets.

De plus la perte de charge singulière au droit du pont de la Baume et la cote maximale d'érosion ont été calées pour retrouver le niveau post crue sous le pont et une incision maximale crédible. En effet, plus la perte de charge singulière au niveau du pont est importante, plus le logiciel va avoir tendance à « creuser » sous l'ouvrage de manière à maximiser la section de l'écoulement et ainsi minimiser la vitesse et donc la perte de charge. Ceci n'est pas forcément représentatif de la réalité du fait de l'augmentation de la granulométrie ou du pavage du lit qui se met en place sous l'ouvrage par érosion des éléments les plus petits en priorité. Plus la crue a un débit important, plus le lit a tendance à être creusé sous l'ouvrage et plus il est probable qu'il faille des fortes vitesses pour continuer à éroder sous l'ouvrage. Ce phénomène n'est pas pris en compte par le logiciel, il est donc nécessaire de fixer un maximum d'incision local (point dur sous l'ouvrage) qui varie en fonction des crues. Il n'y a pas de données pour déterminer cette cote : seule l'analyse des vitesses atteintes au pic de crue donne des informations. Toutefois, l'effet de ce paramètre sur les résultats de calcul en termes de ligne d'eau est limité. Par ailleurs, la cote initiale de la bathymétrie sous le pont n'influence ni la cote atteinte au pic de crue, ni celle de la fin de la crue.

2.2.2 Calage sur la crue de 2003

La crue de 2003 a servi au calage du modèle hydraulique de l'état cible de 2010 (cf. [4]). Cette crue de 2003 a donc également été utilisée pour caler le modèle de la présente étude.

2.2.2.1 Données utilisées

L'hydrologie a été reprise de l'étude EDF 2007, cf. [4] :

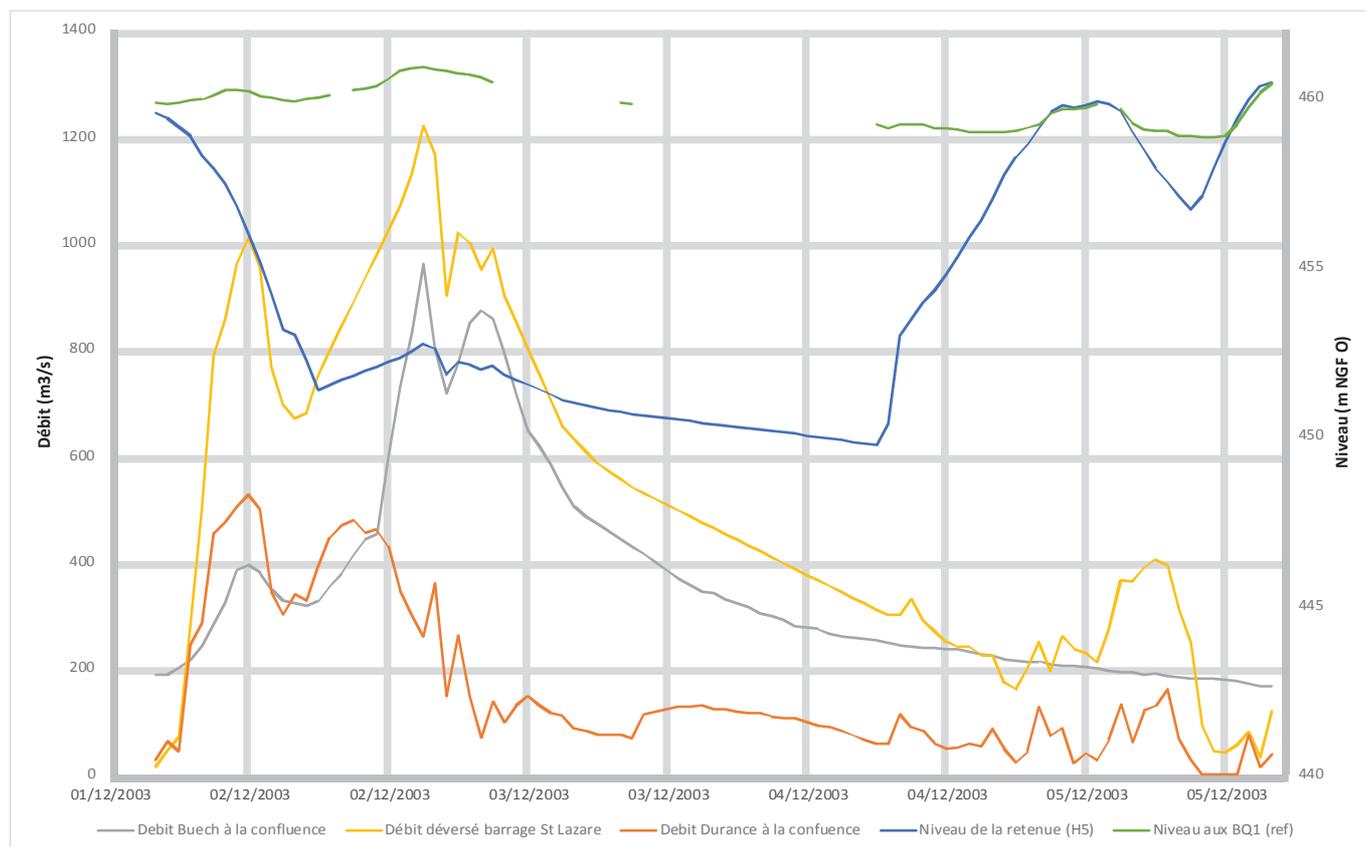


Figure 2. Hydrogrammes et niveaux reconstitués de la crue de 2003

Les apports solides calculés par le logiciel sont respectivement de 70 000 et 10 000 m³ pour le Buëch et la Durance.

Le modèle est ensuite calé sur le niveau mesuré aux Bas Quartiers et sur la laisse de crue des Coudoulets.

Le modèle ne représentant pas la branche Durance, il n'est pas possible de caler directement sur la mesure aux Coudoulets. Le modèle hydraulique à fond fixe de la crue de 2003, cf. [4], a été réutilisé en imposant comme condition aval à la confluence Buëch-Durance, le niveau d'eau modélisé dans le modèle Cavalcade.

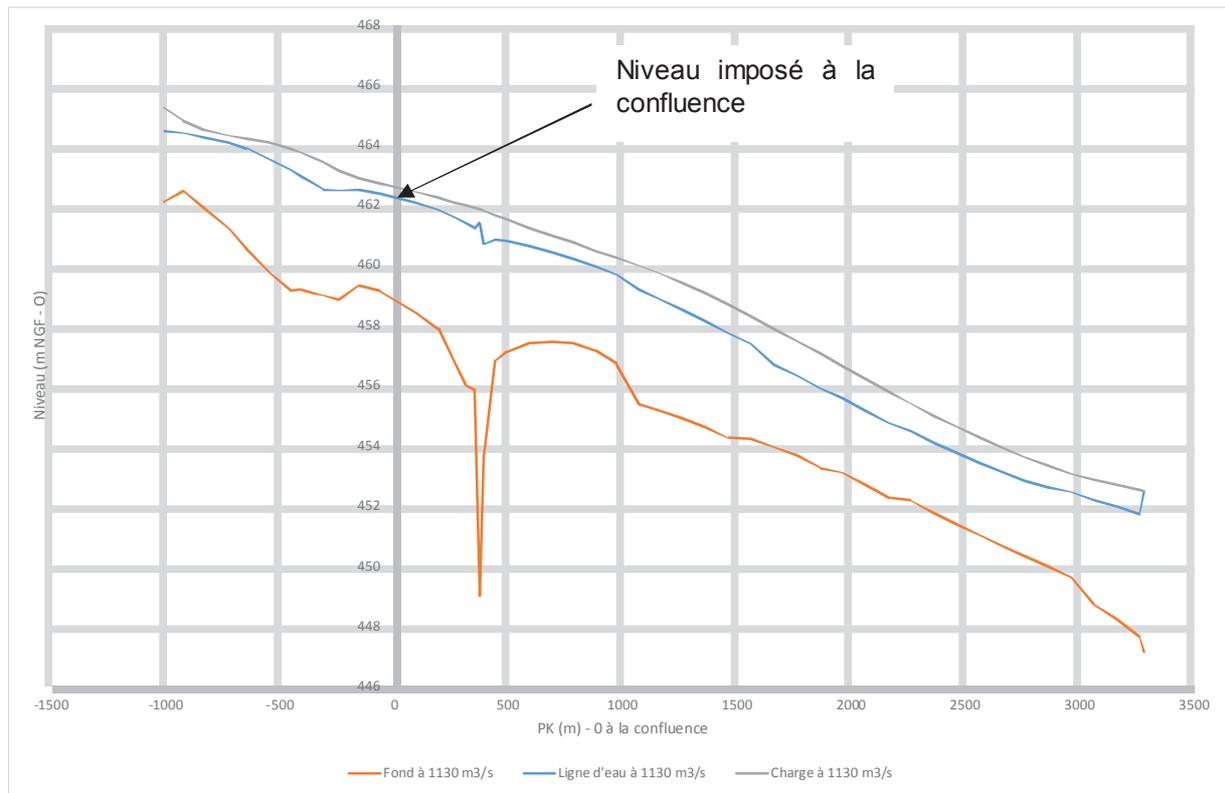


Figure 3. Modélisation Cavalcade de la crue de 2003

2.2.2.2 Résultats de calage

La modélisation de l'hydrogramme complet de la crue de 2003 permet une comparaison du niveau d'eau modélisé et du niveau mesuré au capteur des Bas Quartiers pendant toute la durée de la crue.

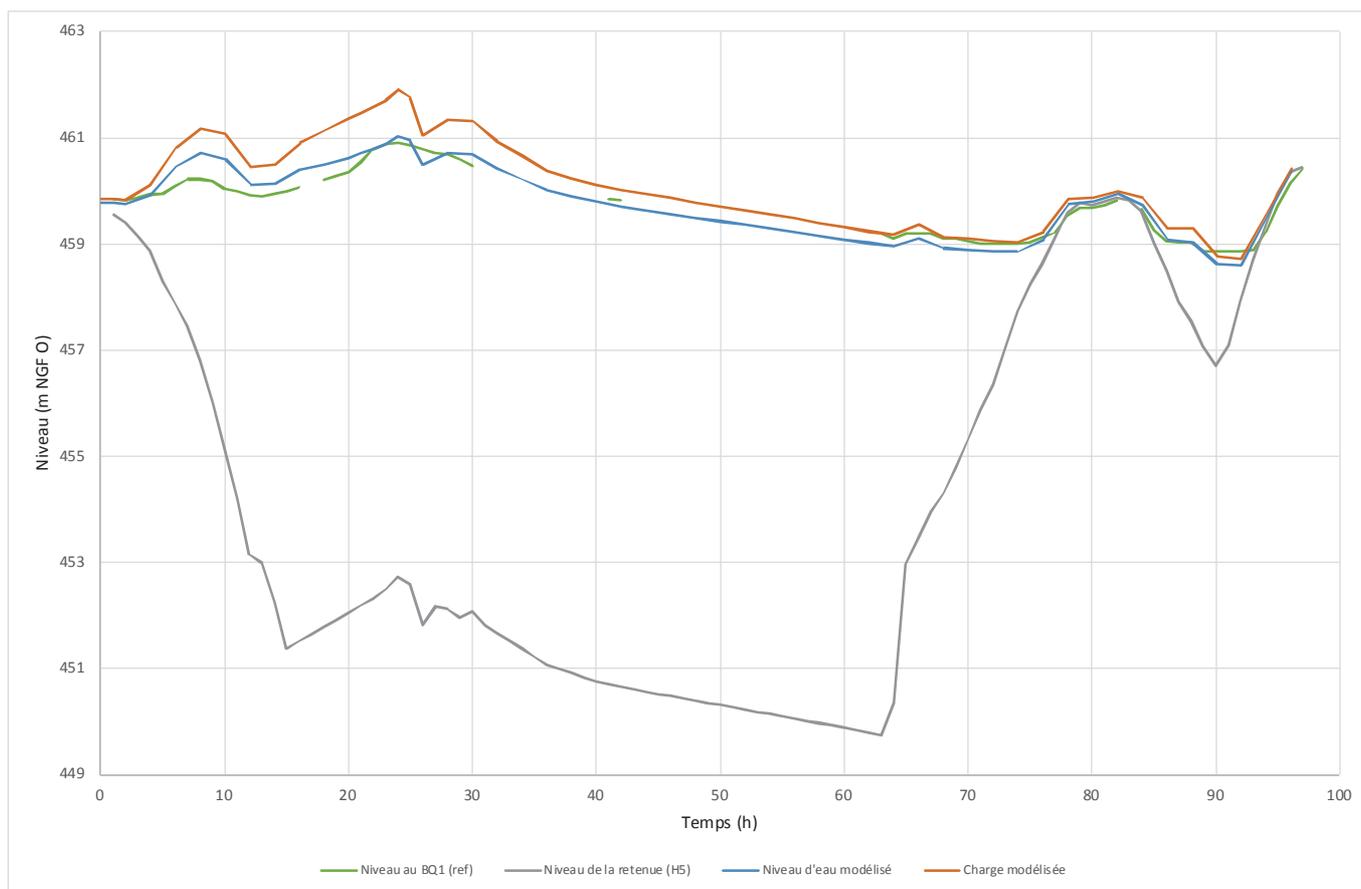


Figure 4. Niveaux modélisés et mesurés lors de la crue de 2003

NB : Le niveau de la retenue H5 est mesuré au niveau du barrage. C'est la cote aval imposée dans le modèle.

L'écart sur le niveau d'eau au regard des mesures est de 17 cm en moyenne avec une tendance à surestimer les valeurs, notamment en début de crue.

Aux Coudoulets, la ligne d'eau est modélisée 17 cm plus haute que la mesure (463.00 vs 462.83 m NGF). Cette mesure est une laisse de crue.

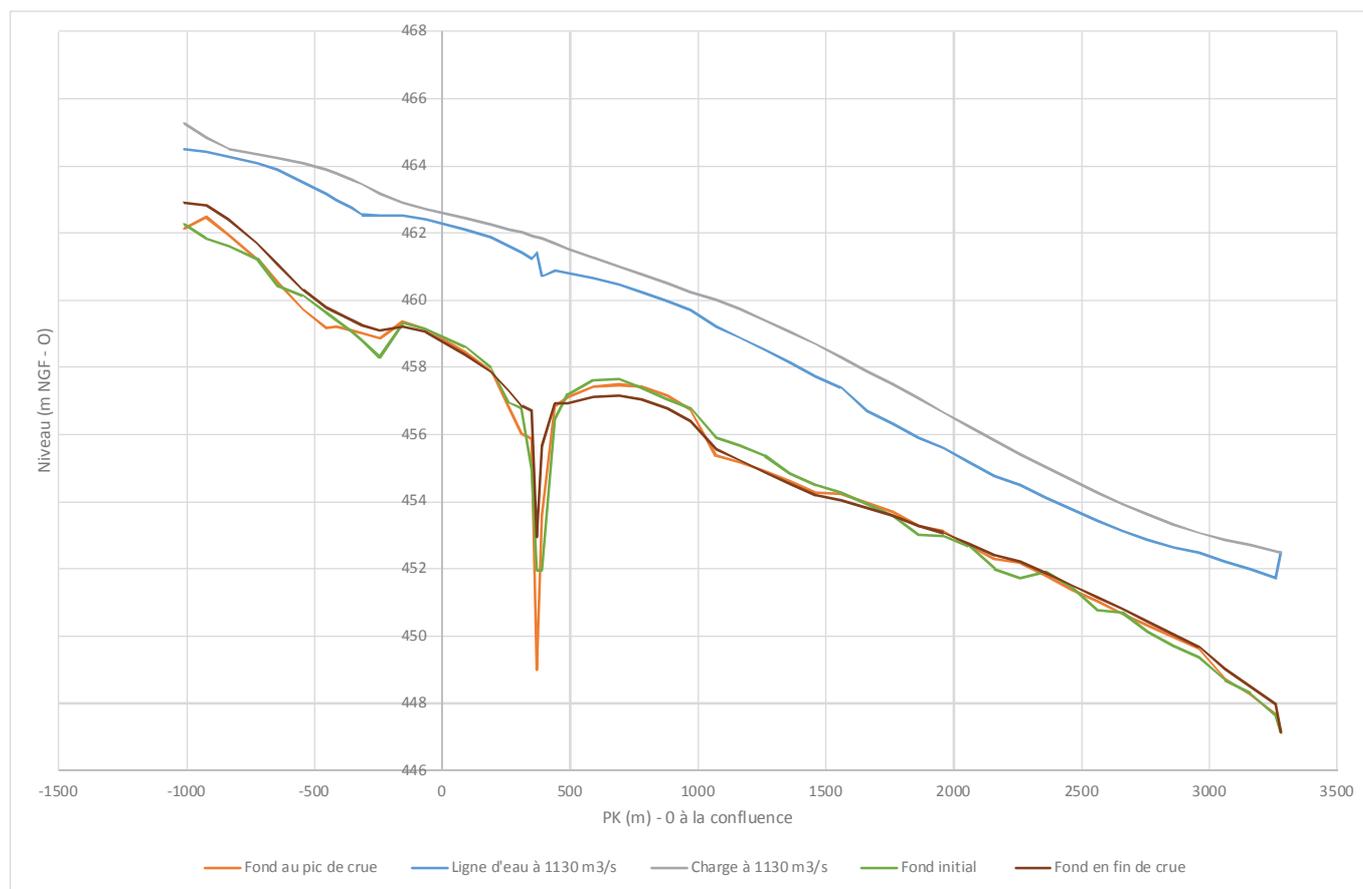


Figure 5. Evolution du fond du lit modélisée lors de la crue de 2003

L'érosion modélisée sous le pont est de 3m et le fond atteint la cote 449 m NGF (limite basse fixée) ; la vitesse sous le pont au pic de crue atteint 3.5 m/s. Le niveau de fond à la fin de la crue est d'environ 452 m NGF, soit près d'1 m au-dessus du niveau objectif (bathymétrie 2003 mesurée post-crue).

On voit que l'érosion à la fin de la crue atteint 50 cm au niveau des Bas Quartiers, par contre l'évolution du fond entre le début de la crue et le pic de crue est faible (moins de 20 cm).

2.2.3 Calage sur la crue de 2016

2.2.3.1 Données utilisées

L'hydrologie a été déterminée sur la base :

- des données mesurées aux stations de Serres et de la Méouge pour le Buëch ;
- des débits estimés via un modèle hydrologique calé sur les mesures de pluies pour le Sasse et le bassin versant intermédiaire de la Durance (cf. [1] - § 4.2) ;
- des déversés au barrage de la Saulce (estimés sur la base des mesures de niveau au barrage et de l'ouverture des vannes).

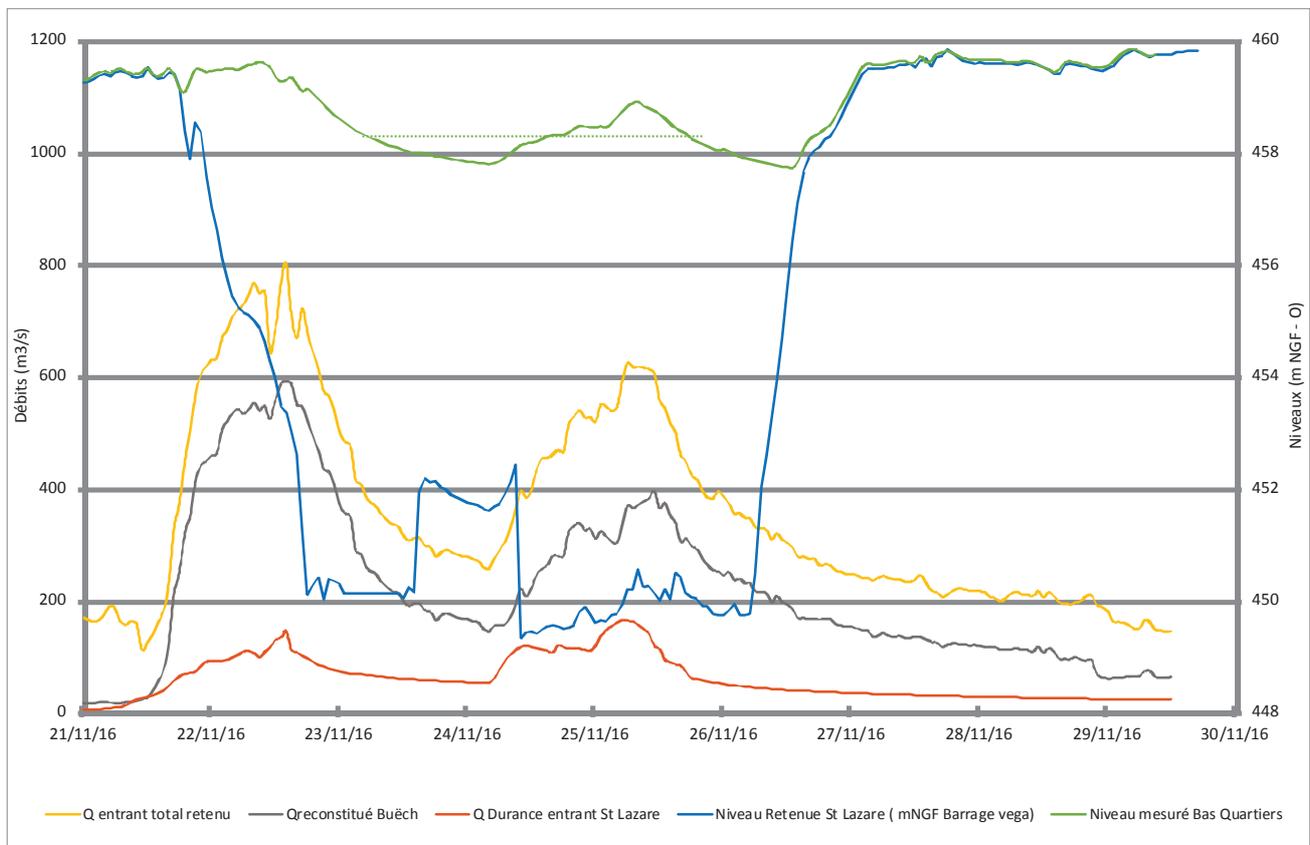


Figure 6. Hydrologie reconstituée de la crue de novembre 2016

Il est important de noter qu'il y a une forte incertitude sur cette hydrologie car les débits déversés reconstitués initialement au barrage de Saint Lazare ne sont pas cohérents avec ces débits. Toutefois, les débits reconstitués initialement ne sont pas cohérents avec les mesures de niveau aux Bas Quartiers, ils n'ont donc pas été retenus.

Les apports solides calculés par le logiciel sont respectivement de 75 000 et 3 000 m³ pour le Buëch et la Durance.

Le modèle est ensuite calé sur le niveau mesuré aux Bas Quartiers. Il n'y a pas de mesure ou de laisse de crue au niveau des Coudoulets pour cette crue.

2.2.3.2 Résultats de calage

La modélisation de l'hydrogramme complet de la crue de 2016 permet une comparaison du niveau d'eau modélisé et du niveau mesuré au capteur des Bas Quartiers pendant toute la durée de la crue.

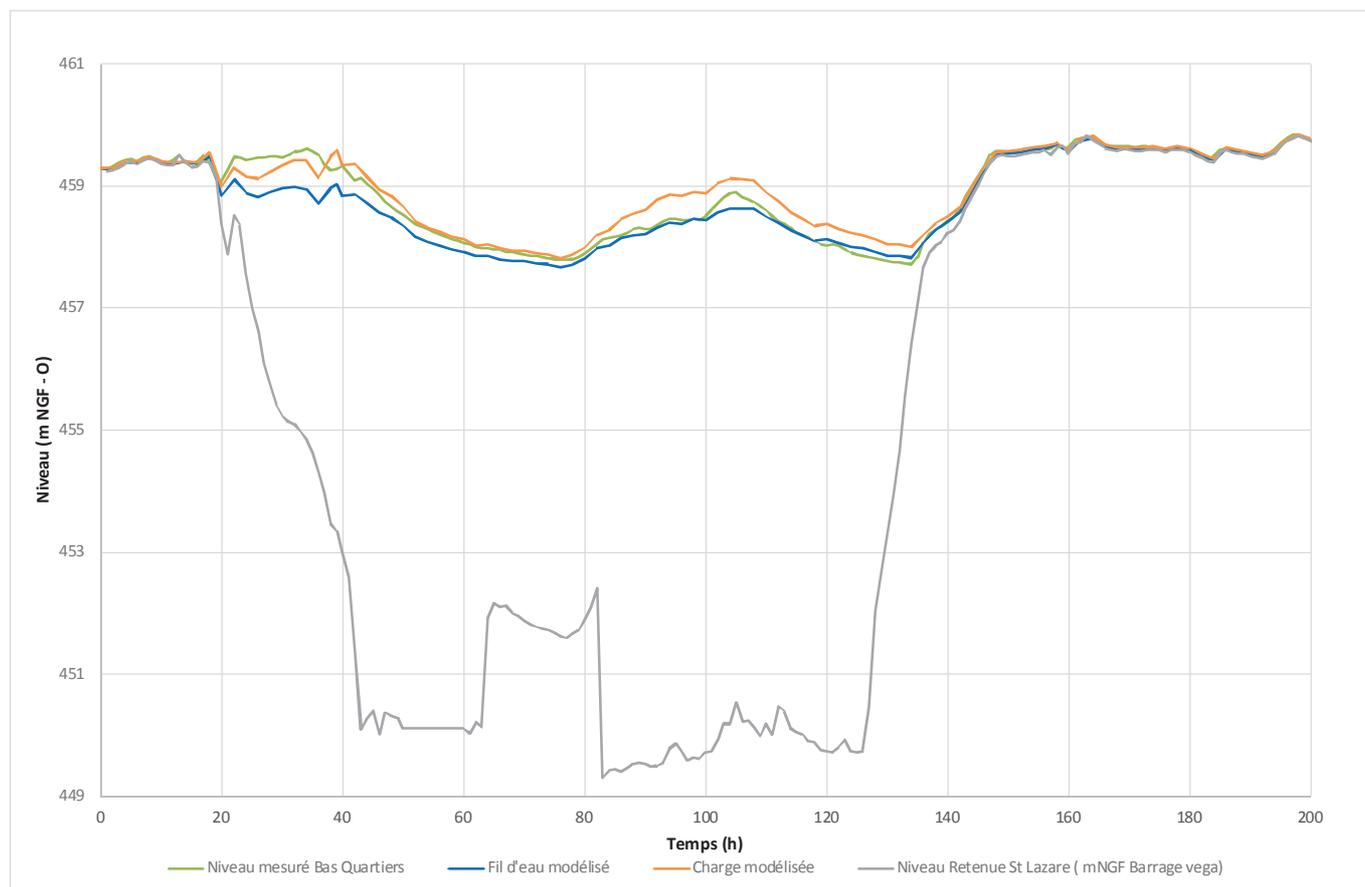


Figure 7. Niveaux modélisés et mesurés lors de la crue de 2016

L'erreur sur le niveau d'eau au regard des mesures est de 18 cm en moyenne pendant l'abaissement (de 18 à 48h) avec une tendance à sous-estimer les valeurs en début de crue (contrairement à la modélisation de la crue de 2003).

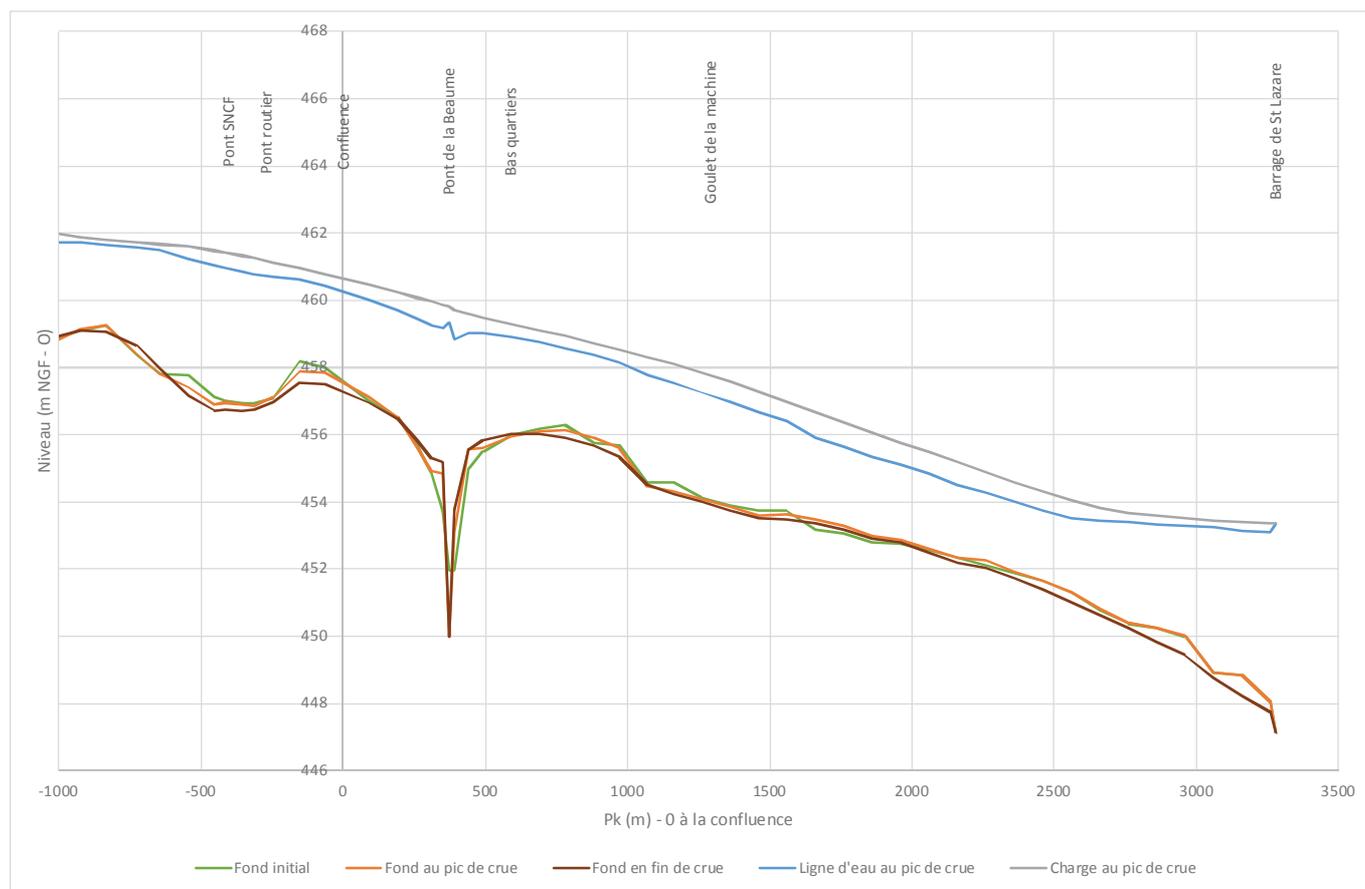


Figure 8. Evolution du fond du lit modélisée lors de la crue de 2016

L'érosion modélisée sous le pont est de 2 m et le fond atteint la cote 450 m NGF (limite basse fixée) ; la vitesse sous le pont au pic de crue atteint 3 m/s. Ceci est cohérent :

- crue de 2003 : débit de pointe de 1200 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 449 m NGF : 3.5 m/s,
- crue de 2016 : débit de pointe de 800 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 450 m NGF : 3 m/s.

La vitesse d'écoulement nécessaire à 450 m NGF est plus faible qu'à 449 m NGF du fait du tri granulométrique qui s'opère lors des érosions sous le pont, cf. § 2.2.1.

Le niveau de fond à la fin de la crue sous le pont est toujours de 450 m NGF (fond minimum atteint et fixé), soit près de 2 m au-dessous du niveau objectif (bathymétrie mesurée post-crue en 03/2017). Toutefois, il est possible que des dépôts se soient produits sous le pont entre 11/2016 et 03/2017. Un compromis a été recherché entre le calage pour la crue de 2003 qui modélise des dépôts rapides sous le pont à la descente de crue et celle de 2016 qui modélise des dépôts lents.

On voit que l'érosion à la fin de la crue atteint 25 cm au niveau des Bas Quartiers, l'évolution du fond entre le début de la crue et le pic de crue est faible (env. 15 cm).

2.2.4 Synthèse du calage

Les calages réalisés sur les crues de 2003 et 2016 sont jugés satisfaisants. La modélisation de la crue de 2003 a plutôt tendance à surestimer les niveaux alors que celle de 2016 à les sous-estimer au regard des mesures. L'évolution des fonds sous le pont est aussi un compromis entre 2003 et 2016, on note une tendance au dépôt un peu trop rapide en descente de crue en 2003 et a priori un peu trop lente en 2016. Ce calage est donc un compromis sur un jeu de paramètres commun. Par ailleurs, la précision des données hydrologiques utilisées ne permet pas d'espérer un meilleur calage sur les niveaux.

L'utilisation de la bathymétrie post crue, à la place de la place de la bathymétrie avant crue puisqu'on ne modélise pas les sédiments fins (cf. § 2.2.1) n'entraîne pas d'erreur trop importante. L'évolution des fonds au droit des Bas Quartiers est limitée au cours de la crue et notamment entre le début et le pic de crue, où elle est de moins de 20 cm pour les crues modélisées.

Finalement, l'utilisation d'un modèle fond mobile pour le calage a essentiellement pour intérêt de vérifier l'importance des évolutions en crue en lien avec le transit de sédiments grossiers, de voir où se déposent les sédiments grossiers apportés par la Durance et le Buëch pendant la crue et enfin d'analyser les érosions sous le pont et la localisation de la redépose de ces sédiments érodés.

Pour la modélisation des crues de référence (Q50 et Q100), cela permet (sous l'hypothèse que les sédiments fins sont rapidement érodés dans notre zone d'intérêt) de voir quelles seront les évolutions en crue du fond du lit en lien avec les sédiments grossiers :

- zones de dépôt des sédiments apportés depuis la Durance et le Buëch pendant la crue ;
- zones d'érosion ;
- zones de redépose de ces sédiments érodés.

2.3 NIVEAU AUX BAS QUARTIERS EN Q100

2.3.1 Données utilisées

Le modèle calé en crue (cf. § 2.2) a été réutilisé pour modéliser la crue centennale (crue centennale du BVintermédiaire de la Durance donc en considérant un laminage des débits dans la retenue de Serre Ponçon).

L'hydrogramme de référence utilisé dans l'état - cible de 2010 est fourni ci-dessous : le débit de pointe est de 2500 m³/s avec une répartition égale entre le Buëch et la Durance, soit 1250 m³/s pour chacune des 2 branches. La cote aval est fournie via la débitance des vannes. La bathymétrie utilisée est celle de 2017.

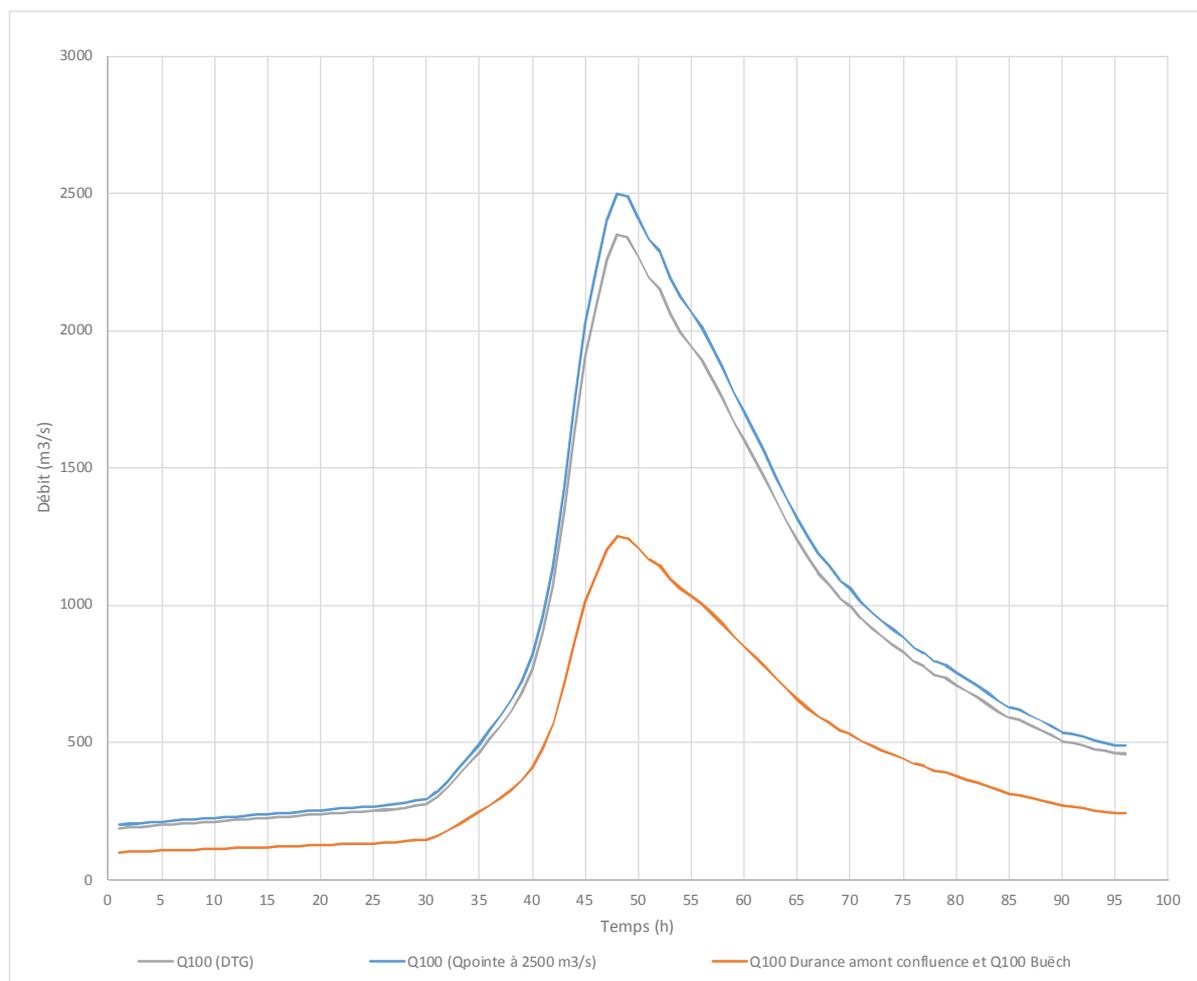


Figure 9. Hydrogrammes de crue centennale

Les apports solides de la Durance et du Buëch sont calculés par le logiciel sur la base de l'hydrologie et des paramètres choisis (cf. [1] - § 5). Pour les modélisations précédente réalisées, le débit de la Durance était faible au regard de celui du Buëch et les apports sédimentaires de la Durance étaient de fait limités. Pour la crue centennale, ils ont été calculés respectivement à 95 000 m³ et 40 000 m³ pour le Buëch et la Durance. Il est possible que le stock de sédiment dans le TCC de la Durance soit insuffisant pour fournir ces sédiments, toutefois les résultats indiqués ici sont sécuritaires en assimilant les apports solides à la capacité de transport.

Une étude de sensibilité à la répartition de débit entre la Durance et le Buëch est réalisée par la suite, cf. § 2.3.4.

L'érosion sous le pont de la Baume est calculée par le logiciel avec le coefficient de perte de charge singulière calé. La cote du point dur sous le pont est fixée pour avoir une vitesse crédible au pic de crue.

Pour affiner les calculs de ligne d'eau, le niveau de fond obtenu par Cavalcade au pic de crue est intégré dans le modèle Mascaret et un calcul au débit de pointe (2500 m³/s) est réitéré.

2.3.2 Evolution des fonds en crue centennale

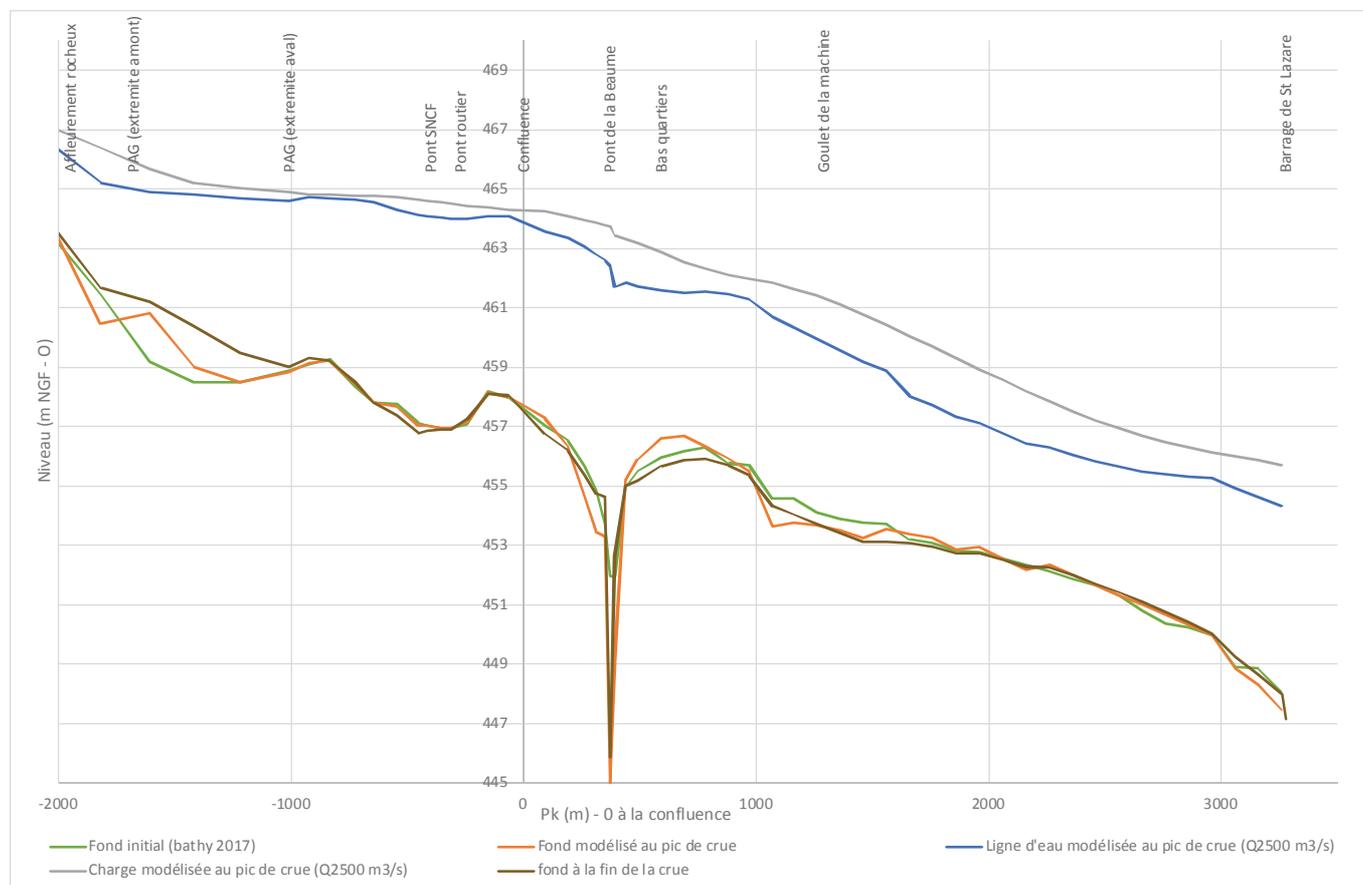


Figure 10. Modélisation de la crue centennale avec le logiciel Cavalcade

Au pic de crue, l'approfondissement modélisé est de 7 m sous le pont de la Baume pour atteindre 445 m NGF ; la vitesse est alors de 5 m/s. Ceci est cohérent :

- crue de 2016 : débit de pointe de 800 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 450 m NGF : 3 m/s,
- crue de 2003 : débit de pointe de 1200 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 449 m NGF : 3.5 m/s,
- Q100 : débit de pointe de 2500 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 445 m NGF : 5 m/s.

Cette érosion ne se comble pas en fin de crue. L'abaissement est proche de ce qui avait représenté artificiellement dans le logiciel Mascaret (446 m NGF pour limiter la vitesse à 6 m/s). Les sédiments érodés sous le pont se déposent momentanément en aval du pont, au niveau des Bas Quartiers du fait de la restriction de section au Goulet de la Machine et donc à la rehausse du niveau d'eau et à la diminution des vitesses. C'est donc le niveau d'eau imposé par la restriction de section au droit du Goulet de la Machine qui impose le niveau d'eau au droit des Bas Quartiers et pas le dépôt de sédiment. Ces sédiments sont ensuite évacués à la baisse de crue.

L'évolution des fonds au pic de crue n'est pas déterminante sur les niveaux d'eau atteints, sauf sous le pont de la Baume.

Le piège à graviers est quasi rempli en fin de crue. Mais le volume de sédiments grossiers sortant du piège est quasi nul. On ne note pas d'exhaussement des fonds en aval en piège. Les sédiments du Buëch n'atteignent pas la Durance car ils se déposent en amont et ils n'ont pas le temps de transiter jusqu'à la Durance (durée de transit trop longue au regard de l'hydrogramme de crue centennale). Dans la retenue de Saint Lazare, l'abaissement des niveaux au barrage permet une tendance plutôt à l'érosion mais qui reste relativement limitée du fait de la faible durée de la crue.

NB : il faut noter que l'hydrogramme de crue centennale **de référence** est particulièrement rapide et qu'il est probable qu'une crue plus longue, (nécessairement avec un débit de pointe plus faible pour garder la même occurrence), soit plus pénalisante en terme de volume d'apport solide. Toutefois, le barrage serait alors ouvert sur une période plus longue, ce qui permettrait un meilleur transit des sédiments.

2.3.3 Niveaux d'eau en crue centennale

Les niveaux d'eau ont été affinés en imposant, dans le modèle Mascaret réalisé dans le cadre de l'état cible 2010, les niveaux de fond calculés par Cavalcade au pic de crue en partant de la bathymétrie 2017.

Le graphique *Figure 11* présente les lignes d'eau en crue centennale calculées avec les fonds suivants :

- Mascaret : Fond fixe Géom 1 (approfondissement et élargissement sur 1500 m en aval du pont de la Baume de la bathymétrie 2003 (bleu foncé) ;
- Mascaret : Fond fixe Géom 2 = bathymétrie 2003 (bleu clair) ;
- Mascaret : Fond mobile pic de crue sur bathymétrie 2017 (violet)
- Cavalcade : Fond mobile pic de crue sur bathymétrie 2017 (vert)

NB : la bathymétrie 2017 est plus basse que la bathymétrie 2003 (Géom2) ; elle est proche de la géométrie 1 pour la cote des points bas mais la section est moins large, cf. [1] - § 3.3.

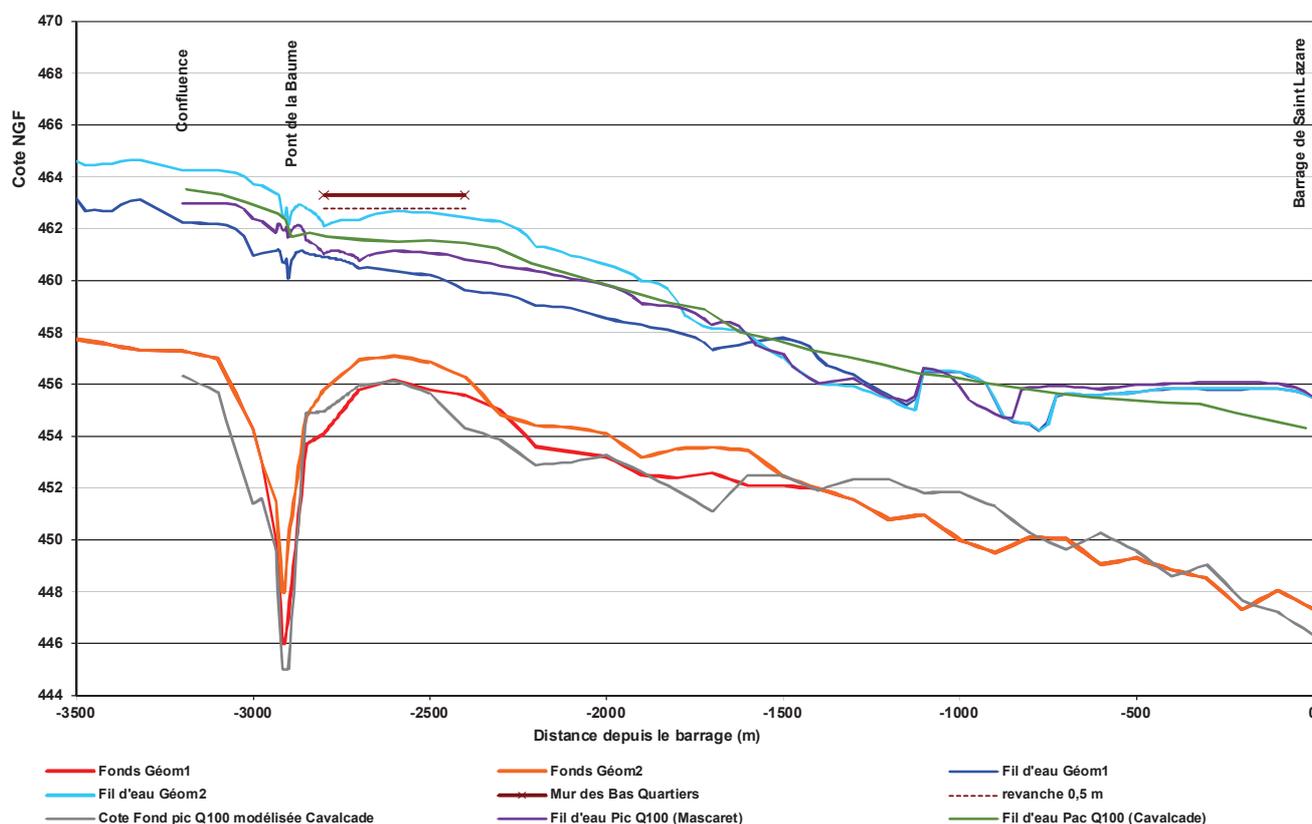


Figure 11. Lignes d'eau en crue centennale Mascaret vs Cavalcade

On voit que :

- Les lignes d'eau calculées avec Cavalcade ou avec Mascaret sur le fond mobile au pic de crue sont proches et situées entre celles obtenues avec les géométries 1 et 2 ; ce qui est cohérent avec les niveaux de fond ;
- Ces lignes d'eau sont en-deçà de la cote de référence maximale définie au droit des Bas Quartiers avec env. 1.5 m de revanche (2 m par rapport au haut du muret) ;

- L'abaissement des fonds grâce aux ouvertures du barrage réalisées en crue (notamment 2008 et 2016) permet de se rapprocher de la géométrie cible 1 et d'abaisser les lignes d'eau en crue centennale.

2.3.4 Sensibilité à la répartition de débit Buëch/Durance

Le débit en crue centennale a été évalué à 2500 m³/s et réparti arbitrairement pour moitié entre le Buëch et la Durance, cf. § 2.3.1.

Pour évaluer la sensibilité des résultats à cette répartition, le modèle a été repris en imposant l'hydrogramme de crue à 75% sur le Buëch et à 25% sur la Durance. Les débits de pointe sont alors respectivement de 1875 et 825 m³/s pour le Buëch et la Durance.

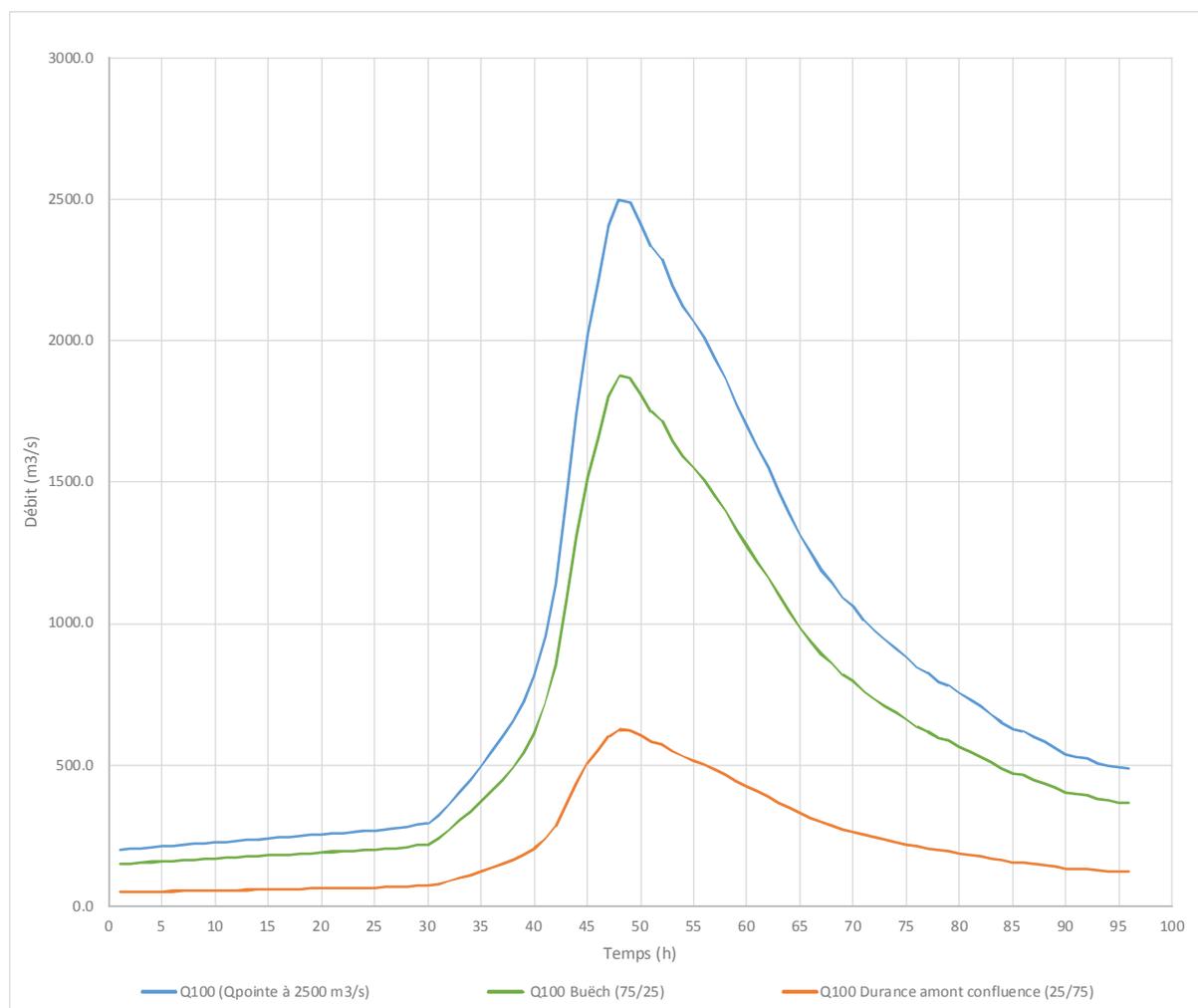


Figure 12. Hydrogrammes pour une répartition de la crue centennale à 75% pour le Buëch et 25% sur la Durance

Les apports solides ont été calculés respectivement à 160 000 m³ et 15 000 m³ pour le Buëch et la Durance, versus 95 000 et 45 000 m³ pour une répartition homogène des débits entre les 2 branches.

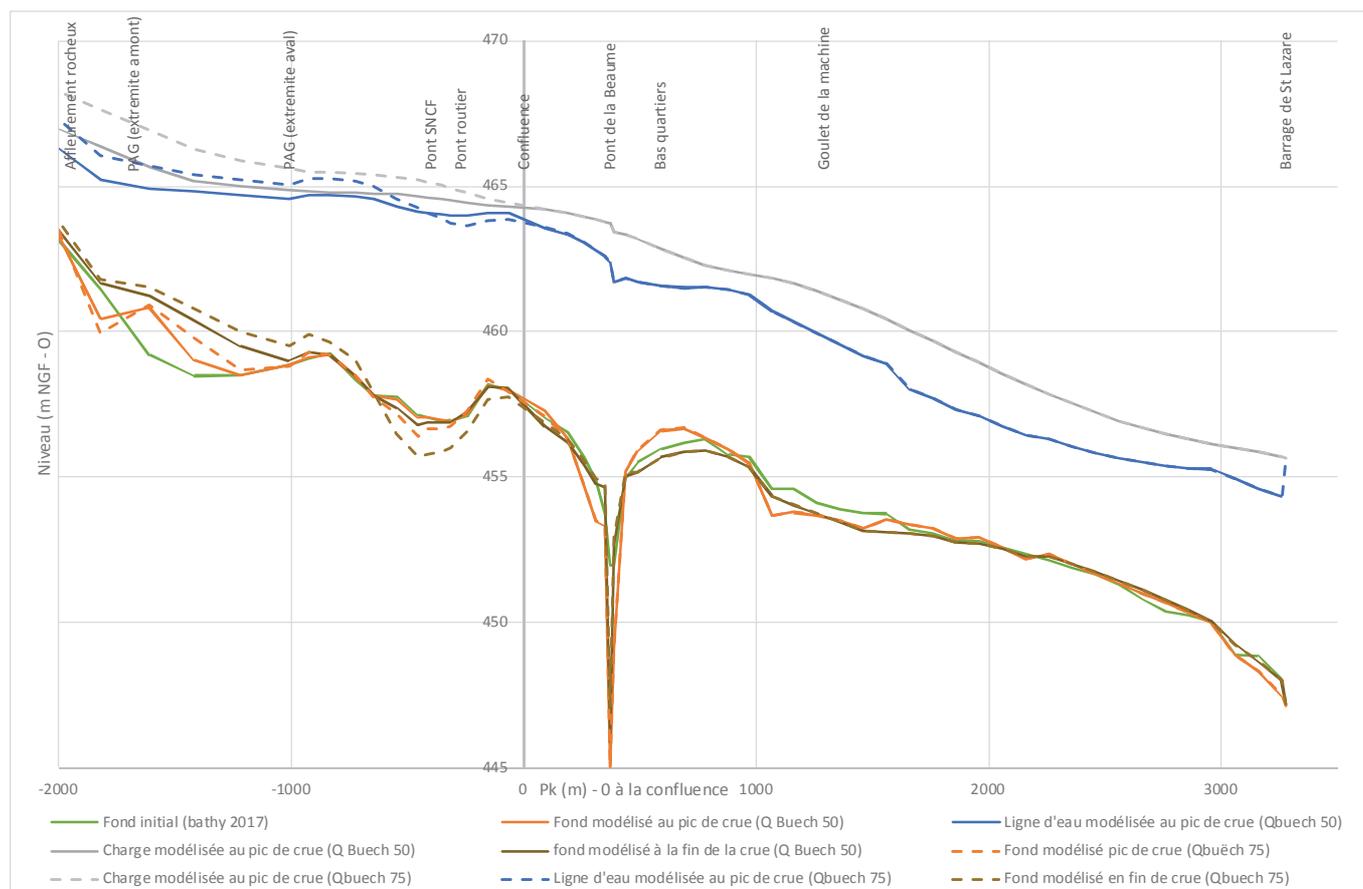


Figure 13. Impact de la répartition des débits Buëch / Durance sur les niveaux en crue centennale

L'impact de la répartition des débits est fort sur la branche Buëch du fait notamment de l'augmentation des débits liquides. On note également un approfondissement du lit sous les ponts en aval du PàG.

Pour la Durance en aval de la confluence, la modification de répartition de débit ne peut avoir qu'un impact sur les volumes de sédiments charriés puisque l'hydrogramme liquide cumulé n'a pas été modifié. Le Buëch apporte plus de sédiments que la Durance pour un même hydrogramme liquide.

Or, on a vu § 2.3.2, que le volume de sédiments sortants du Buëch était très limité en crue centennale du fait des dépôts et du temps de transit. Il n'est donc pas étonnant de ne voir **aucun impact de la modification de répartition hydrologique sur les niveaux d'eau et de fond dans la retenue de Saint Lazare.**

2.3.5 Impact du remplissage du PàG sur les niveaux atteints en crue centennale

La majorité des sédiments du Buëch se déposent dans le PàG en crue centennale (cf. § 2.3.2). Or, le PàG a été dimensionné pour reprendre les apports annuels mais pas pour une crue centennale ; celle-ci peut donc survenir alors que le piège est partiellement ou complètement rempli (crue de fin de printemps ou crue d'automne alors que le piège n'a pas été curé l'été). Une modélisation a été faite avec le piège largement rempli pour voir l'impact sur les niveaux de fond et d'eau en crue centennale :

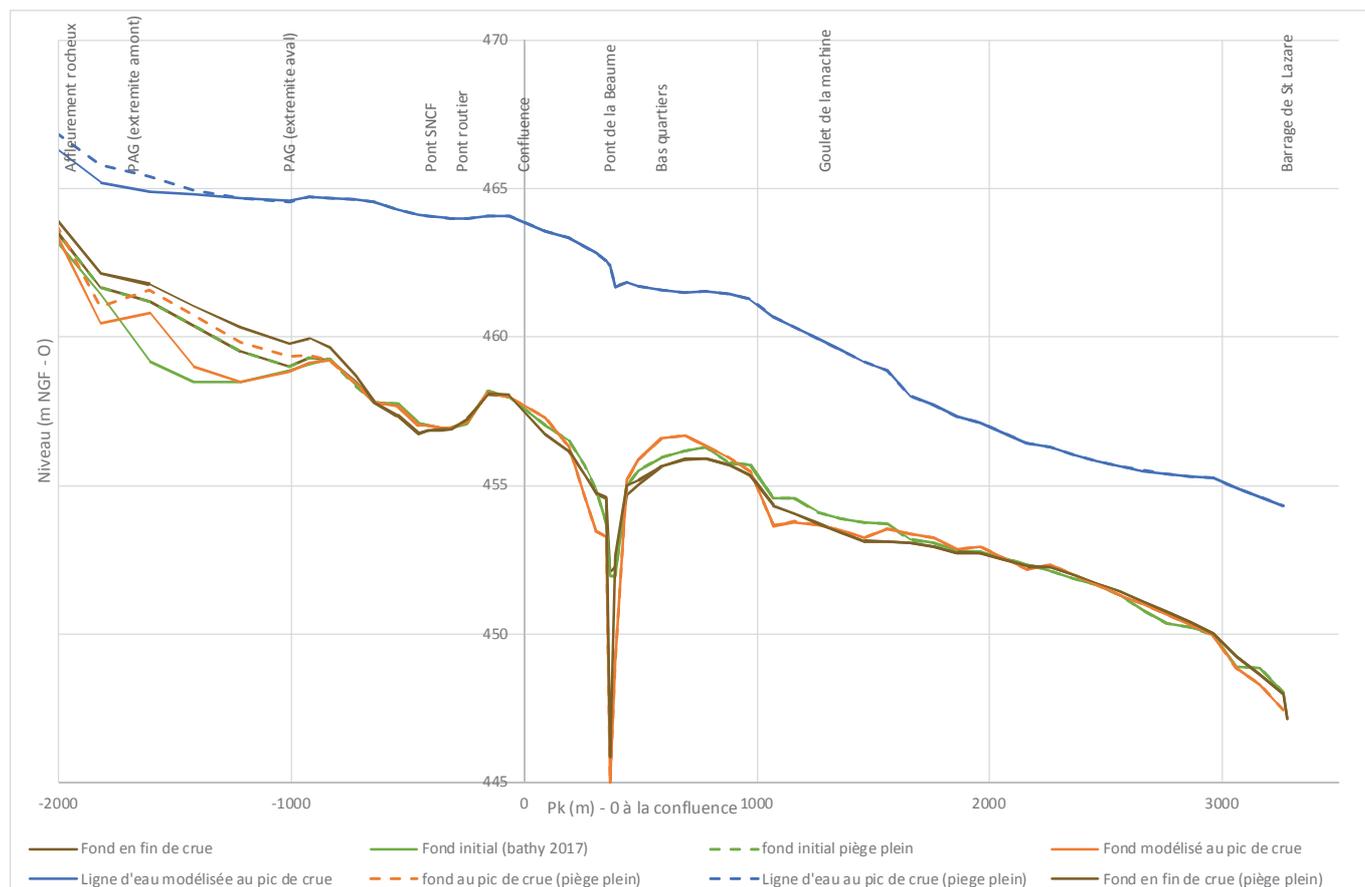


Figure 14. Impact du remplissage du PàG sur les niveaux en crue centennale

On voit que même si le piège est déjà fortement rempli avant la crue, il reste une capacité de dépôt qui entraîne un remous solide en amont mais qui n'impacte pas l'aval.

Il n'y a aucune influence du remplissage du PàG sur les niveaux d'eau maximums atteints dans la retenue de Saint Lazare, au moment de la crue centennale du fait des dépôts résiduels et du temps de transit des sédiments,

Il est donc inutile de chercher à conserver un volume disponible dans le PàG pour stocker les apports sédimentaires en crue.

On voit également qu'avec l'hydrogramme type de la crue centennale, les fonds n'ont pas subi plus de dépôts en aval du PàG du fait de son remplissage, même en fin de crue. Un remplissage excessif ne devrait donc pas entraîner un besoin de curage à la confluence en post-crue. Il est toutefois possible que les résultats soient différents avec une crue lente mais le barrage serait alors ouvert pendant une longue période ce qui favorise l'évacuation des sédiments au niveau des Bas Quartiers comme l'a montré l'évolution des fonds par le passé.

2.4 NIVEAU AUX COUDOULETS EN Q50

2.4.1 Données utilisées

Le modèle calé en crue (cf. § 2.2) a été réutilisé pour modéliser la crue cinquantennale.

L'hydrogramme de référence utilisé dans l'état - cible de 2010 a la même forme que l'hydrogramme de crue centennale cf. § 2.3.1, avec une pointe calée à 1870 m³/s et une répartition égale entre le Buëch et la Durance. La cote aval est fournie via la débitance des vannes. La bathymétrie utilisée est celle de 2017.

Les apports solides de la Durance et du Buëch sont calculés par le logiciel sur la base de l'hydrologie et des paramètres choisis (cf. [1] - § 5). Pour la crue cinquantennale, ils ont été calculés respectivement à 64 000 m³ et 27 000 m³ pour le Buëch et la Durance.

L'érosion sous le pont de la Baume est calculée par le logiciel avec le coefficient de perte de charge singulière calé. Le point dur sous le pont est fixé pour avoir une vitesse crédible au pic de crue.

Pour la crue cinquantennale, l'objectif est de comparer les niveaux modélisés aux niveaux de référence au droit des Coudoulets, secteur non modélisé directement avec Cavalcade. La méthodologie suivante a été appliquée :

En aval de la confluence, le niveau des fonds au pic de crue (1870 m³/s) sur la base de la bathymétrie 2017 a été obtenu par un calcul Cavalcade. Ces fonds ont ensuite été intégrés dans le modèle Mascaret de manière à obtenir le niveau d'eau en Q50 à la confluence (condition limite aval de la Branche Coudoulets). Du fait de la faiblesse des apports solides de la branche Durance au regard de la branche Buëch, il a été choisi de modéliser la branche Durance en amont de la confluence, à fond fixe : la bathymétrie 2017 a été intégré dans le modèle Mascaret réalisé dans le cadre de l'état cible 2010.

Les résultats seront comparés aux résultats obtenus avec les fonds issus de l'état cible.

2.4.2 Evolution des fonds en crue cinquantennale issus du modèle Cavalcade

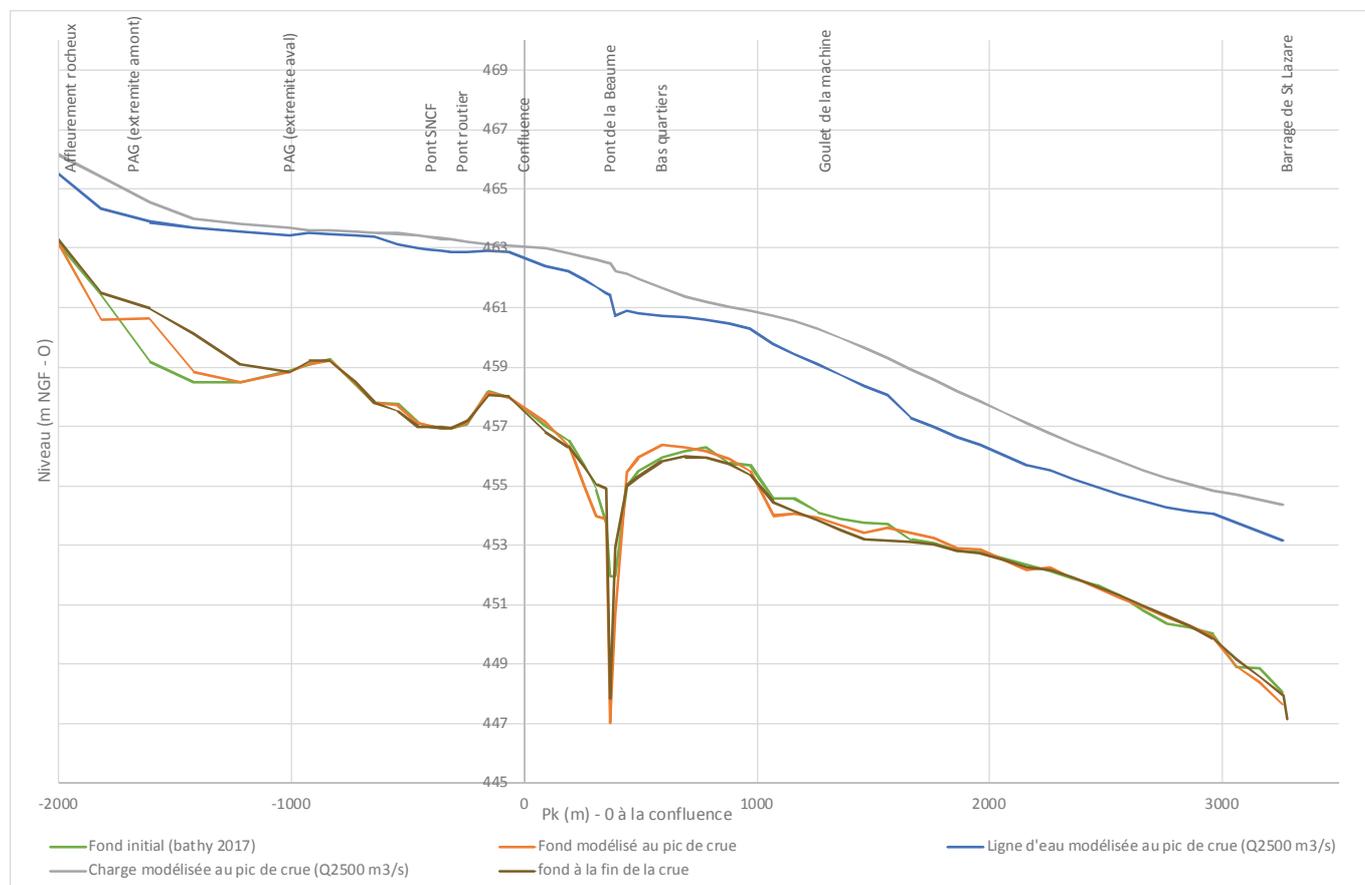


Figure 15. Modélisation de la crue cinquantennale avec le logiciel Cavalcade branche Buëch et aval confluence

Au pic de crue, l'approfondissement modélisé est de 5 m sous le pont de la Baume pour atteindre 447 m NGF ; la vitesse est alors de 4.5 m/s. Ceci est cohérent :

- crue de 2016 : débit de pointe de 800 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 450 m NGF : 3 m/s,
- crue de 2003 : débit de pointe de 1200 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 449 m NGF : 3.5 m/s,
- Q50 : débit de pointe de 1870 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 447 m NGF : 4.5 m/s.
- Q100 : débit de pointe de 2500 m³/s ; vitesse limite d'érosion à 445 m NGF : 5 m/s.

2.4.3 Niveaux d'eau en crue cinquantennale sur la Branche des Coudoulets

Le graphique *Figure 16* présente les lignes d'eau en crue cinquantennale calculées avec les fonds suivants sur la Branche des Coudoulets :

- Mascaret : Fond fixe Géom 1 (approfondissement et élargissement sur 1500 m en aval du pont de la Baume de la géométrie 2003 (bleu foncé);
- Mascaret : Fond fixe Géom 2 = bathymétrie 2003 (bleu clair);
- Mascaret : Fond fixe bathymétrie 2017 au droit des Coudoulets (rose)

NB : les niveaux de référence au niveau des maisons rachetées sont décrits au § 2.1.

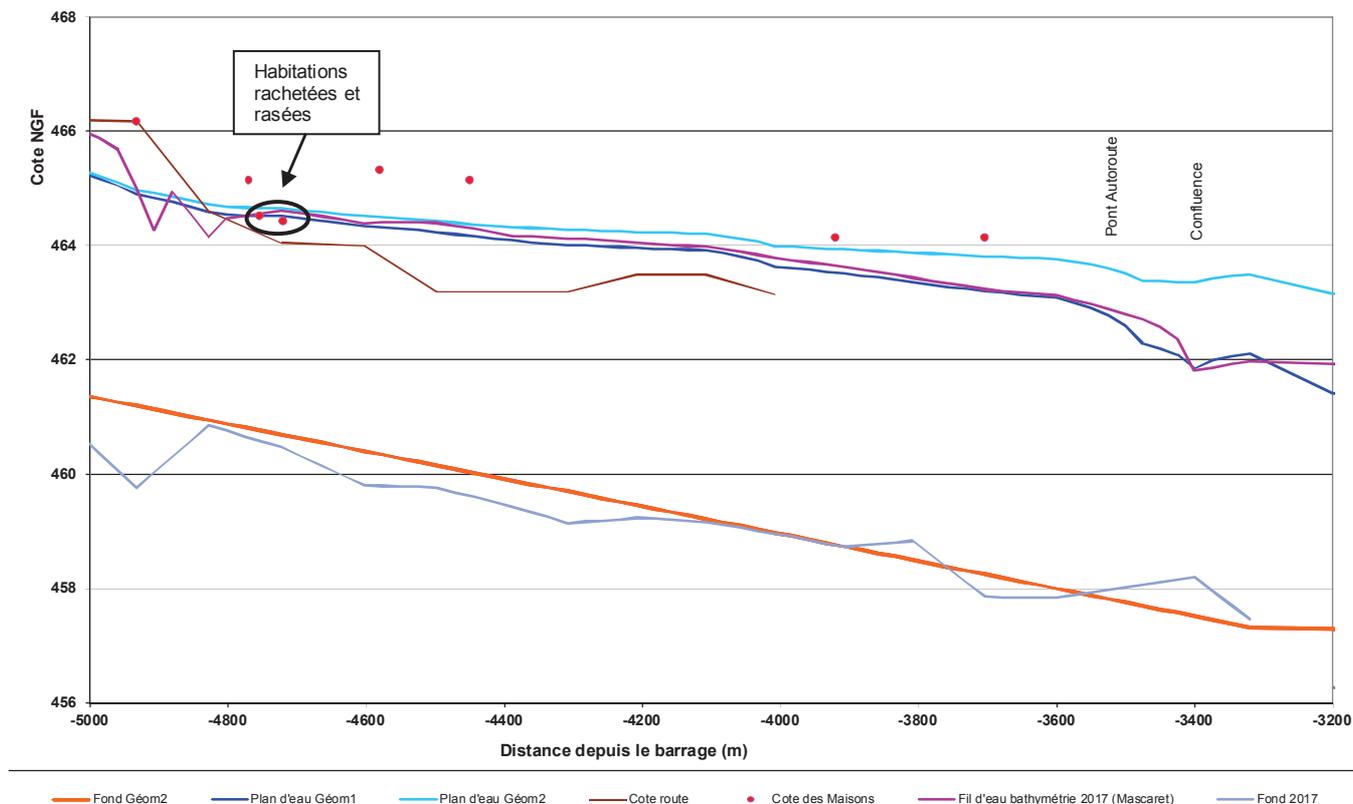


Figure 16. Lignes d'eau en crue cinquantennale au droit des Coudoulets avec la bathymétrie 2017

Nota : dans la zone des Coudoulets, les fonds Géom2 et Geom1 sont confondus

On voit que :

- Sur la branche Durance, en amont de la confluence, la ligne d'eau est très proche de la ligne d'eau obtenue avec Géom1 ;
- **L'ensemble des habitations existantes aux Coudoulets sont hors d'eau pour la crue cinquantennale sur la base de la bathymétrie 2017, mais avec une revanche faible (environ 50 cm) ;**
- Les 2 habitations les plus critiques ont été rachetées par EDF et rasées ;
- La route longeant la Durance est inondable en crue cinquantennale, comme dans l'état cible (Geom 1 et 2) ;
- Le projet de recalibrage a été arrêté conformément au dossier d'autorisation au PK 4790 en limite du domaine concédé, notamment les banquettes prévues en rive droite à la cote 462.5. Cela se traduit par une remontée de la ligne d'eau sur les 250 m les plus amont ;

2.5 SYNTHÈSE SUR LES NIVEAUX EN CRUE

La mise en place du PàG et les abaissements du barrage de Saint Lazare en crue en 2008 et 2016 ont permis d'abaisser les niveaux de fond dans la retenue et notamment au droit des Bas Quartiers (bathymétrie 2017). Le niveau des points bas en 2017 est similaire à celui de la géométrie cible 1 mais les largeurs sont plus faibles. Le fond évolue vers la géométrie 1 au fur et à mesure des abaissements en crue. Il est donc indispensable de réaliser des ouvertures du barrage en suivant la consigne de 2015 dès que possible.

Le niveau atteint en crue centennale (sur la base de la bathymétrie 2017 et de la modélisation fond mobile) permet une revanche confortable (1.5 m par rapport au muret des Bas Quartiers).

Le recalibrage de la branche Durance et de la confluence ont permis un net abaissement des fonds. On note une légère tendance au dépôt dans le lit mineur depuis les travaux de 2012. Toutefois, les niveaux atteints permettent de ne pas inonder les maisons restantes pour une crue cinquantennale (avec une revanche d'environ 50 cm) sur la base de la bathymétrie 2017 à fond fixe. Le niveau dans le secteur des Coudoulets reste donc à surveiller. Des bathymétries sont réalisées tous les 2 ans et après chaque crue significative.

Vus les résultats présentés ci-dessus, il n'y a pas lieu de revoir les niveaux cibles dans la retenue, ni les modalités de gestion sédimentaires de la retenue : gestion par abaissement en crue. Par ailleurs, des propositions de modification de gestion du PàG ont été émises en [1] - § 8.8.

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 les modèles.

3. REFERENCES

[1] : Modélisation hydrosédimentaire du piège à graviers du Buech, EDF 2019

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

[3] : Analyse morphologique de la sédimentation dans les retenues de l'Escale et Saint Lazare sur la Durance, HP-76/03/012/A, LNHE, JP Bouchard, 06/2003

[4] : Retenue de Saint Lazare – Présentation et calage du modèle hydraulique Mascaret utilisé pour la détermination de l'état cible, E. VALETTE, CIH, IH.ENVA-DURANCE.ENVA.STLAZARE.00045.A 2007