

Étude hydraulique de la confluence du
torrent de la Muzelle avec le Vénéon

MARS 2020



S.A.R.L. E.T.R.M.
Vincent KOULINSKI
581 ROUTE DE MONT CARMEL
Chef Lieu
73700 Les Chapelles
Tél. : 04.79.40.04.78
etrm@cegetel.net

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
1.1. OBJET DE L'ETUDE	1
1.2. HISTORIQUE DES CRUES	2
1.3. ÉTUDE HYDROLOGIQUE	3
1.3.1. Débit de pointe des fortes crues	3
1.3.2. Hydrogrammes de crue du Torrent de la Muzelle	3
1.3.3. Hydrogrammes de crue du Vénéon.....	4
1.4. ÉVOLUTION DU SITE.....	5
2. TORRENT DE LA MUZELLE	9
2.1. BASSIN VERSANT DE LA MUZELLE.....	9
2.2. CONE DE DEJECTION DE LA MUZELLE	11
2.3. PENTE D'EQUILIBRE - PROFIL EN LONG	17
2.4. QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE	19
2.5. ÉCOULEMENT EN CRUE	24

3. VENEON 26

3.1.	DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE.....	26
3.2.	PENTE D'EQUILIBRE - PROFIL EN LONG.....	38
3.3.	QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE	40
3.3.1.	Situation actuelle.....	40
3.3.2.	Capacité de reprise	43

4. PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT 47

4.1.	SYNTHESE SUR L'ETAT ACTUEL	47
4.2.	PRINCIPE D'AMENAGEMENT DU VENEON	47
4.2.1.	Tracé général.....	47
4.2.2.	Protection devant un perré existant.....	49
4.2.3.	Protection en l'absence de perré existant	50
4.3.	AMENAGEMENT DU TORRENT DE LA MUZELLE.....	52
4.3.1.	Gestion des dépôts	52
4.3.2.	Passerelle de l'Alleau	56
4.4.	ENTRETIEN	57
4.4.1.	Ouvrages	57
4.4.2.	Curage	57

1. INTRODUCTION

1.1. Objet de l'étude

Les torrents de la Muzelle et du Vénéon, présentent des risques majeurs identifiés sur les campings de la Cascade et du Champ du Moulin, et plus largement sur les hameaux de l'Alleau et de Bourg d'Arud, menacés par les crues torrentielles.

Ce site a donc fait l'objet de nombreuses études en vue d'une protection des aménagements - essentiellement touristiques établis à proximité de cette confluence :

- Commune de Vénosc - ONF- Service départemental RTM de l'Isère - Torrents du Vénéon et de la Muzelle - Étude hydraulique pour la protection du camping "le Champ du Moulin" - Février 2008
- Commune de Vénosc - ONF - Service départemental RTM de l'Isère - Restauration de l'espace de liberté du Vénéon et renforcement de la protection des infrastructures touristiques de Vénosc - tranches T2+T3 - Mars 2016.
- Syndicat d'Assainissement du Canton de l'Oisans et de la basse Romanche - Plan de gestion du transport solide du bassin versant amont de la Romanche Phase 1 : État des lieux - Diagnostic Hydrétudes - Mars 2018

De nombreux éléments de la présente étude - notamment par rapport à la situation actuelle - sont repris des études réalisées par le RTM.

La figure suivante montre l'ensemble de la zone d'étude :



Figure 1 : Cône de déjection du torrent de la Muzelle et Vénéon.

1.2. Historique des crues

Le Vénéon a causé d'importants dégâts par le passé. Seules les crues les plus fortes - ou les dégâts spécifiques au site d'étude sont repris ci-dessous mais aussi en intégrant les crues du torrent de la Muzelle :

?	. Le torrent de la Pisse - autre nom du torrent de la Muzelle - aurait débordé en haut du hameau de l'Alleau, cheminant au travers des terrains situés en rive droite
XVII ^{ème} siècle	A Vénosc, les pertes dues tant au Vénéon qu'aux torrents des Clos, de Vencourt, de Rif, de Merdarol, de Bouronnet, de la Pisse ont été de 23 hectares
09/08/1852	Une crue du Vénéon renverse le pont en pierre de Vénosc.
29/09/1928	A Vénosc, une crue du Vénéon emporte la route du Bourg d'Arud sur 80 mètres ainsi qu'une maison appartenant à M. Balme. Le pont du Bourg d'Arud est impraticable et a dû être miné pour débloquer un barrage formé entre les 2 arches.
1946	Un éboulement rocheux atteignant le lit du Vénéon vers 1000 m d'altitude provoque la formation d'un lac qui s'est maintenu pendant environ 3 ans. Sa destruction progressive par les écoulements du torrent a été à l'origine d'un engravement notable du lit en aval de Bourg d'Arud à Vénosc.
08/06/1955	Une crue du Vénéon estimée à 70 m ³ /s aux Étages détruit plusieurs ouvrages de protection à hauteur du hameau de Bourg d'Arud, sur la commune de Vénosc. Un curage du lit s'avère nécessaire à cause des matériaux charriés.
14/07/1987	Une crue du Vénéon faisant suite à un orage provoque un débordement du torrent au droit et en aval de la base aquatique de Vénosc, ainsi que des dégâts nécessitant de réaliser des travaux de protection de berge et de curage au droit du camping "le Champ du Moulin" de Bourg d'Arud.
1994 ?	Débordement du torrent de la Pisse sur sa rive gauche.
24/10/2006	Une crue du Vénéon faisant suite à de fortes pluies provoque une montée d'eau atteignant presque (-20 cm) le sommet de la berge rive droite au niveau du camping "le Champ du Moulin" de Bourg d'Arud à Vénosc. Les enrochements de protection édifiés en 2002 sont déstabilisés à cause de l'entraînement des matériaux fins de la berge.
26/05/2008	Crue du Vénéon à la suite de précipitations durables et à caractère orageux, associées à la fonte du manteau neigeux. Pas de désordres particuliers constatés. Débit à Bourg d'Arud estimé entre 100 et 140 m ³ /s. Niveau des plus hautes eaux à - 70 cm par rapport à la crête de la digue en amont du seuil.

Les dégâts liés au torrent de la Pisse - ou de la Muzelle - paraissent très modérés.

1.3. Étude hydrologique

1.3.1. Débit de pointe des fortes crues

La qualité de l'étude RTM de 2008 permet de reprendre les estimations des débits de pointe alors réalisés :

	Vénéon amont	Torrent de la Muzelle	Vénéon aval
Superficie bassin versant	240	16	256
Débit décennal (m ³ /s)	124	10	150
Débit centennal (m ³ /s)	305	35	320

1.3.2. Hydrogrammes de crue du Torrent de la Muzelle

L'hydrogramme de crue est indispensable pour la simulation d'un épisode de crue et pour la détermination des volumes de matériaux apportés. Cet hydrogramme est défini par le débit de pointe.

Cependant, il est nécessaire de connaître sa durée ou son volume, ces paramètres étant directement liés au volume de matériaux apportés.

La démarche retenue est alors la suivante :

- Pour la **crue décennale**, le temps de montée est un peu supérieur au temps de concentration, cette approximation étant très courante en hydrologie. Une montée de crue en trois heures est donc retenue. Cela conduit à une crue courte et peu volumineuse.
- Pour une **crue centennale**, la démarche est plus complexe :
 - Le scénario retenu est celui d'un épisode pluvieux intense durant une journée, la pluie étant évidemment irrégulière durant cette période. C'est donc une pluie centennale journalière qui est retenue, soit 100 mm ici.
 - Le volume d'eau écoulé est déterminé en considérant un coefficient de ruissellement sur la journée. Le bassin versant reçoit de fortes pluies (ce qui majore le coefficient de ruissellement). Une valeur de 0.5 est donc retenue.
 - La durée de la crue est alors ajustée pour obtenir le volume déterminé précédemment. Cela conduit à un hydrogramme plutôt trapu, mais réaliste pour une forte crue. Le temps de montée est alors de 5 heures.

La figure suivante montre ces hydrogrammes de crue pour une crue décennale et une crue centennale :

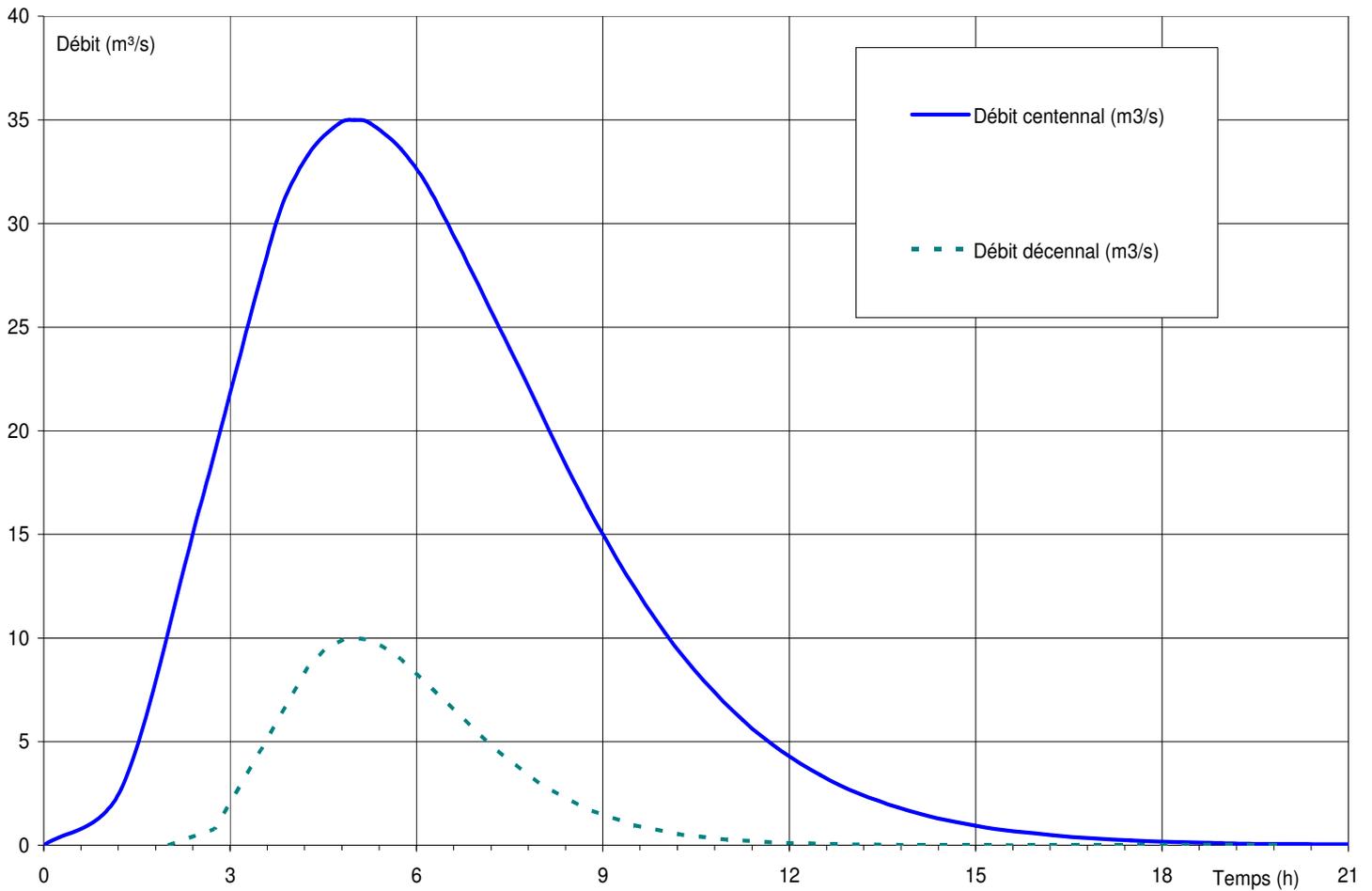


Figure 2 : Débit liquide pour une crue décennale et une crue centennale.

Il est possible ensuite d'estimer les apports solides correspondant à ces débits liquides.

1.3.3. Hydrogrammes de crue du Vénéon

Pour le Vénéon, dont le volume transporté en crue est moins prépondérant, les hypothèses du RTM sont retenues et synthétisées dans le tableau suivant :

Site	Superficie du bassin versant (km ²)	Durée caractéristique de crue (h)	Q _{i10} (m ³ /s)	Q _{i100} (m ³ /s)
Plan du Lac	235	10,2	140	300
Pont de Bourg d'Arud	240	10,3	142	305
En aval de la confluence avec le torrent de la Muzelle	256	10,5	150	320

1.4. Évolution du site

Les photos suivantes permettent la comparaison entre la Carte d'État Major dressée au milieu du XIX^{ème} siècle et la carte actuelle :



Figure 3 : Comparaison entre la carte du XIX^{ème} siècle et l'actuelle.

Ce document n'est pas assez précis pour mettre en évidence des évolutions du lit du Vénéon. Par contre, il indique clairement le changement de lit du torrent qui longeait le versant sans le coude actuel. La confluence était alors située nettement en aval.

La figure suivante permet la comparaison entre la photo en 1952 et la situation actuelle :

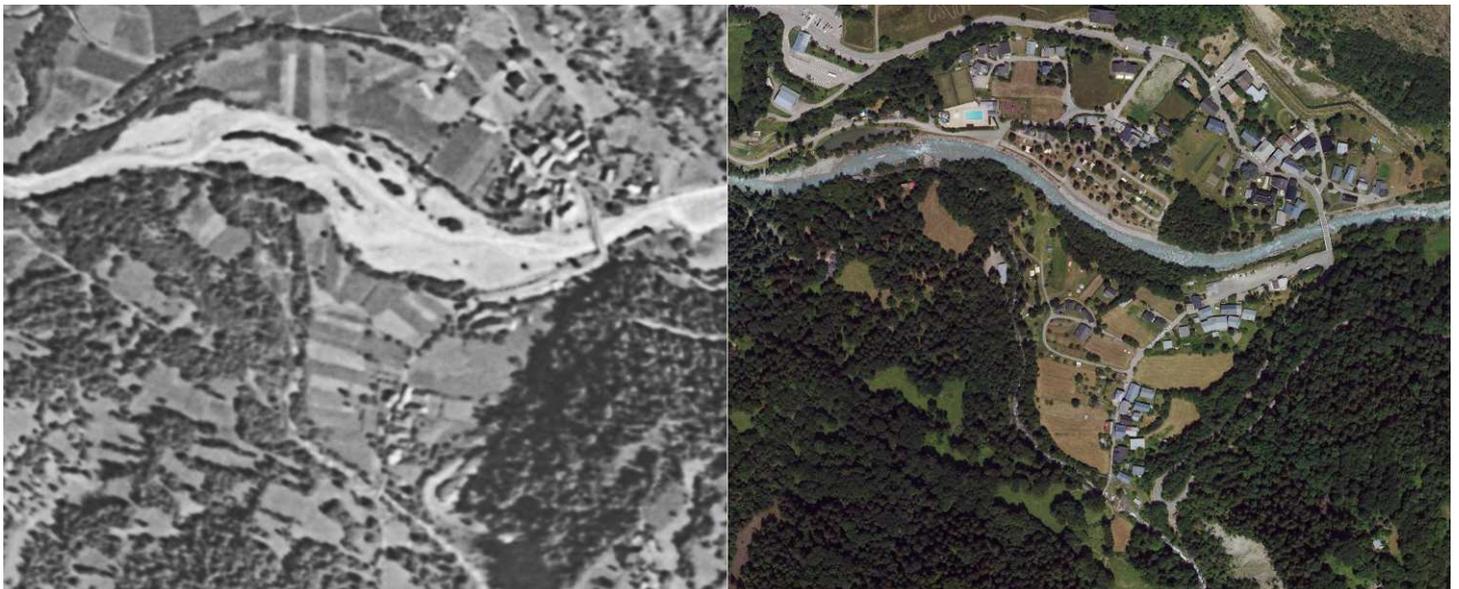


Figure 4 : Comparaison entre la photographie du milieu du XX^{ème} siècle et l'actuelle.

Classiquement, le boisement a considérablement progressé en près de 7 décennies. Le tracé du torrent de la Muzelle ne semble pas avoir évolué sur cette période, ce qui suggère que le changement de lit se soit produit entre 1850 et 1950.

Le Vénéon présente au contraire des évolutions majeures avec un lit qui était considérablement nettement plus large en 1952 avec même le développement d'îles. Cette photo suggère un lit engravé, ce qui n'est pas très étonnant, la photo ayant été prise seulement 6 ans après l'éboulement de 1946.

Ainsi, les photos suivantes permettent de mettre en évidence l'impact de l'éboulement juste en amont de la zone d'étude :



Figure 5 : Vu de l'éboulement de 1946 sur la photo de 1952 et actuellement.

La photo suivante montre cette zone totalement pavée aujourd'hui :



Photo 1 : Lit au droit de l'éboulement de 1952.

La photo suivante reprend les aménagements réalisés dans le lit du Vénéon indiqués dans le rapport du RTM :

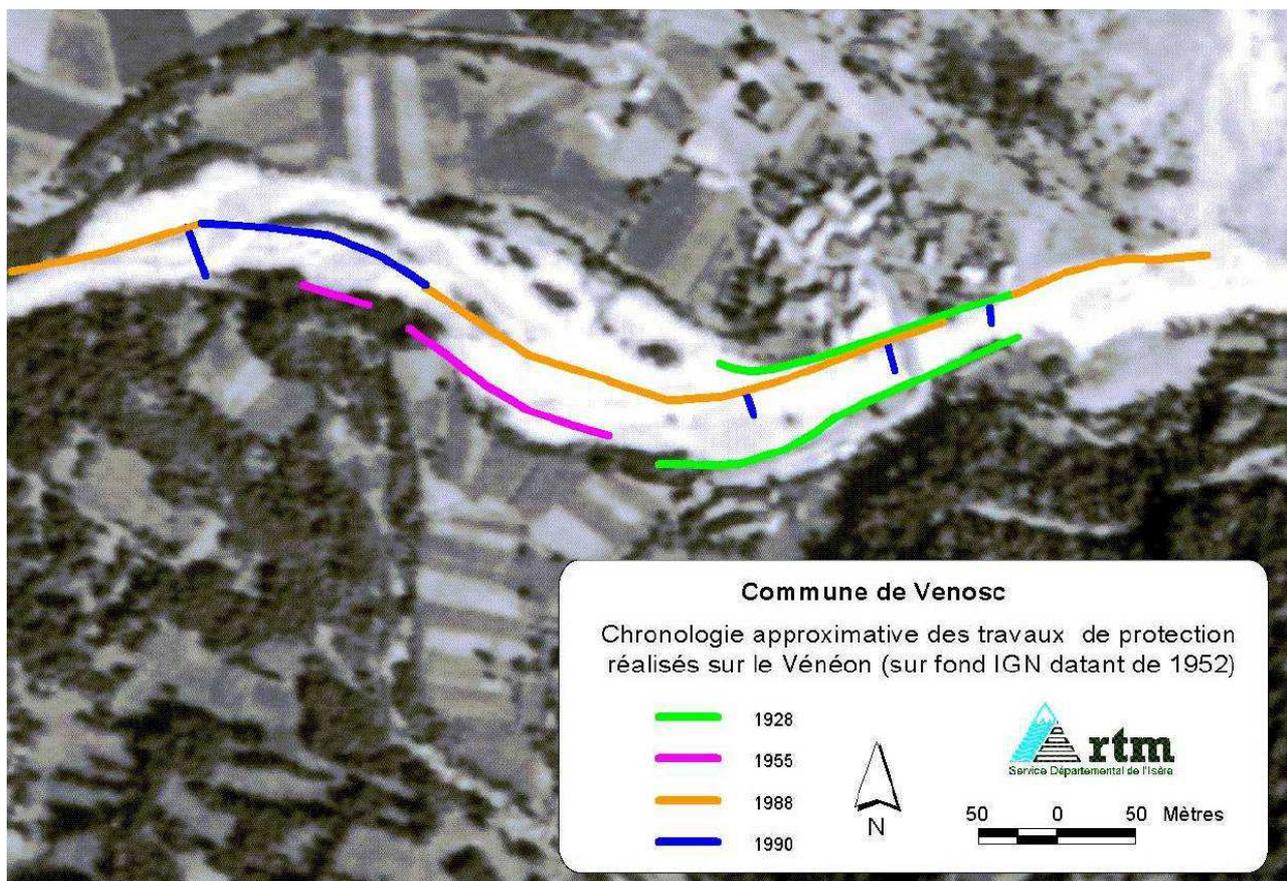


Figure 6 : Aménagements réalisés sur le Vénéon.

Sans surprise, la "rétractation de la bande active" est avant tout liée aux travaux de protection de berge, sans que l'impact d'une éventuelle modification du transport solide ne puisse être mis en évidence ici.

La photo suivante montre le lit vers 1900 avec un lit large mais partiellement pavé et peu mobile malgré la présence d'une île... qui semble encore visible en 1950 :



Figure 7 : Lit vers 1900 (document RTM).

La photo suivante montre le lit juste après la crue de 1987 avec un lit qui semble figé (même s'il a été en limite de débordement). Le parking est déjà très net dans toute la partie amont :



Figure 8 : Lit figé après la crue de 1987 (document RTM).

2. TORRENT DE LA MUZELLE

2.1. Bassin versant de la Muzelle

Ce bassin versant très raide et allongé se déploie au sud de Vénosc. Il est dominé par la Roche de la Muzelle (3 465 m d'altitude) et orienté au Nord. Le glacier de la Muzelle est encore bien présent et occupe une fraction marginale du bassin versant. Ces écoulements rejoignent directement le torrent via le ruisseau de Chapeau Roux à l'Est du Lac de la Muzelle. Le Lac de la Muzelle intercepte l'essentiel du reste du haut bassin versant et arrête tout le transport solide amont essentiellement apporté par le ruisseau des Cabanes.

L'étude ayant été réalisée en période hivernale, une reconnaissance du bassin versant n'a pas été possible. Les éléments suivants proviennent donc essentiellement du rapport RTM de 2008. Il est possible de distinguer les secteurs suivants dans le lit amont :

- la zone à faible pente (5,8%) située à l'exutoire du lac de la Muzelle, où le torrent reçoit des apports solides, modestes mais réels, de son affluent de rive gauche (combe des Ruines) ;
- le secteur de gorges et de rapides au droit du Clot du Sela (56%) ;
- la zone de régulation et d'échange, à pente plus réduite (9,7%), située au droit de la confluence avec le dynamique ruisseau de Chapeau Roux. La morphologie du fond de vallée témoigne ici de l'occurrence de phénomènes de divagations anciens et brutaux (impact du glacier ?) ;
- la seconde zone d'échange (12 à 14%) située en amont de la confluence avec le ruisseau de la Lauzière, entre les cotes d'altitude 1350 m à 1220 m. La photo suivante montre ce bassin versant très érodé avec une influence évidente des phénomènes avalancheux sur l'alimentation des écoulements en sédiments, et surtout en flottants.



Photo 2 : Bassin versant de la Lauzière dans les schistes.

Le substratum rocheux est omniprésent comme dans la zone de la prise d'eau EDF comme le montre la photo suivante :



Photo 3 : Lit rocheux et prise d'eau EDF.

La cascade située en aval de la cote d'altitude 1100 m enfin, qui permet un raccordement rapide du haut bassin à la vallée du Vénéon. Le lit est rocheux en amont et pavé par des blocs en aval :



Photo 4 : Cascade de la Muzelle.

2.2. Cône de déjection de la Muzelle

Le cône de déjection du torrent de la Muzelle est peu marqué et présente plus un glacis en direction du Vénéon qu'un véritable cône de déjection. Ainsi, le tracé du torrent est atypique avec trois tronçons très différents :

- La partie amont longe le versant.
- La partie aval - après un coude brutal rejoint directement le Vénéon dans un talweg peu marqué.
- La confluence avec le Vénéon est confuse et située juste au niveau d'un seuil.

La figure suivante est issue du traitement du MNT avec une équidistance de 1 et 5 mètres entre les courbes de niveau :

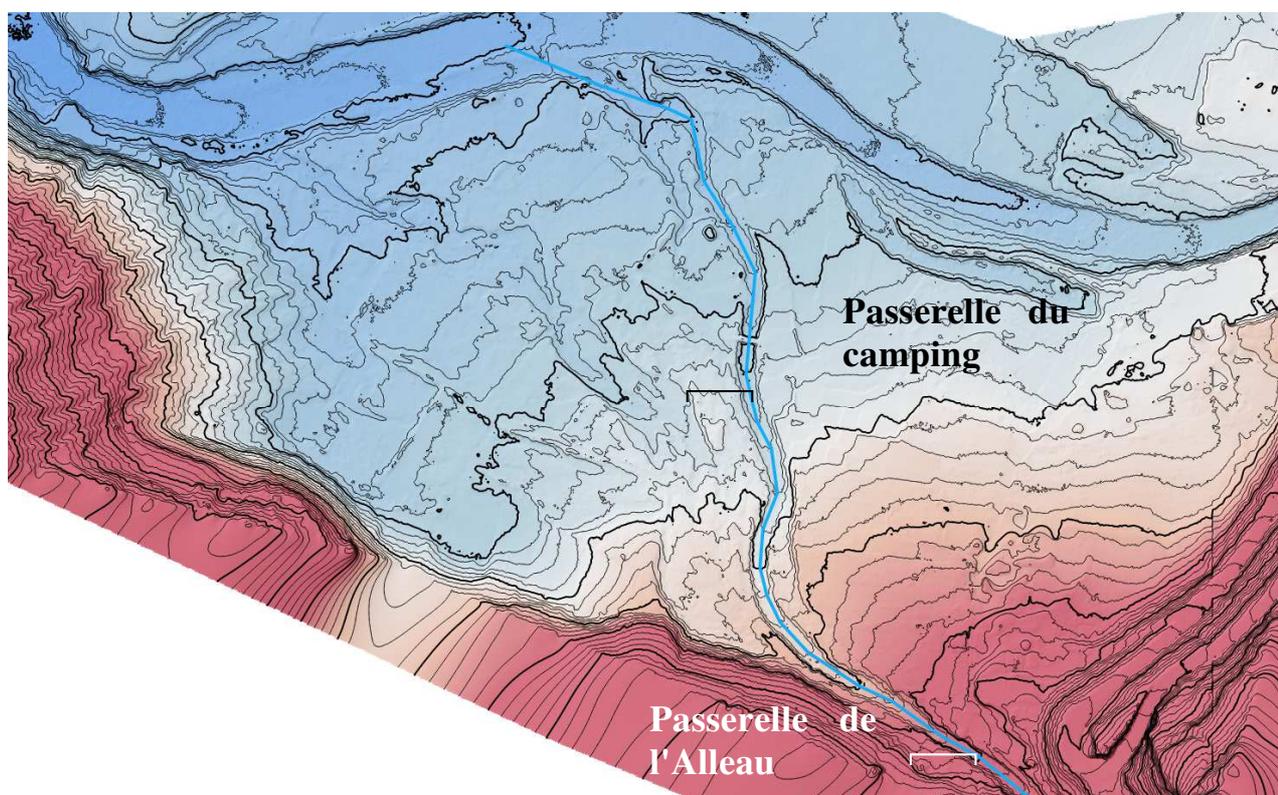


Figure 9 : Vue d'ensemble du cône de déjection avec le tracé du lit actuel.

Deux passerelles franchissent le torrent :

- En amont dans le prolongement du hameau de l'Alleau.
- Dans la partie aval, au droit du camping "La Cascade".

La photo suivante montre l'amont du cône de déjection avec le piège à flottants - en sortie de gorges - qui est fondé sur le rocher encore présent. Il paraît petit pour un volume compris entre 150 et 1 500 m³ de bois comme évoqué dans le rapport de 2008.

D'autre part, il apparaît une protection de berge (prise d'eau) excessivement avancée en rive droite en amont de la passerelle de l'Alleau. Outre les risques de débordement, ce rétrécissement engendre un affouillement qui menace la protection. Une reprise de cet ouvrage devra s'accompagner d'un recul de la berge !



Photo 5 : Amont du cône de déjection (piège à flottant réalisé en 2015 et lit étroit).

La photo suivante montre l'extrémité aval de cette protection invasive et la passerelle amont :



Photo 6 : Passerelle de l'Alleau.

La figure suivante montre le tracé sur le cône de déjection avec le coude marqué puis le lit de moins en moins profond qui longe le camping "La Cascade".

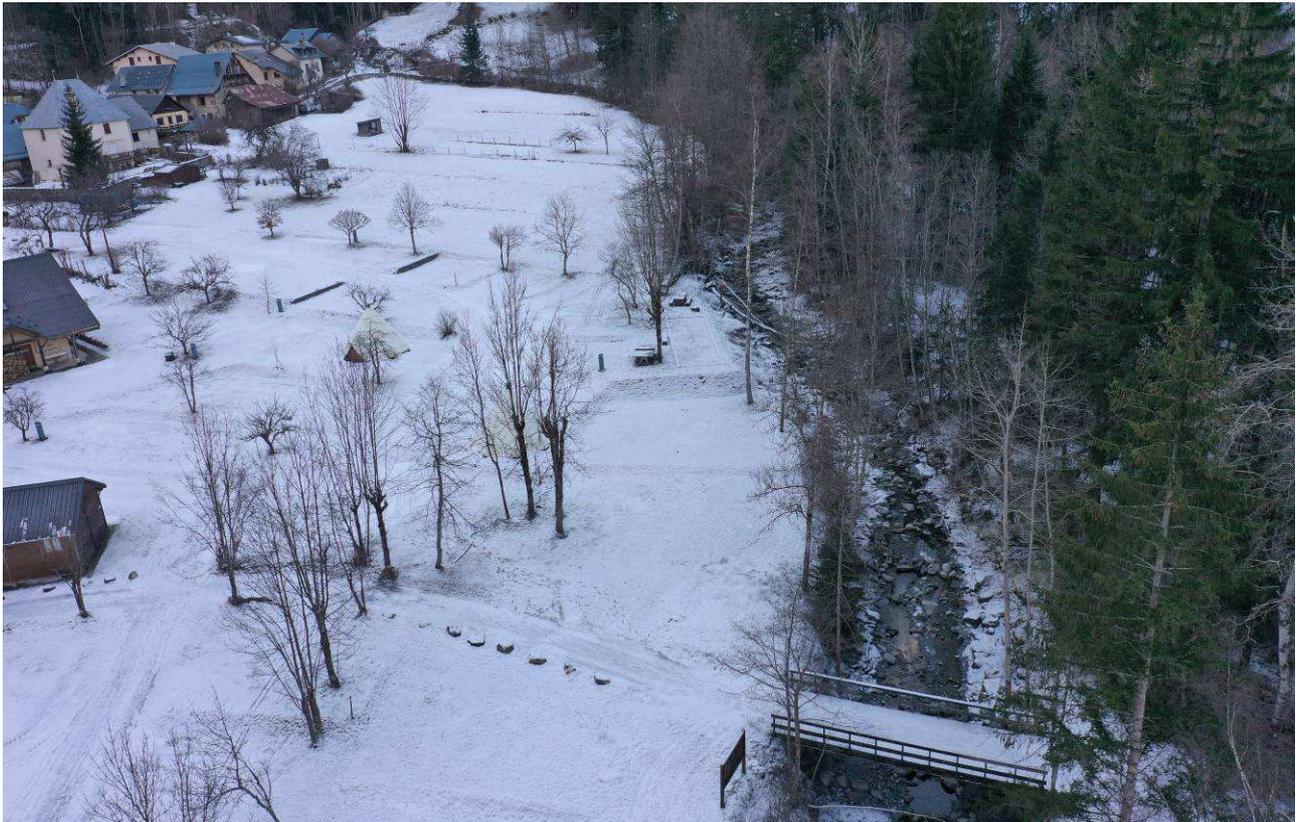


Photo 7 : Lit dans la partie amont du cône de déjection et passerelle du camping.

Dans le coude, le lit est très encaissé par rapport au cône de déjection ancien :



Photo 8 : Lit encaissé et dépôt dans le coude.

Ce coude est en partie artificiel et marque une forte réduction de pente et un changement de morphologie. Des dépôts sont nettement visibles en rive gauche.

On observe aussi des arbres morts facilement mobilisables qui pourraient former des embâcles au niveau de la passerelle en aval... dans la partie centrale du camping.



Photo 9 : Coude avec dépôt en rive gauche et arbres mobilisables.

L'ancien lit situé en rive gauche est encore clairement visible dans les sous-bois et concentrerait d'éventuels débordements :



Photo 10 : Ancien lit en rive gauche.

La désignation vernaculaire des parcelles exposées – *l'ille* – laisse ainsi peu d'équivoque quant au fonctionnement passé du torrent dans ce secteur. Le lit et les terrasses alluviales du torrent apparaissent alors de plus en plus colonisés par la végétation.

En aval de la passerelle du camping "La Cascade" (tirant d'air de l'ordre de 2 mètres), le lit est beaucoup moins marqué. La géométrie du lit est ici dissymétrique - à l'image des enjeux - avec une berge nettement plus haute en rive droite, mais sans réelle protection contre l'érosion :



Photo 11 : Lit en aval de la passerelle.

Cette absence de protection est ici préoccupante dans la mesure où le torrent de la Muzelle présente une forte capacité de transport et que des aménagements sont situés à proximité.

La hauteur de la berge rive droite est alors bien illusoire en cas de forte crue, les dépôts de blocs hétérogènes ne permettant pas d'éviter une érosion en cas de forte crue.

En rive gauche, la berge s'abaisse notablement et on trouve un baraquement en bois très exposé du fait de sa proximité avec le lit et de sa situation pratiquement dans l'axe d'un ancien chenal de divagation.

Il convient de noter que la prise d'eau dans le bassin versant, en captant la quasi-totalité des débits ordinaires conduit naturellement à une sous estimation des débits et des risques hydrauliques liés à ce torrent en cas de crues.

La photo suivante montre la confluence au niveau du seuil :



Photo 12 : Confluence en amont du seuil construit en 1990.

Le lit dans la partie terminale présente une succession de coudes, une section réduite, une pente faible et une confluence située "plus ou moins" en aval du seuil. Cette situation est évidemment très favorable à un débordement et un engravement régressif qui menace toute la partie aval du cône de déjection.

2.3. Pente d'équilibre - profil en long

La pente constitue le paramètre prépondérant du transport solide. Le graphique suivant correspond au profil en long des Grandes Forces hydraulique en aval du lac de la Muzelle :

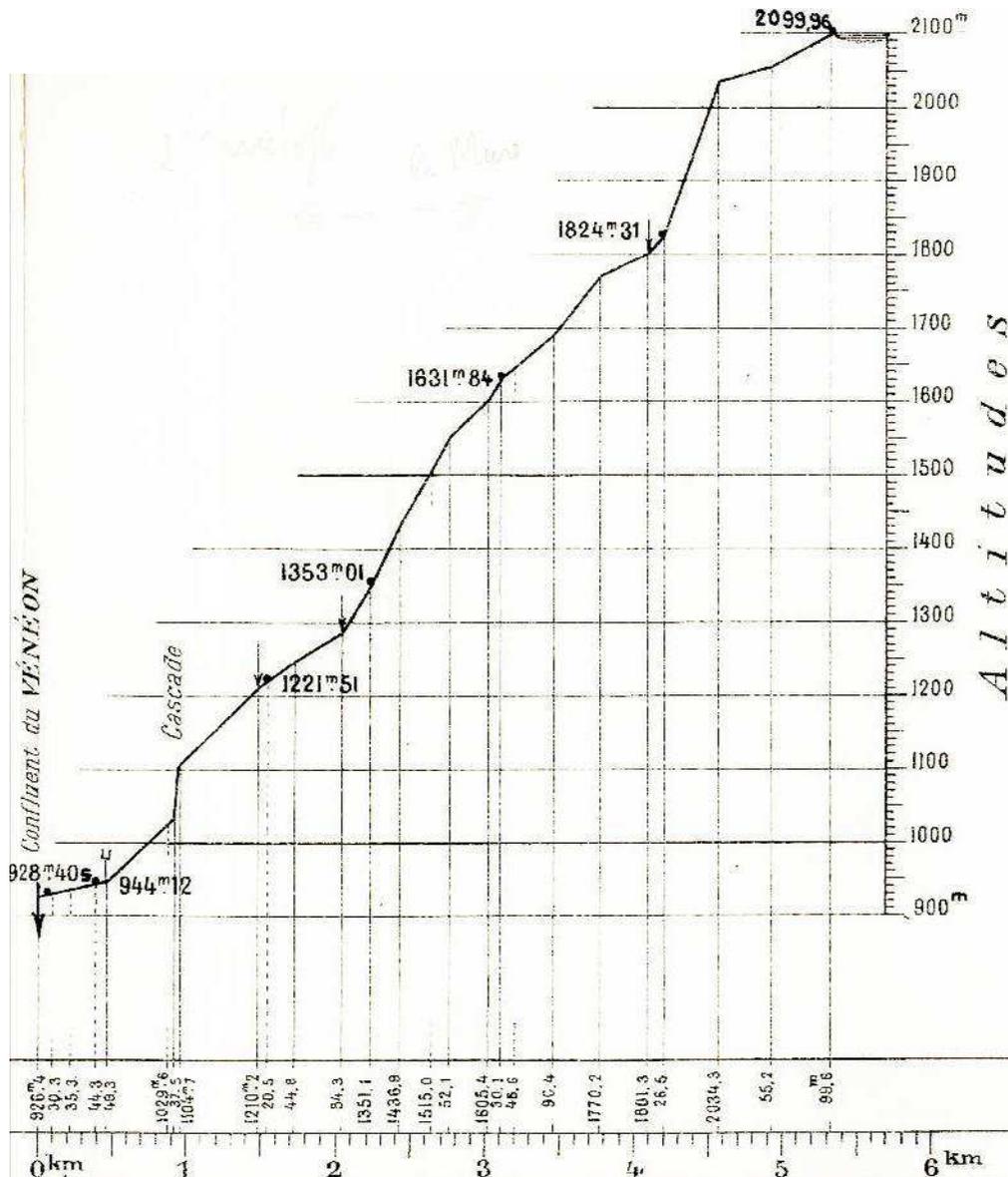


Figure 10 : Profil du torrent de la Muzelle.

Ce graphique montre que les pentes sont très élevées (nettement plus de 100 % dans les gorges) et qu'elles sont encore de 20 % à la transition entre les gorges et le cône de déjection. Ces très fortes pentes correspondent à un lit rocheux qui a la capacité de transporter des volumes de matériaux considérables... qui heureusement ne sont pas apportés au torrent, l'érosion étant plus limitée.

Par contre, une érosion exceptionnelle sera facilement emportée jusqu'au sommet du cône de déjection.

La réduction de pente est ensuite très marquée et la pente n'est plus que de quelques % dans la partie aval.

La figure suivante montre le profil en long sur le "cône de déjection" avec un ajustement sur les pentes locales :

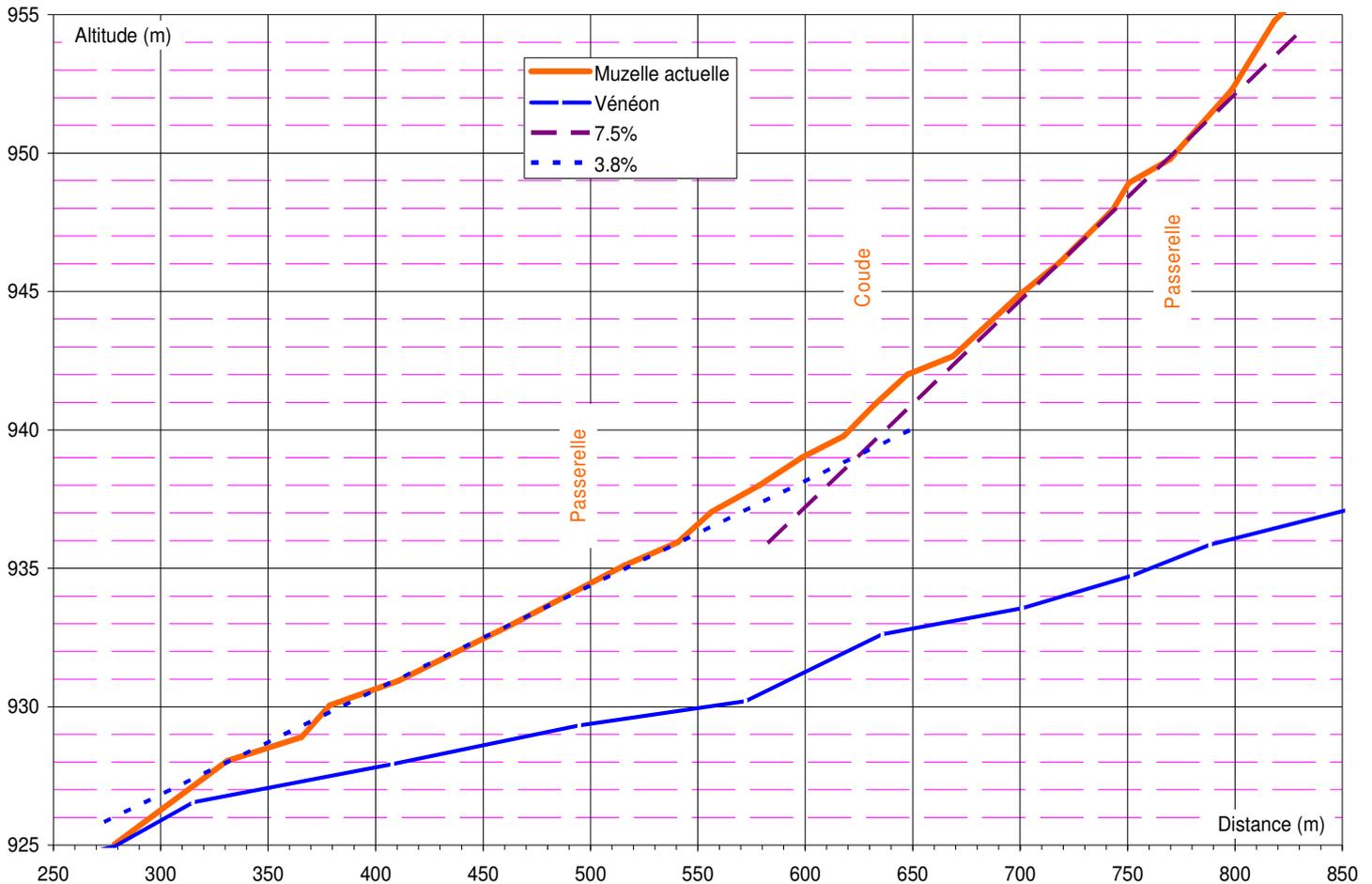


Figure 11 : Profil en long du lit actuel sur le cône de déjection.

Ce profil en long permet de dégager des tronçons homogènes avec des pentes très tranchées :

- Dans la partie amont - et jusqu'au coude - la pente est soutenue (7.5 %) et correspond plutôt à un lit pavé. Il ne s'agit pas vraiment du cône de déjection actif.
- Le coude correspond à un profil en long plus chahuté. Surtout il s'agit d'une rupture de pente majeure.
- En aval, sur le cône de déjection actif, la pente est de l'ordre de 3.8 % seulement soit un transport solide réduit de près de 80 % par rapport à la capacité de transport du lit amont ! Cette pente est ensuite régulière jusqu'au niveau de l'ancien lit du Vénéon.
- La zone de confluence montre un profil en long plus perturbé et prolongé ici dans le lit du Vénéon, en aval du seuil mais le tracé aval est très instable.

2.4. Quantification du transport solide

L'analyse de la morphologie du site, comme l'historique des crues, conduisent à écarter, au moins pour un phénomène centennal, la propagation de laves torrentielles dans la partie basse du torrent de la Muzelle.

Ainsi, seul le phénomène de charriage torrentiel a fait l'objet d'une quantification. En effet, le transport solide en suspension, s'il représente des volumes de matériaux élevés, n'a qu'une influence marginale sur la géométrie des lits et sur les risques liés au débordement.

La quantification du transport solide en charriage est réalisée au moyen de la formule de Lefort de 2015 qui est bien adaptée pour des pentes aussi élevées. Cette formule présente l'avantage de relier directement débit solide et débit liquide, sans faire intervenir le calcul de conditions hydrauliques très mal connues lors des crues dans les cours d'eau à forte pente.

La figure suivante montre la relation entre débit liquide et débit solide pour les deux pentes qui caractérisent le cône de déjection :

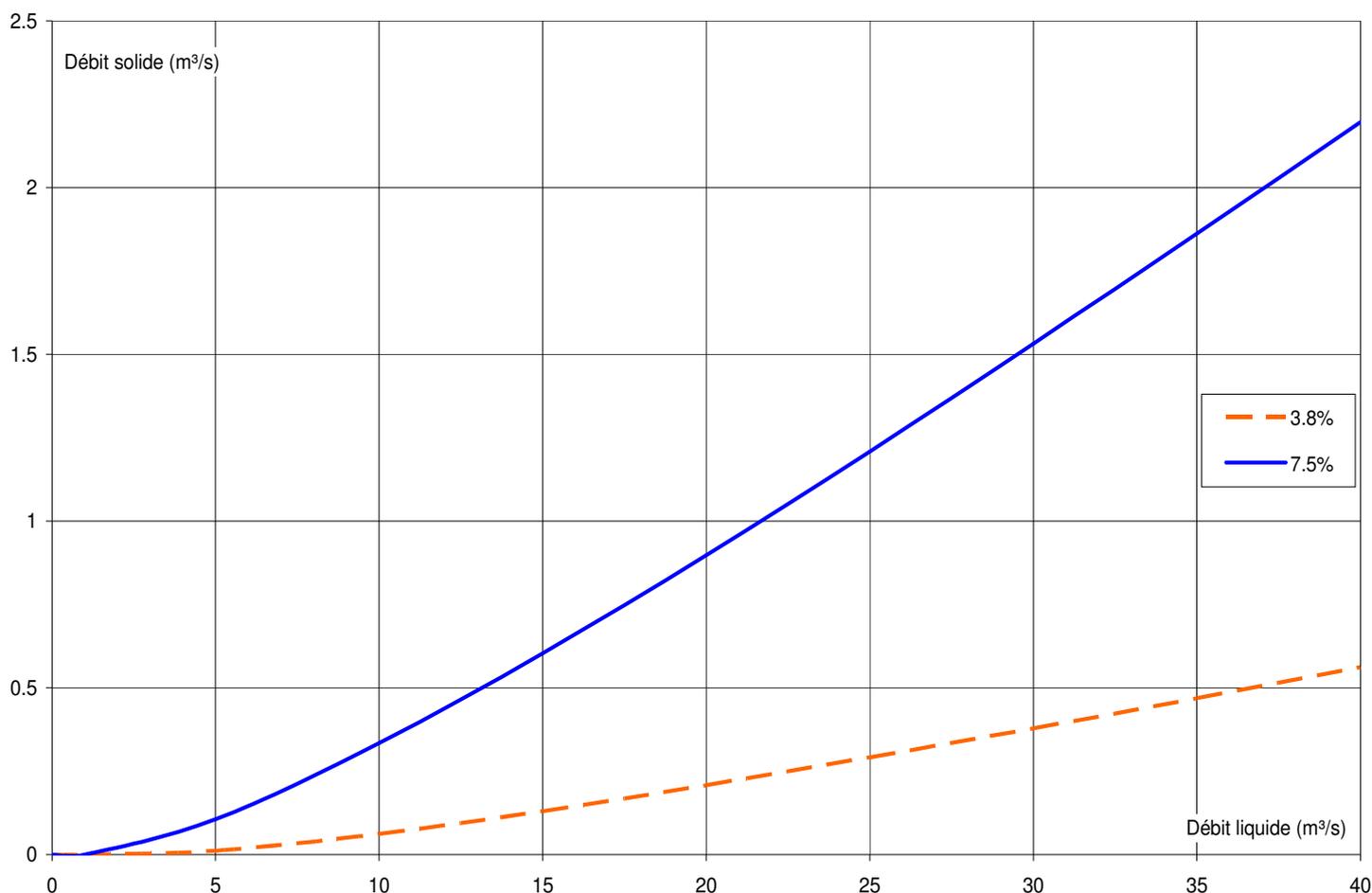


Figure 12 : Relation entre débit liquide et débit solide pour différentes pentes.

Ce graphique met en évidence l'importance de la pente avec un débit solide qui est plus que quadruplé lorsque la pente passe de 3.8 à 7.5 %. Cet écart considérable lié à la pente relativise fortement l'influence des autres paramètres comme la granulométrie.

Ainsi, les calculs sont réalisés avec une granulométrie "classique" et cohérente avec les observations de terrain :

+ Un diamètre moyen de 10 centimètres (D_{50})

+ Une gradation Gr de 10 avec $Gr = \frac{1}{2} \left[\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right]$.

A partir de ces données, il est possible de calculer le volume de matériaux apportés lors d'une crue décennale et d'une crue centennale telles que définies précédemment et une pente d'équilibre de 7.5 % comme en amont du cône de déjection :

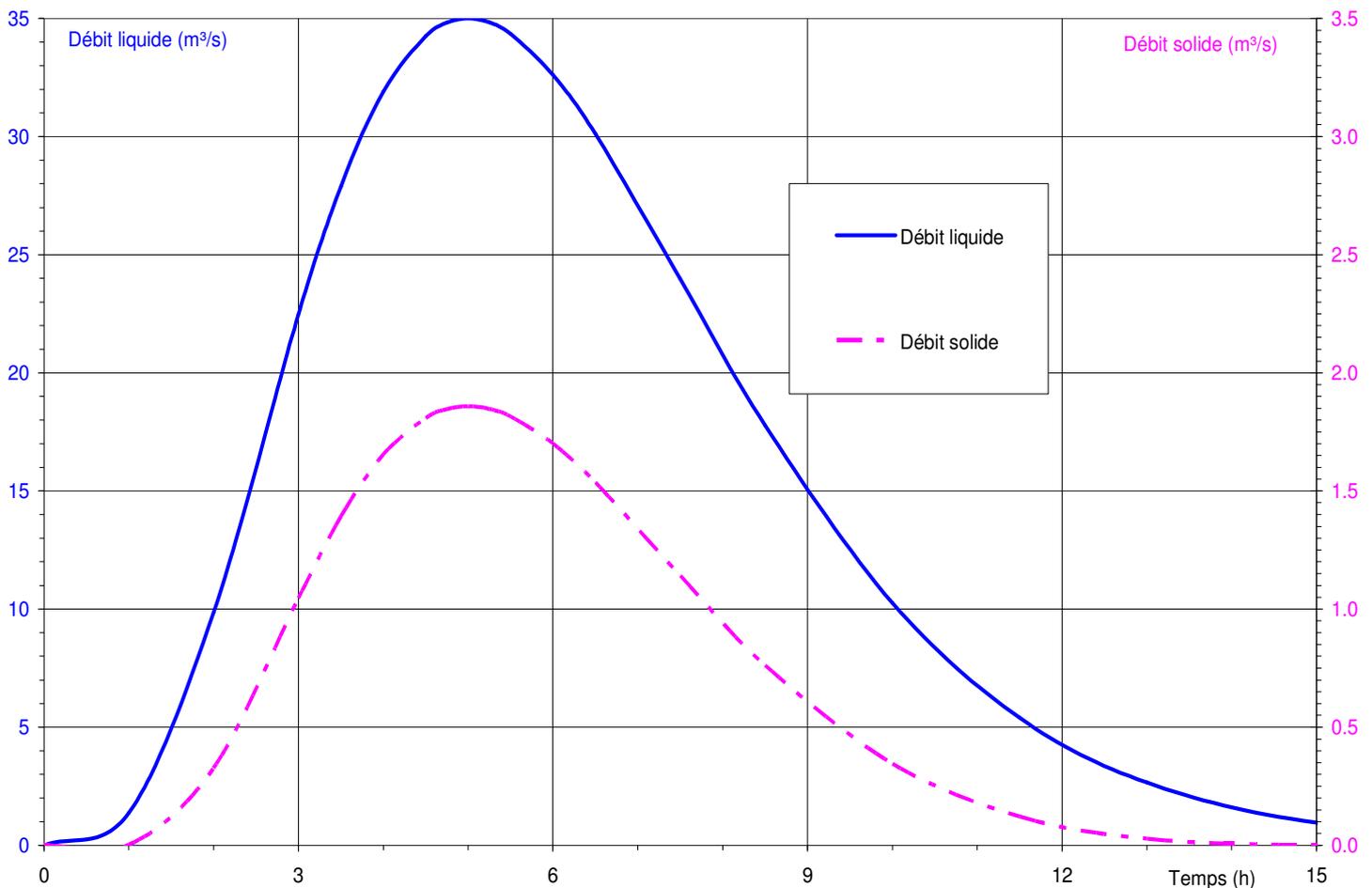


Figure 13 : Hydrogrammes liquide et solides de crue centennale.

Le volume transporté est de l'ordre de

- **36 000 m³ pour une crue centennale !** On retrouve ici les valeurs annoncées dans le rapport de du RTM pour une crue de 5 h mais pour une pente de seulement 6.3 % (contre 7.5 %) retenu ici. En effet, la formule de 2015 conduit à des volumes transportés plutôt inférieur, ce qui est compensé ici - par hasard - par la différence de pente. Ce volume est cependant un majorant des apports amont, le lit étant pavé la plupart du temps.
- **4 700 m³ seulement pour une crue décennale** en appliquant la même méthode. En effet, la crue décennale présente un débit de pointe plus de trois fois plus faible mais aussi un temps de montée de seulement 3 heures (contre 5 pour la crue centennale retenue ici).

Le même calcul peut alors être réalisé pour différentes pentes comme le montre la figure suivante qui montre les débits liquides et solides pour les crues décennale et centennale et avec des pentes comprises entre 2 et 7.5 %.

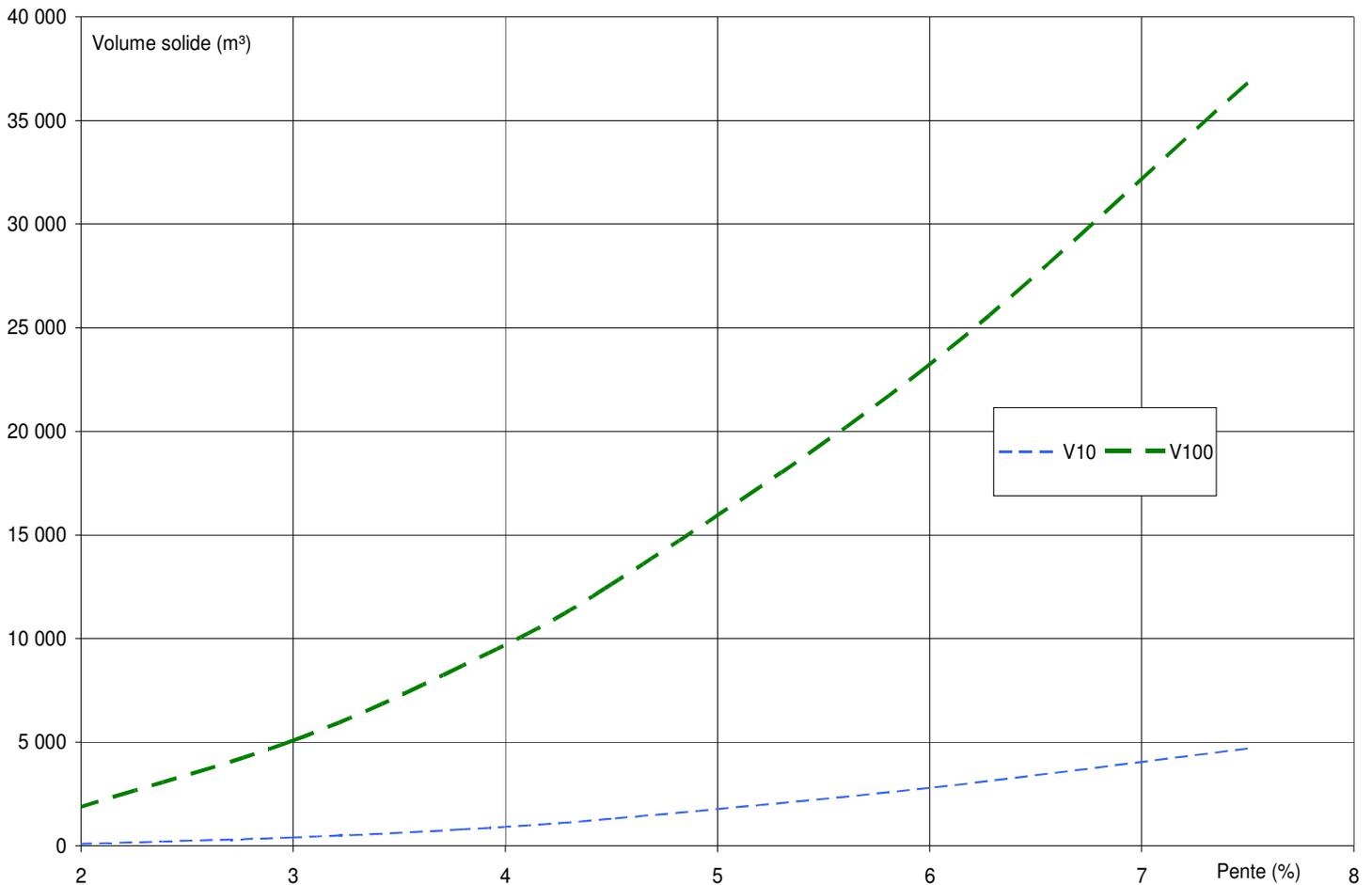


Figure 14 : Volumes solides apportés pour une crue.

Les volumes sont très importants lorsque la pente augmente. Il paraît cependant très improbable d'observer une crue qui soit à la fois très chargée en matériaux (pente d'équilibre supérieure à 7.5 %) et très longue.

Ces calculs montrent que pour un apport amont avec une pente d'équilibre de 7.5 %, plus des $\frac{3}{4}$ des matériaux se déposent sur le cône de déjection pour une crue centennale. Ce ratio passe à 80 % pour une crue décennale sous l'effet d'une influence majorée du seuil de début de mouvement. Cependant, la granulométrie, notamment aval, serait vraisemblablement inférieure, réduisant un peu ce ratio.

Pour une crue centennale - voire pour une crue décennale - ces volumes sont suffisants pour conduire à un comblement du lit mineur et à un débordement sur le cône de déjection au moins en aval du coude.

À la confluence, deux phénomènes interviennent avec des impacts contradictoires sur le transport solide :

- La réduction de pente qui diminue fortement le transport solide et conduit à un dépôt. On verra que la pente du lit est actuellement de seulement 1.4 % en aval du seuil. Elle passe à presque 2 % en cas d'effacement du seuil. C'est cette pente qui est représentative de la reprise par le Vénéon si l'on considère que c'est le niveau de la crête du seuil qui est limitante pour la capacité d'écoulement... sous réserve d'une confluence qui se produit réellement au niveau du seuil. Pour une confluence en amont, les dépôts seraient plus importants et causeraient des débordements dans une zone d'enjeux forts.
- L'augmentation du débit qui augmente fortement le débit solide et la reprise. Évidemment, il n'y a pas de corrélation directe entre le débit du Vénéon et celui du torrent de la Muzelle. Cependant, il paraît très improbable que le torrent subisse une crue centennale longue et que le Vénéon reste à l'étiage.

Ainsi, les calculs précédents ont été repris afin de déterminer le débit liquide du Vénéon nécessaire à une continuité du transport solide. Plusieurs critères sont alors retenus :

- ❖ Débit constant dans le Vénéon durant tout l'épisode permettant le transit de tous les apports par le torrent de la Muzelle à l'échelle globale de la crue. Ce débit constant doit être de 22 m³/s en négligeant les apports solides amont, ce qui est légitime avec un débit aussi faible. Des dépôts vont cependant se produire à la pointe de crue du torrent... et être repris seulement en fin de crue.
- ❖ Crue concomitante du Vénéon permettant d'évacuer en aval le débit solide de pointe. Dans ce cas, le débit de pointe doit être de 57 m³/s sur le Vénéon en négligeant l'apport de ce dernier, ce qui devient moins justifié que précédemment.
- ❖ Crue concomitante du Vénéon en tenant compte de ses apports solides (avec une pente d'équilibre de 1.1 %). Dans ce cas, un débit de **110 m³/s** est nécessaire.

Pour mémoire, le débit décennal du Vénéon en amont de la confluence est de 124 m³/s.

Ainsi, un débit proche du débit décennal est nécessaire pour éviter un dépôt dans le lit en cas de crue centennale du torrent de la Muzelle.

Notons que le lit aval actuel du torrent de la Muzelle présente une forte incertitude sur le tracé qui serait suivi en cas de crue, la confluence effective pouvant être déplacée en amont du seuil.

Le graphique page suivante montre le bilan de volume sur le cône de déjection avec :

- + L'apport amont correspondant à une pente d'équilibre de 7.5 %. Il s'agit d'un majorant des apports réels. La plupart du temps, ces apports sont nettement plus faibles et le lit est pavé par des affleurements rocheux et des blocs. Notons qu'il est possible que l'apport en amont soit encore supérieur étant donnée la très forte pente dans les gorges. Cependant, un tel scénario paraît très improbable.
- + En aval, la pente n'est plus que de 3.8 % et ces matériaux sont apportés au Vénéon (et plus ou moins repris en fonction de l'hydrologie de la rivière et de la localisation de la confluence effective durant la crue).
- + La zone de rupture de pente, permet le dépôt des apports excédentaires. Les volumes sont alors très variables en fonction des apports amont. Le volume affiché ici est donc - heureusement - un majorant - possible - de ces dépôts.

Sans surprise, les écarts sont très importants entre la crue décennale et la crue centennale longue.



Figure 15 : Répartition des volumes potentiels d'apports solides.

2.5. Écoulement en crue

Une simulation numérique a été réalisée par le RTM avec un volume d'apport nettement plus faible (10 à 20 000 m³). Elle confirme sans surprise un dépôt massif à la rupture de pente.

Même avec des apports minorés, les dépôts sont de 2 mètres en aval du coude, conduisant à un débordement généralisé dans la partie aval du cône de déjection. Dans les faits, l'écoulement resterait concentré dans un ou plusieurs bras. Le débordement préférentiel en rive gauche sera observé en début de crue, mais l'ampleur des dépôts permettrait rapidement des débordements en rive droite, particulièrement en aval de la passerelle.

La confluence avec le Vénéon, qui impose des pertes de charge très excessives avec des niveaux élevés à cause du seuil est évidemment très défavorable. Elle conduit à une forte incertitude sur la localisation des apports de matériaux au Vénéon.

Dans la partie amont du cône de déjection, les risques sont très dépendants de la pente d'équilibre des apports solides :

- Pour une pente d'équilibre supérieure à 7.5 %, les dépôts - et les débordements - seraient massifs dès le sommet du cône de déjection. Cela correspond à un apport solide supérieur à 36 000 m³, ce qui est possible mais trop improbable pour être retenu dans le cadre d'un phénomène centennal. Un tel dépôt serait cependant progressif et une évacuation rapide du camping "La Cascade" paraît envisageable.
- Pour une pente d'équilibre comprise entre 7.5 et 3.8 %, les dépôts en amont du coude seraient liés au dépôt dans le coude. Ils ne remontent que partiellement vers la passerelle amont. Le débordement - à l'image du dépôt - remonterait progressivement durant la crue. Ce scénario est le plus probable. La vue en plan page suivante correspond à ce scénario avec une pente d'équilibre un peu supérieure à 3.8 %.
- Pour une pente d'équilibre de 3.8 % - voir un peu moins - le dépôt sur le cône de déjection serait marginal. Dans les faits, la configuration très défavorable de la confluence avec le Vénéon conduirait à un dépôt régressif dans la partie aval qui remonterait facilement jusqu'au droit de la passerelle de l'Alleau.

Outre ce débordement généralisé lié aux engravements, deux points singuliers doivent être précisés :

- La protection de berge en amont de la passerelle amont sera très sollicitée par affouillement.
- La passerelle de l'Alleau pourrait être partiellement obstruée par des flottants, le piège en amont ayant vraisemblablement une capacité insuffisante pour une crue centennale. Un débordement pourrait alors menacer l'ensemble du cône de déjection, même sans dépôt dans lit.

La figure suivante montre la zone inondable la plus probable qui pourrait être balayée par le torrent en cas d'apports solides ordinaires :

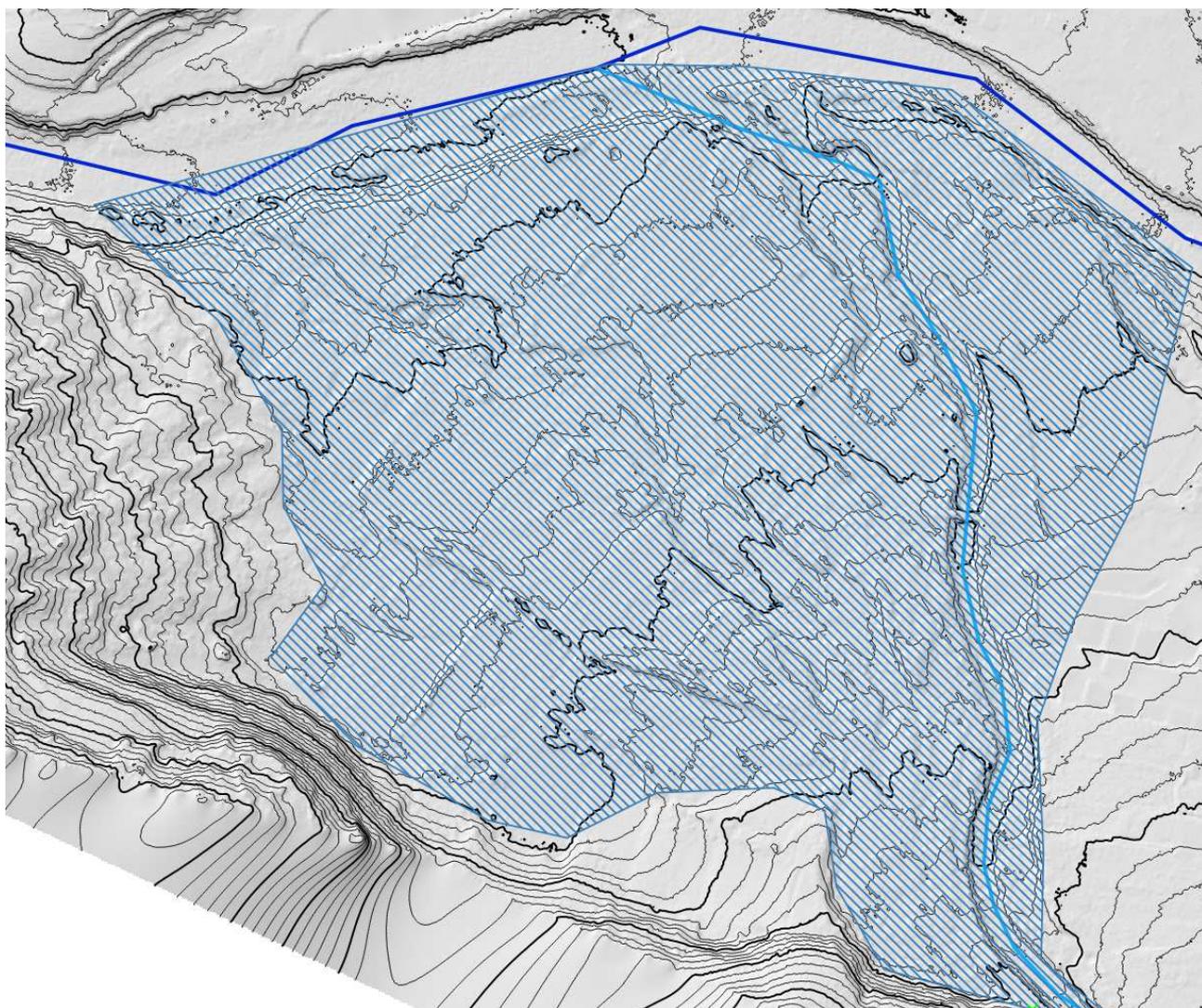


Figure 16 : Zone inondable d'une crue centennale ordinaire.

3. VÉNEON

3.1. Description de la zone d'étude

Dans la partie amont de la zone d'étude, le Vénéon s'écoule selon une pente assez soutenue (6%). Son lit présente actuellement une morphologie de lit pavé, caractérisée par une succession rapide de mouilles et de seuils constitués de blocs particulièrement grossiers.

L'origine de ces blocs s'explique essentiellement par les écroulements qui affectent régulièrement les versants, notamment en rive droite. La photo suivante montre cette zone raide et pavée... mais susceptible de recevoir des apports importants en cas d'éboulement :

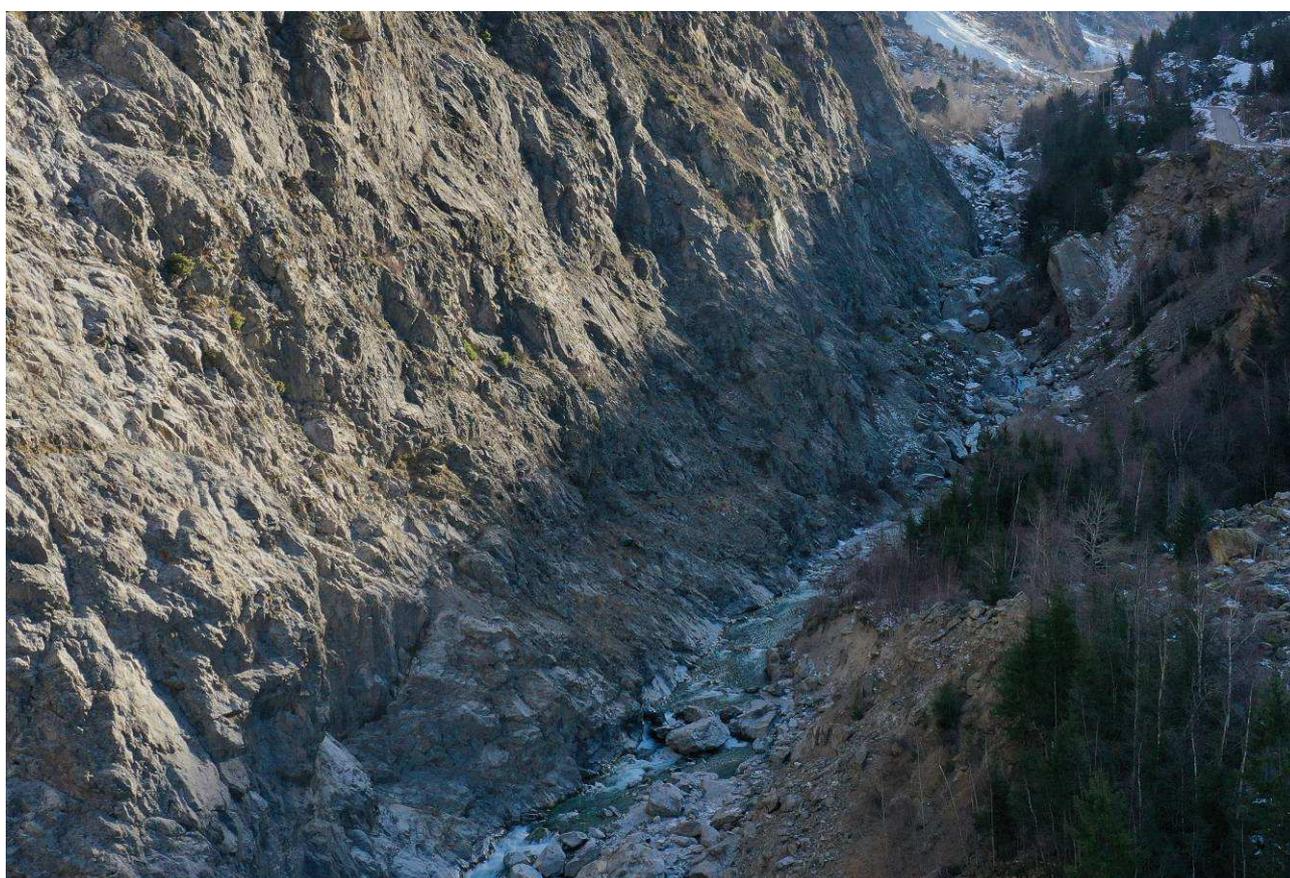


Photo 13 : Lit du Vénéon en amont de Bourg d'Arud.

On note à l'arrière plan le barrage formé par l'éboulement qui est à l'origine de la zone alluvionnaire de Plan du Lac.

L'histoire récente rapporte que ces phénomènes ont parfois été suffisamment volumineux pour barrer à nouveau le lit du Vénéon et former, en amont immédiat, une retenue d'eau alimentée par les écoulements de la rivière.

En raison de la pente élevée de la vallée dans ce secteur, l'érosion et le transport de ces matériaux plus en aval ne posent pas véritablement de problème au Vénéon. Selon l'hydraulicité de la rivière, la reprise peut intervenir plus ou moins brutalement et rapidement. Au droit des hameaux de Bourg

d'Arud et de l'Alleau, cette situation peut alors favoriser l'engravement puis la divagation du lit, particulièrement au niveau des portions où la pente est la plus réduite.

L'examen des photographies aériennes datant de 1952, qui montrent une bande active particulièrement étendue, est à ce titre emblématique. Compte tenu de l'occupation actuelle du lit majeur, le retour à une évolution similaire serait très préoccupant.

A environ 150 m en amont du pont de la RD530, la pente s'abaisse brutalement à 2,3% environ et en allant plus en aval, elle s'établit en moyenne autour de 1,9%. La photo suivante montre cette transition brutale entre le lit pavé par des très gros blocs (zone de l'éboulement de 1946) et le lit à moindre pente en aval.



Photo 14 : Changement de morphologie à l'amont de Bourg d'Arud.

En rive droite, la protection du hameau de Bourg d'Arud contre les risques d'érosion de berge induits par la rivière torrentielle est alors assurée par une digue constituée de pierres maçonnées.

Un dispositif similaire est visible en rive gauche mais sur une longueur plus faible.

La réalisation de ces protections de berge semble s'être opérée en deux temps :

- Édification d'un premier dispositif à fruit très raide, probablement suite à la crue de 1928, de part et d'autre du pont de la RD530, et en particulier jusqu'au droit des habitations les plus en amont.
- Extension vers l'amont du dispositif - en rive droite seulement - jusqu'à la base d'un éboulis. Bénéficiant à la fois d'un fruit plus modéré et de la présence d'épis en pied constitués de blocs rectangulaires en béton, ce dispositif est destiné à prévenir les risques de contournement de l'ouvrage aval apparemment mis en lumière par la crue de 1955.

Depuis plusieurs décennies, la tendance du lit semble être à l'enfoncement dans ce secteur.

Les 3 seuils de stabilisation sommaire réalisés en 1990 de part et d'autre du pont de la RD530 sont presque intégralement ruinés... et bien difficiles à distinguer d'une alternance naturelle de seuils et de mouilles (bien visible sur la photo suivante).

Afin de limiter les risques d'affouillements, des volumes très importants d'enrochements ont été déposés devant les ouvrages en maçonnerie. Cependant, ils réduisent exagérément la largeur du lit et favorisent un nouvel enfoncement. Cette protection est partiellement dégradée à son extrémité amont en rive droite (cercle sur la photo précédente).

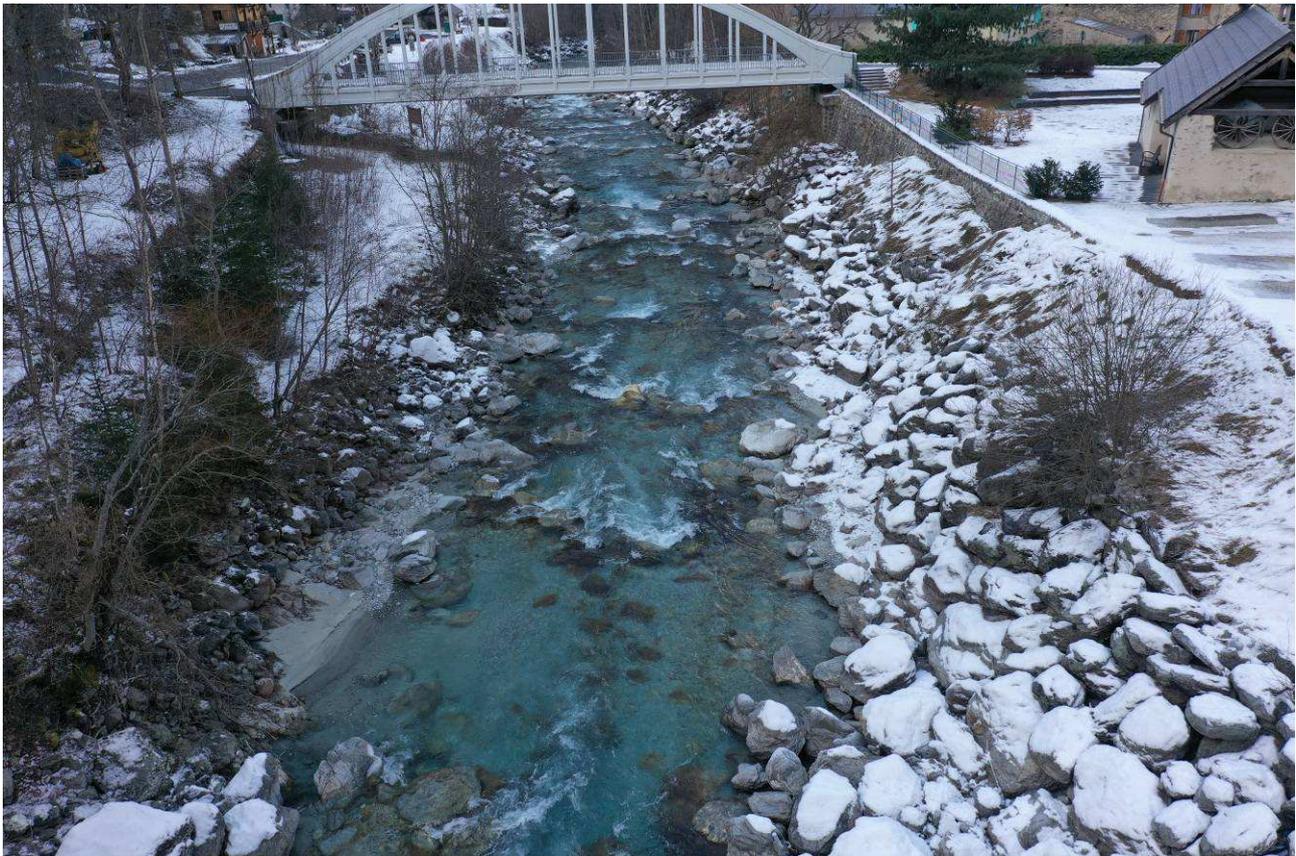


Photo 15 : Protections de berge en amont du pont.

Au contraire du pont originel situé un peu plus en aval, et dont le minage est intervenu quelques années après la crue de 1928, le pont actuel ne présente aucun appui intermédiaire dans le lit mineur du torrent. En outre, son tirant d'air élevé limite, a priori, les risques d'accrochage par des flottants en période de crue.

En rive gauche, une terrasse probablement peu submersible, constituée d'alluvions ou de matériaux de remblai, diminue d'un tiers la largeur du chenal réalisé après la crue de 1928. Un recul de cette berge, associé à une remise en place des enrochements permettrait un élargissement très significatif du lit... et une réduction des contraintes hydrauliques et de la tendance au creusement.

Cette terrasse se prolonge en aval du pont - jusqu'au lavoir - où elle a permis le développement d'un vaste parking au détriment du lit du Vénéon.

En rive gauche, en aval du pont, un mur digue a été réalisé après la crue de 1928 entre le pont de la RD530 et le lavoir pour protéger le hameau de l'Alleau. Lors de cet événement, les habitations situées à proximité du lit semblent en effet avoir été sérieusement menacées par la divagation latérale du Vénéon.

En 1955, cet ouvrage de chenalisation s'est apparemment révélé efficace pour contenir la crue. Depuis, d'importants travaux de remblaiement ont conduit à limiter la largeur du lit et la capacité d'écoulement. En aval immédiat, la berge a subi un important recul lors de la crue de 1928. Depuis, des travaux de remblaiement et d'enrochement sommaires ont permis de regagner les terrains « perdus » et de poursuivre, modestement, l'urbanisation du secteur. La principale conséquence de ces travaux a aussi été de restreindre encore plus la largeur du lit et surtout sa capacité d'écoulement dans un secteur critique.

La photo suivante montre ce tronçon étroit et sans réelles protections de berge (les perrés maçonnés sont vraisemblablement encore présents - mais très en retrait - sous le parking... mais risquent d'être sévèrement affouillées depuis l'encaissement du lit dans cette zone.

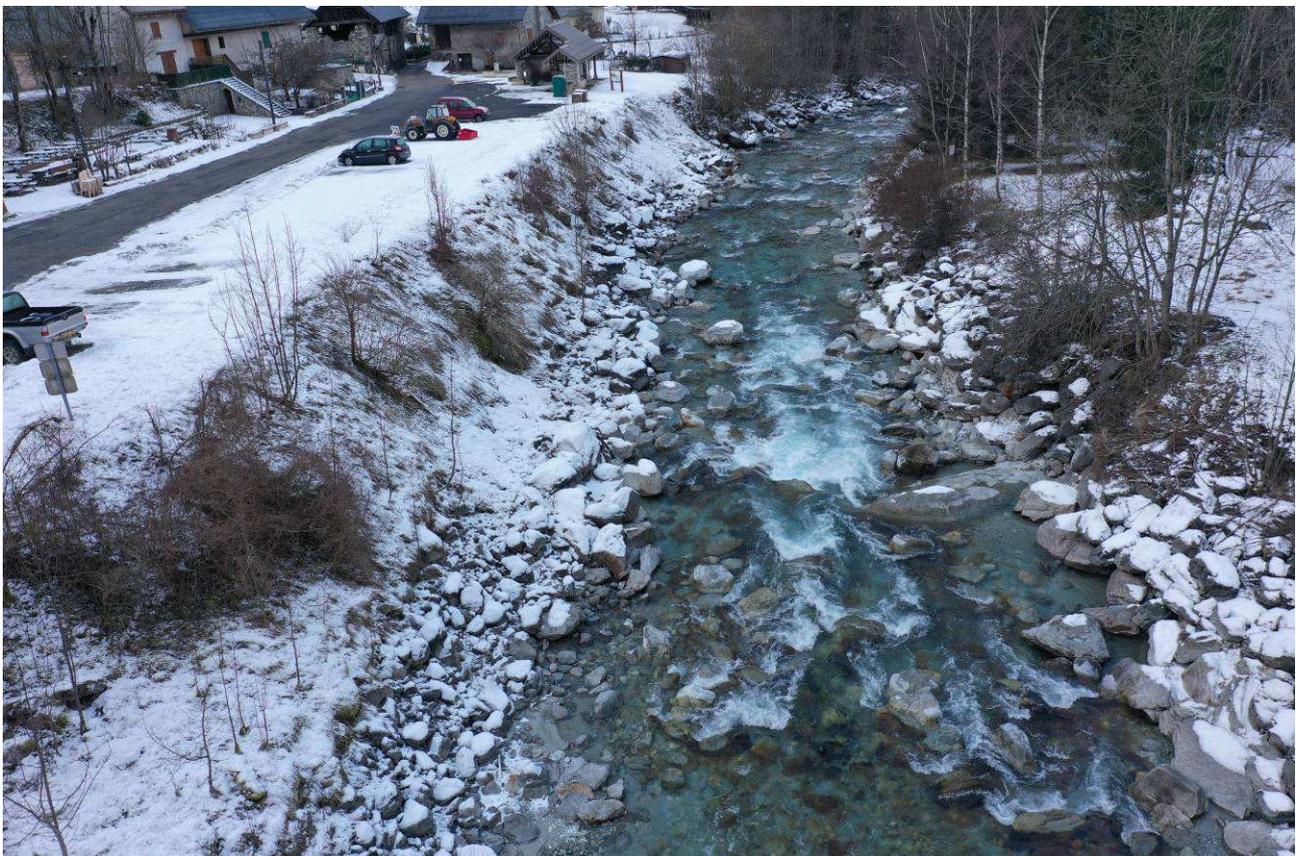


Photo 16 : Lit étroit en aval du pont.

En aval de cette zone, une partie du lit a été isolée du lit mineur par un merlon. Cet ancien lit, vulnérable et très marqué a été utilisé pour le tracé d'une conduite d'eaux usées. Cette forte restriction de la largeur augmente les risques de débordement mais aussi d'enfoncement du lit lors des crues.

La photo suivante montre cet ancien lit, un regard et le merlon depuis l'aval :



Photo 17 : Fraction de l'ancien lit confisqué au Vénéon.

La vue suivant montre cette configuration avec à titre indicatif le tracé encore visible en 1952 :

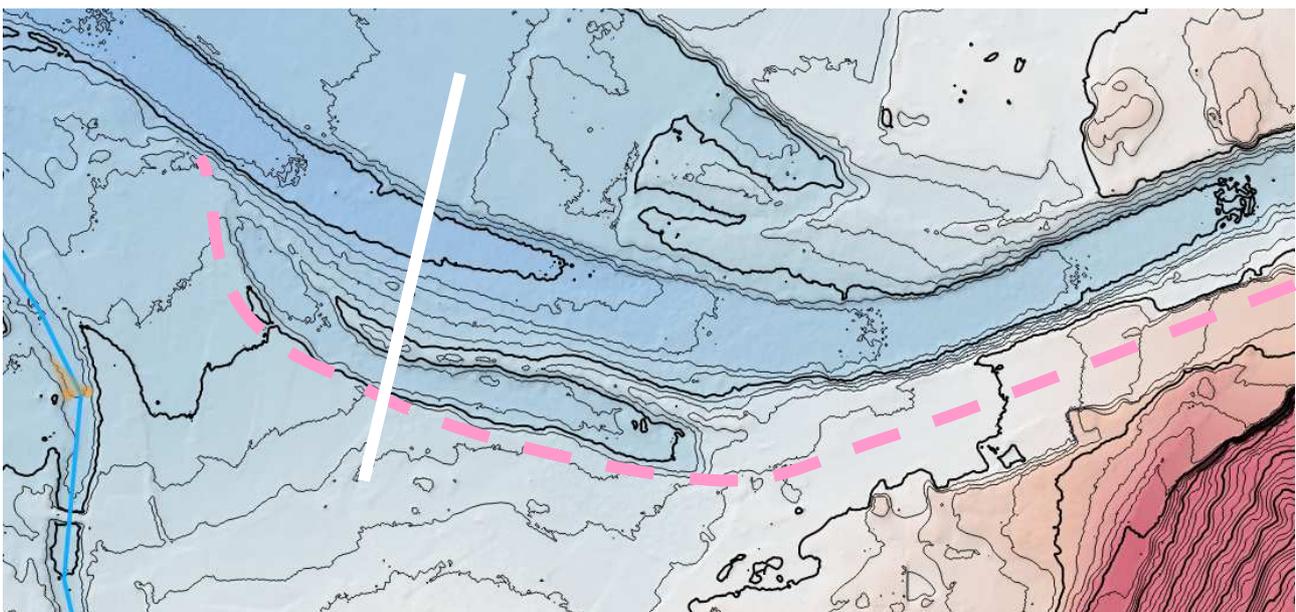


Figure 17 : Vue de la rive gauche du Vénéon entre le pont et le torrent de la Muzelle.

La figure suivante montre le profil en travers indiqué sur la vue en plan précédente :

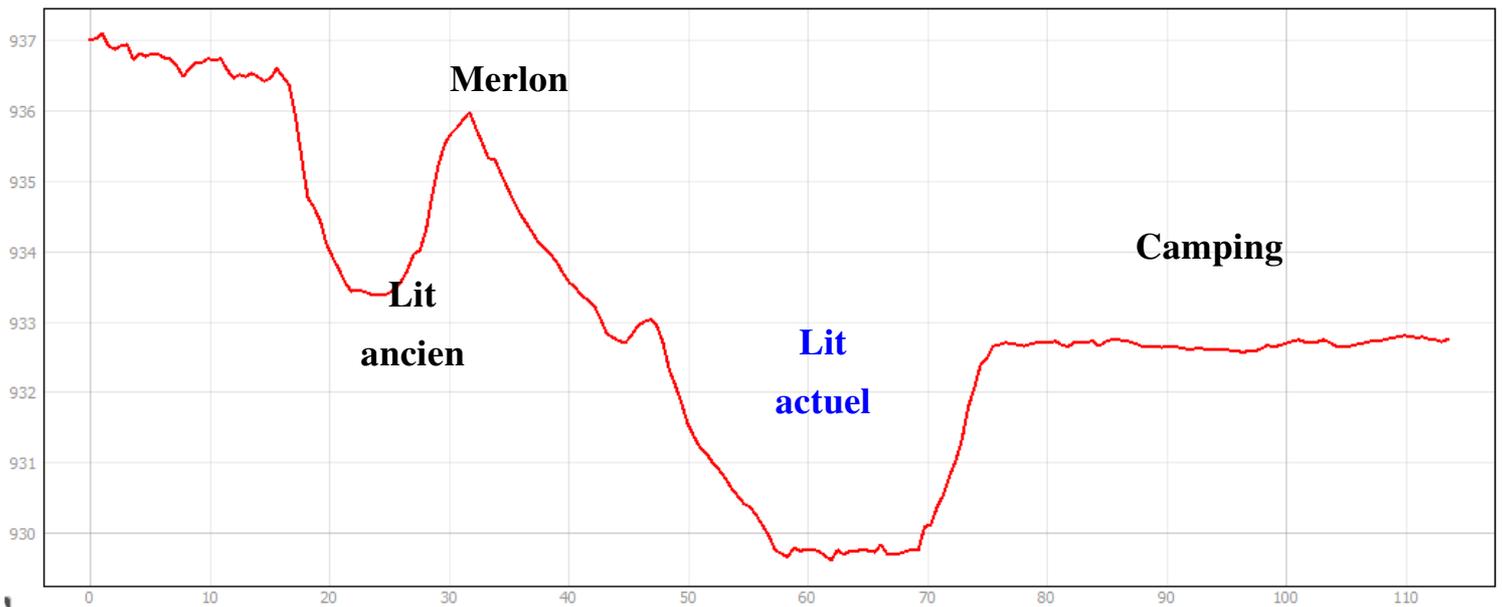


Figure 18 : Coupe type à l'amont du camping "le Champ du Moulin".

Ce graphique montre :

- Le lit des années 1950 à un niveau très proche de la terrasse du camping "le Champ du Moulin" : ce dernier a été installé dans le lit, particulièrement élevé à la suite de l'éboulement de 1946.
- Le lit actuel encaissé de plus de 2 mètres. Cet enfoncement est cohérent avec celui observé entre 1911 et 2007 car le lit en 1950 qui correspond aux terrasses est vraisemblablement nettement plus haut qu'en 1911.

Ainsi, l'éboulement de 1946 a causé un remplissage de la zone avec un lit qui a été temporairement près de 3 mètres au dessus du lit actuel. Cela explique les curages réalisés dans cette zone lors des crues suivantes. Notons que pour un volume de dépôt donné, son épaisseur est inversement proportionnelle à la largeur disponible.

Le lit étroit actuel est donc très vulnérable à un apport solide amont.

Nul besoin d'étudier les emprises des glaciers il y a 20 000 ans pour expliquer l'enfoncement très important du lit dans cette zone depuis les années 1950, plusieurs causes se combinant :

- + Le niveau de 1950 était particulièrement haut suite à l'éboulement de 1946. Une reprise et un enfoncement correspondent au fonctionnement naturel de la rivière.
- + Lors des travaux d'aménagement, les blocs du lit ont "tout naturellement" été prélevés pour constituer les protections de berge (y compris des amas sommaires le long de la berge). Une telle intervention, très fréquente, est dramatique dans un lit pavé car elle détruit la carapace de surface et conduit à la déstabilisation du lit. **Sauf exception dument justifiée, aucun prélèvement de blocs n'est acceptable dans un lit pavé.** Aujourd'hui, le lit présente une faible densité de blocs, ce qui présage de nouveaux enfoncements et de la déstabilisation de blocs et des protections existantes lors des prochaines crues.

+ Le rétrécissement du lit est très important. Comme le montre la figure page suivante, le rapport Largeur du lit /hauteur d'écoulement est un paramètre essentiel des écoulements :

- Pour les valeurs inférieures à 20, le lit est contraint, les vitesses sont élevées, les contraintes hydrauliques sont excessives et la rivière cherche à s'enfoncer dans les alluvions, déstabilisant les ouvrages. Pour une crue centennale et un lit de 20 mètres de largeur comme actuellement, ce rapport est de seulement 8 !
- Pour un L/h compris entre 20 et 60, les contraintes hydrauliques et les vitesses sont modérées. Le lit est globalement équilibré.
- Lorsque L/h dépasse 50 - ou 60 - les divagations deviennent prépondérantes, les conditions d'écoulement n'évoluent plus. Il n'y a plus de réduction des hauteurs ou des vitesses contrairement aux résultats des modèles d'écoulement. Un élargissement n'a plus d'intérêt par rapport aux écoulements. Par contre, l'intérêt par rapport à la régulation du transport solide ou à la diversité des milieux reste entier.

Le graphique suivant montre les conditions d'écoulement (rapport L/h) du Vénéon en amont de la confluence en fonction de la largeur. Il indique que des conditions d'écoulement satisfaisantes nécessiteraient un lit d'une quarantaine de mètres de largeur.

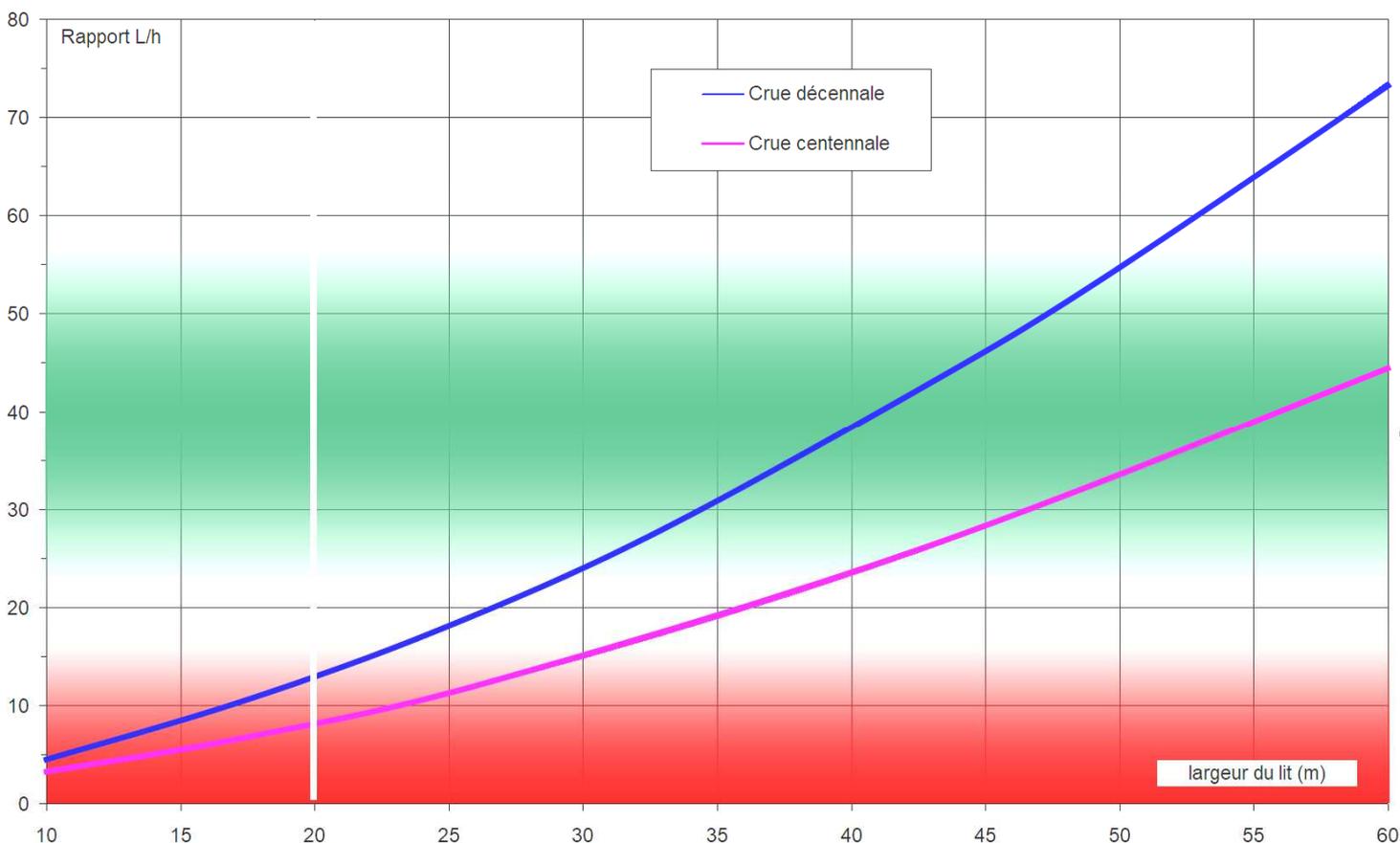


Figure 19 : Conditions d'écoulement dans le Vénéon.

En aval du pont, la rive droite bénéficie également de la protection d'un ouvrage situé dans la continuité du dispositif existant en amont. De faible longueur, son extension est limitée aux secteurs d'habitat ancien du hameau de Bourg d'Arud. Un peu plus en aval, la protection se limite à des blocs grossiers - peut être prélevés directement dans le lit (diamètre compris entre 50 cm et 1,5 m) - déposés sommairement en pied de berge sur une hauteur de 2,0 m environ.

La photo suivante montre cette zone sans réelle protection et avec une berge peu élevée :



Photo 18 : Point faible en rive droite en amont du camping "le Champ du Moulin".

Au niveau du camping, plusieurs configurations se succèdent. Dans la partie amont, la berge est protégée à l'aide d'enrochements libres qui ne dépassent pas en crête le niveau du terrain naturel.

En allant vers l'aval, la protection est en situation de remblai et constitue un ouvrage véritablement assimilable à une digue. Le fruit des berges s'avère alors un peu plus raide que dans le tronçon précédent, ce qui ne favorise pas la stabilité du parement.

La photo ci-dessous montre cette berge très haute dans un lit très étroit - au droit de l'ancien lit évoqué précédemment :



Photo 19 : Lit au droit du camping "le Champ du Moulin".

Cette protection en enrochements a été confortée en 2015 au droit du camping.

Dans cette zone, le lit est mal pavé, avec des blocs isolés et trop rares pour apporter une protection suffisante en cas de forte crue.

Dans la partie aval de la zone d'étude, un seuil en enrochements libres a été mis en place en 1990 pour assurer le calage du profil en long du Vénéon.

Il est implanté au droit de la confluence avec le torrent de la Muzelle. Cet ouvrage a sérieusement été ébranlé par les crues du Vénéon, notamment dans sa partie centrale où l'incision dépasse largement 1 mètre. Il aurait été réparé depuis. Il fait également office de prise d'eau pour un bassin situé un peu plus en aval, sur la rive droite.



Photo 20 : Seuil vu de l'amont puis de l'aval.

Ce seuil reste très fragile notamment à cause de l'absence de sabot visible au pied de l'ouvrage. En aval, le lit est sensiblement plus large (une trentaine de mètres), même s'il reste beaucoup plus étroit que celui observé en 1952.

Ce plan d'eau est implanté dans l'ancien lit du Vénéon. Du fait de sa proximité avec le lit ordinaire du Vénéon, des enrochements ont sommairement été déposés sur les berges pour limiter les risques d'érosion de ce bassin. Sur la rive opposée, un dispositif similaire équipe la berge, principalement pour protéger les installations d'un parc de loisir (Acroparc).



Photo 21 : Bassin en aval du seuil et confluence avec l'ancien lit du torrent de la Muzelle.

Plus en aval, on trouve enfin une passerelle qui franchit le Vénéon en amont du centre équestre. En 1990, un seuil de stabilisation a aussi été édifié au droit de cet ouvrage pour prévenir l'incision observée au niveau du lit. Ce seuil n'est guère visible aujourd'hui même si l'enfoncement du lit semble avoir peu progressé ici.

En aval, le lit est particulièrement régulier - et étroit - avec notamment une piste routière qui le longe en rive droite. La pente y est soutenue, ce qui réduit les risques de dépôt.



Photo 22 : Passerelle aval.



Photo 23 : Lit régulier du Vénéon en aval de l'élargissement de Vénosc.

3.2. Pente d'équilibre - Profil en long

La pente constitue le paramètre prépondérant du transport solide. Le graphique suivant correspond au profil en long des Grandes Forces hydraulique en aval de Plan du lac :

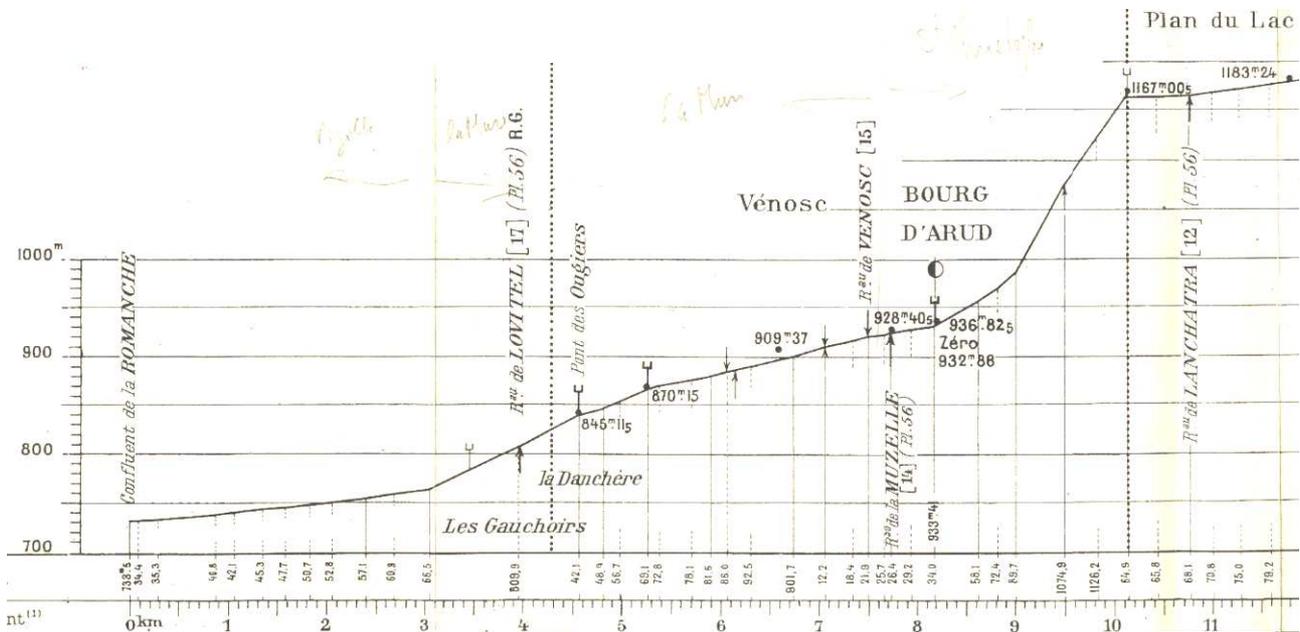


Photo 24 : Profil en long général du Vénéon.

Ce profil en long met en évidence les différents tronçons suivants

- + L'ancienne zone lacustre de Plan du Lac résulte d'un barrage naturel formé anciennement par une instabilité de versant majeure ayant affectée la rive gauche, le Gros Clappier. Elle a conduit à l'interruption temporaire du transit sédimentaire du Vénéon, jusqu'à obtenir une pente d'équilibre satisfaisant à l'hydrologie du torrent et à ses apports en matériaux.
- + Cette zone de divagation constitue la principale zone de régulation des transports solides du Vénéon située véritablement à l'intérieur de son bassin versant. La pente qui conditionne les apports sédimentaires transitant à l'exutoire de ce secteur a ainsi été évaluée à 1,1% (BURGEAP – ETRM, 2006).
- + Pour mémoire, l'examen du profil en long du Vénéon au droit de la zone d'étude montre une valeur de pente d'un ordre de grandeur similaire au niveau des portions semblant actuellement en équilibre. Ce constat confirme le rôle de régulation joué par le secteur du Plan du Lac dans le fonctionnement ordinaire du Vénéon.
- + Entre le Plan du Lac et la zone d'étude, le Vénéon voit sa pente augmenter brutalement pour rattraper les 200 mètres de dénivellée induits par l'écroulement. Dans ce tronçon, le Vénéon traverse une zone de rapides à forte pente à l'intérieur de laquelle d'imposantes masses rocheuses issues du versant de rive droite s'écroulent régulièrement. La pente passe rapidement de 8 à 16 %... faisant de la zone de Bourg d'Arud un secteur de dépôt préférentiel en cas d'apport exceptionnel.
- + En aval de la zone de Vénosc (étudiée en détail dans le paragraphe suivant), la pente redevient soutenue, même si le transport solide n'augmente pas grâce au pavage. Les pentes, d'abord de 2

à 3 % dépassent 4 puis 5 % de part et d'autre du Pont des Ougiers, avec toujours un fonctionnement de transit des matériaux sur un lit pavé.

- + Le cours terminal correspond au dépôt lié à la Plaine de Bourg d'Oisans, avec une pente de l'ordre de 1.4 %, proche de celle observé au niveau du Plan du Lac.... Et dans la zone de Bourg d'Arud.

Le graphique suivant montre le profil en long actuel dans la zone d'étude :

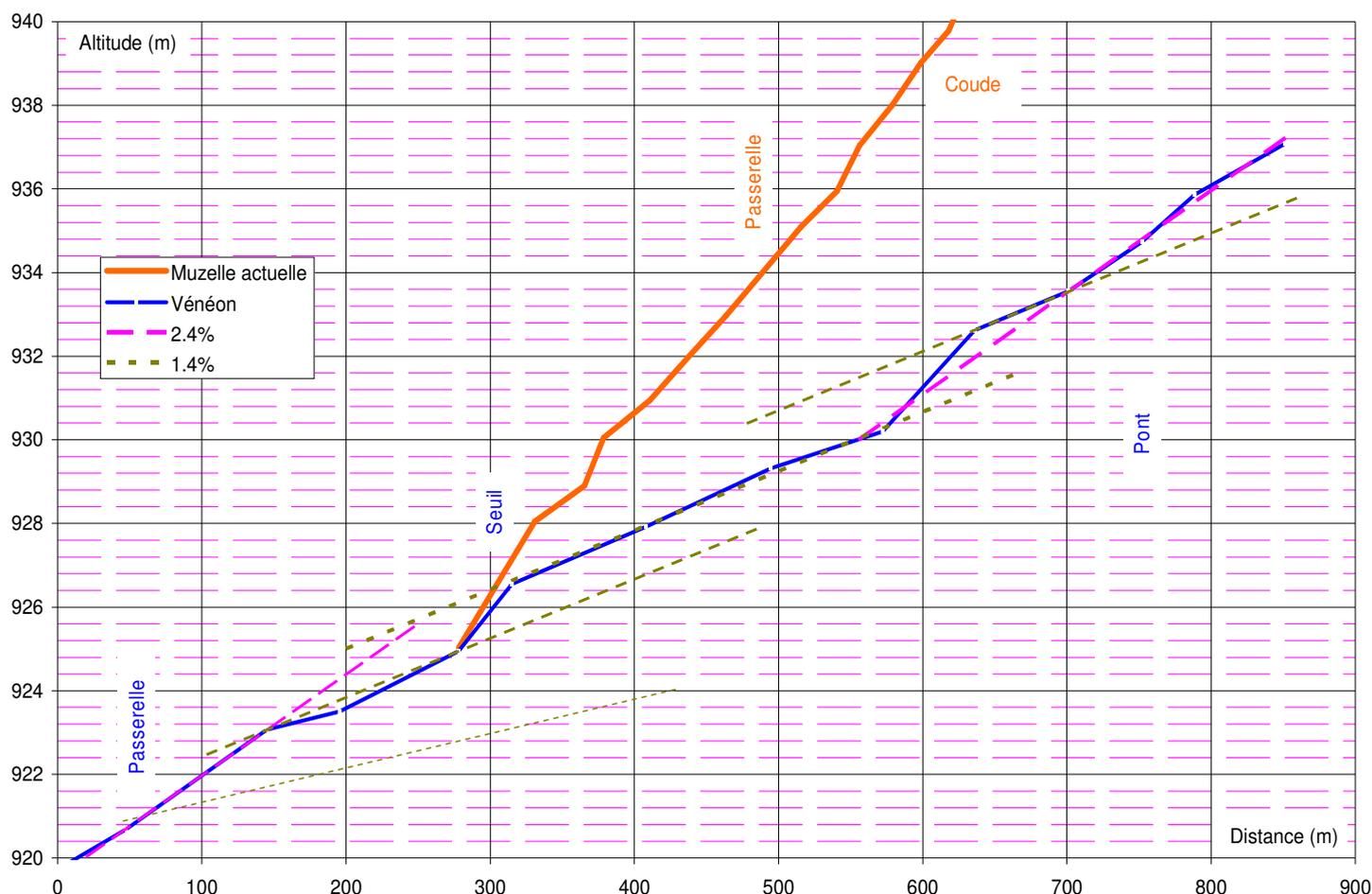


Figure 20 : Profil en long du Vénéon dans la zone d'étude.

Étonnamment, ce profil en long montre deux structures de pentes :

- + Le lit pavé présente une pente de 2.4 % visible en amont comme en aval de la zone d'étude.
- + Le lit déstabilisé - essentiellement par les prélèvements de blocs - présente une pente de 1.4 %. Il est visible... au droit des protections de berge, le long du camping "le Champ du Moulin" et du plan d'eau.
- + Un rapide - peu perceptible sur le terrain - est implanté dans le coude à proximité du lavoir, environ 150 mètres en aval du pont. Il paraît très exposé à une érosion régressive dans un contexte de lit très étroit.
- + Le seuil de la confluence avec la Muzelle constitue le second secteur raide.

3.3. Quantification du transport solide

3.3.1. Situation actuelle

La figure suivante montre la relation entre débit liquide et débit solide dans la zone alluvionnaire de plan du Lac... qui est aussi celle observée dans la zone d'étude en l'absence de perturbation par la prise d'eau et d'apport dans le tronçon intermédiaire :

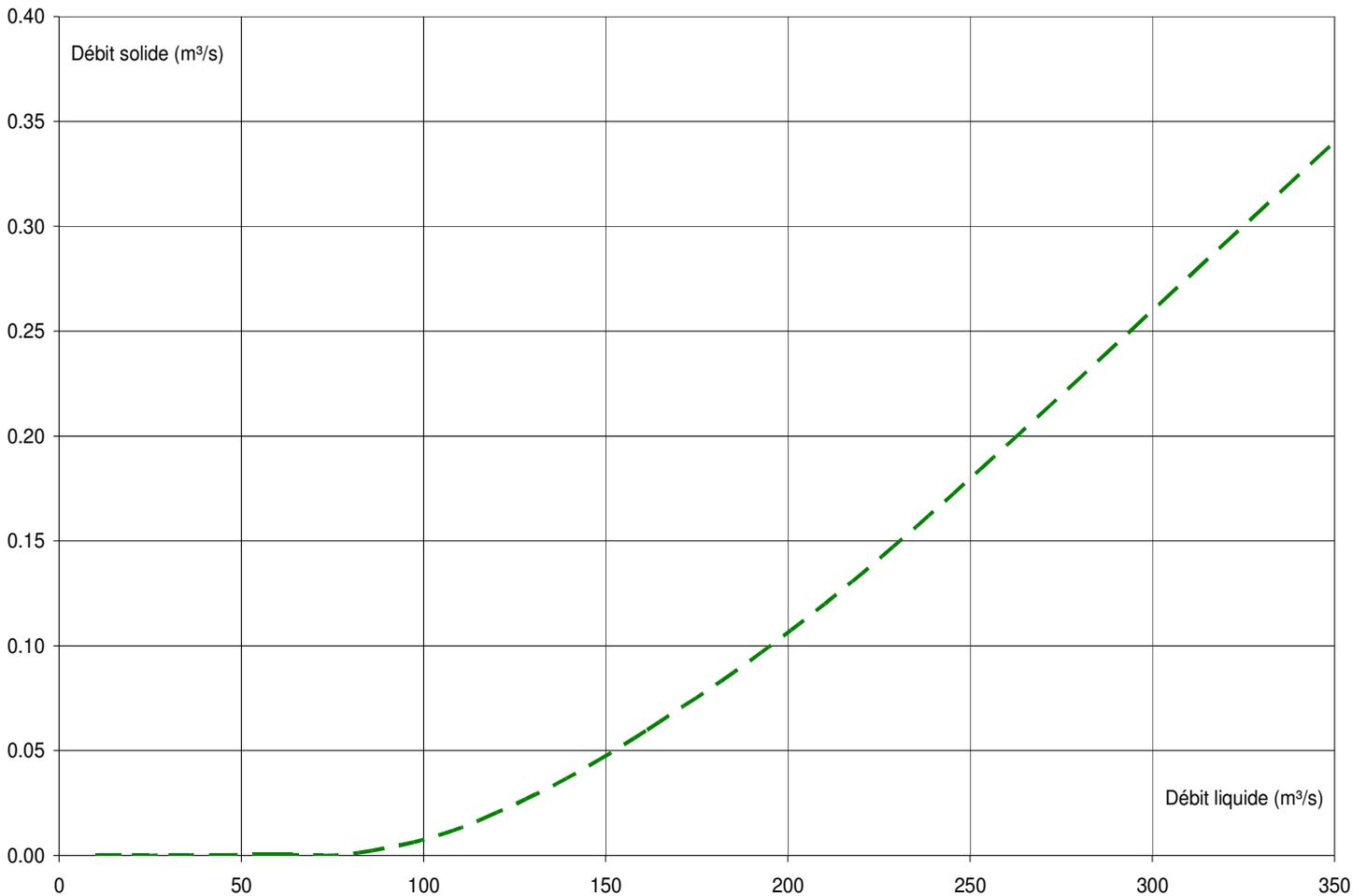


Figure 21 : Relation entre débit liquide et débit solide à Plan du Lac.

Cette figure montre que le seuil de début de mouvement est proche de 70 m³/s.

D'autre part, la pente modérée limite le débit solide qui dépasse à peine 0.3 m³/s pour le débit centennal.

Étant données les variations de largeur, la pente d'équilibre est fortement variable notamment par rapport à la zone - très large - de Plan du Lac. Ainsi, la démarche est la suivante :

- Le débit solide est calculé dans la zone alluvionnaire de Plan du Lac, avec une pente de 1.1 % et une largeur de 100 mètres.
- La pente permettant d'obtenir le même débit solide est calculée pour un débit décennal qui paraît prépondérant en termes d'équilibre du lit.
- La relation débit solide est alors présentée dans les cas suivants :

	Largeur	Pente d'équilibre
Zone alluvionnaire de Plan du Lac	100	1.1 %
Lit "naturel" dans la zone d'étude	60	0.92 %
Lit actuel dans la zone d'étude	20	0.66 %

Le graphique suivant montre les relations entre débit liquide et débit solide pour les géométries définies ci-dessus :

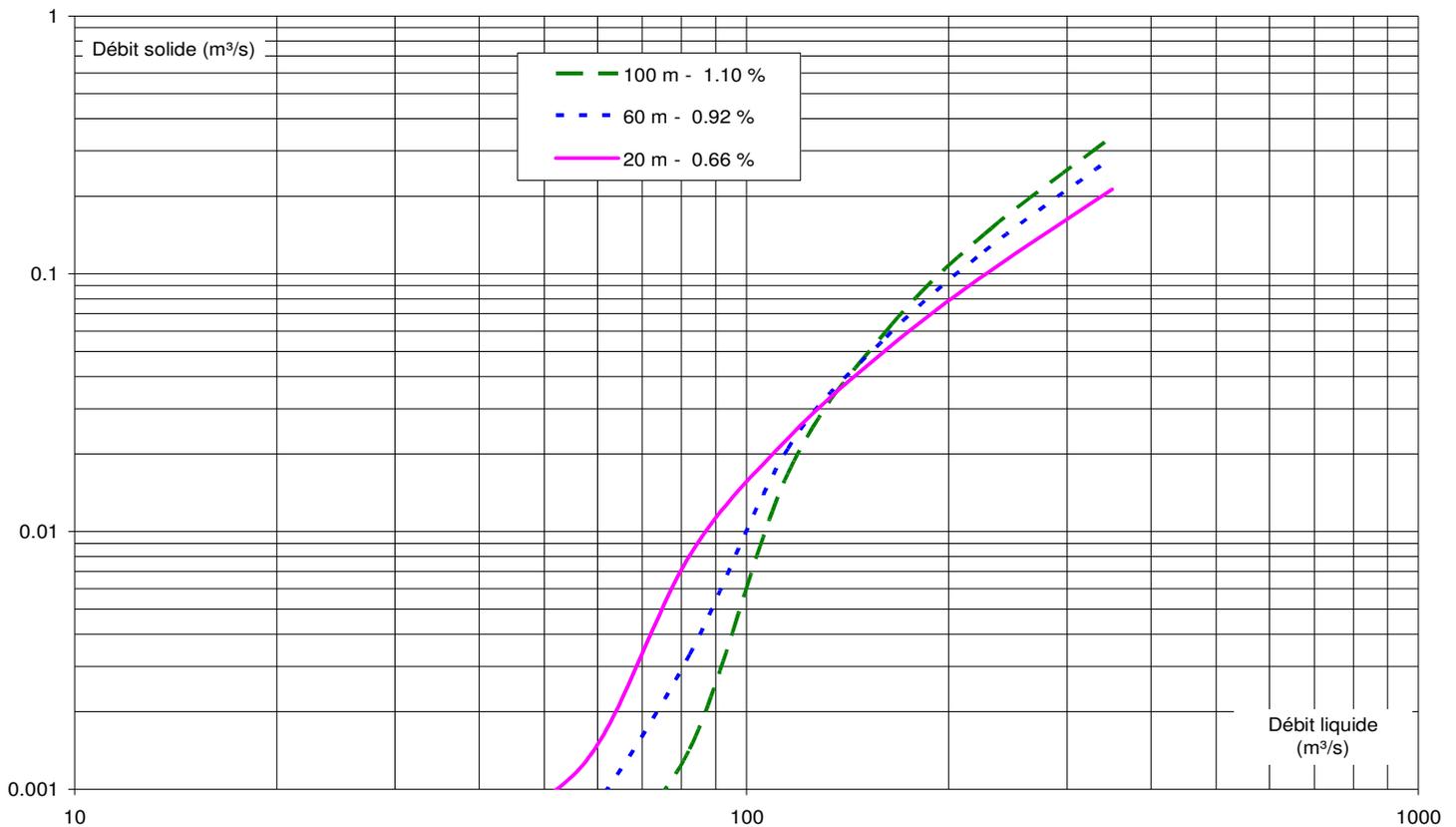


Figure 22 : Relations en débit solide et débit liquide.

Ces résultats montrent qu'il n'y a pas d'équilibre parfait mais plutôt un équilibre dynamique autour du débit dominant avec alternance entre dépôt et érosion lorsque le lit est alluvionnaire.

D'autre part, la pente dans la traversée de Vénosc est toujours très supérieure à la pente d'équilibre. Cela signifie que la tendance est toujours au creusement du lit. Cette tendance est contrecarrée par le pavage du lit... lorsque l'on laisse les blocs dans le lit.

La figure suivante montre l'hydrogramme de crue correspondant aux hypothèses retenues dans l'étude de 2008 et pour un apport amont de 1.1 % et une largeur de 100 mètres :

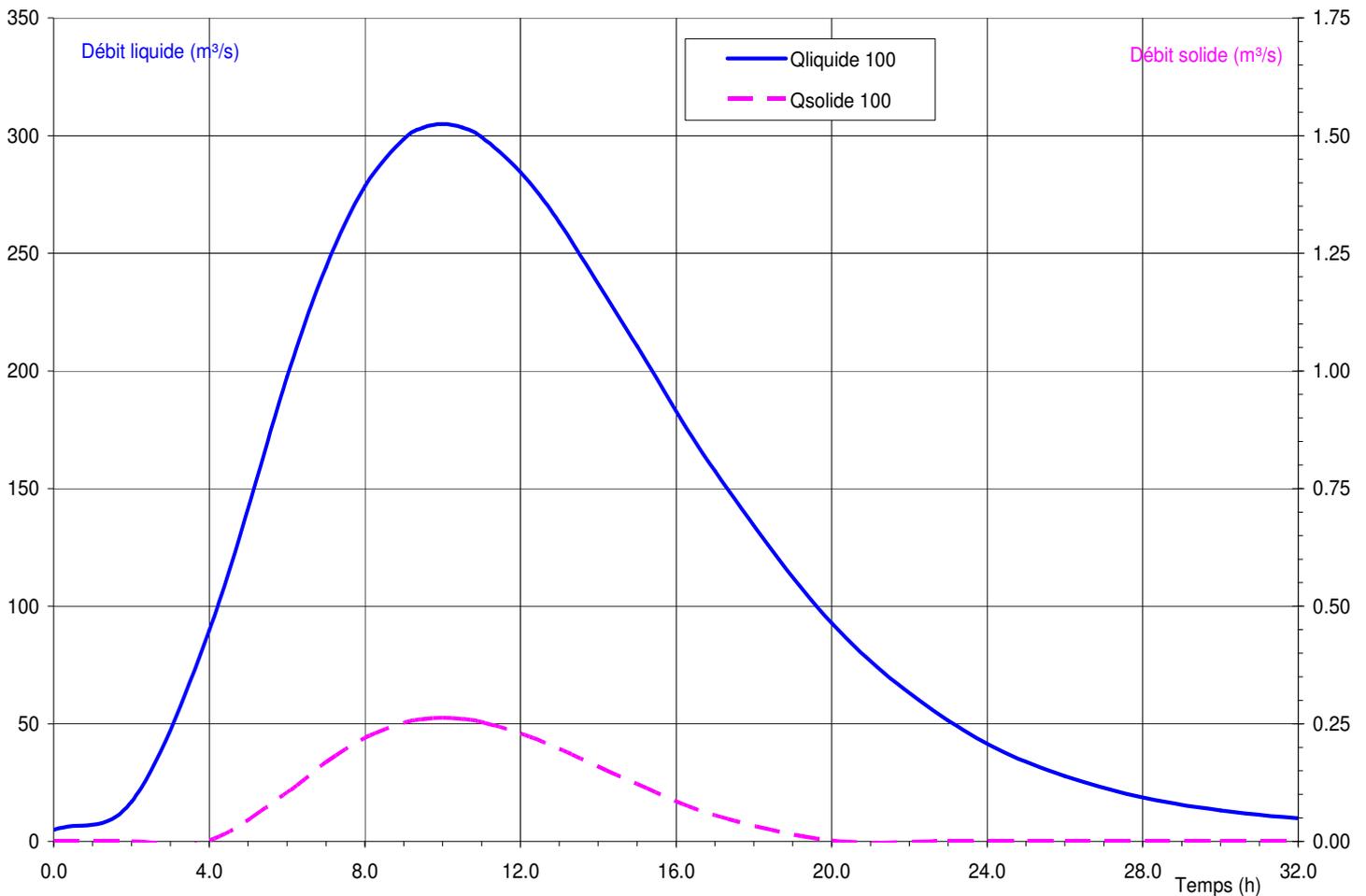


Figure 23 : Hydrogramme d'une crue centennale sur le Vénéon.

Le volume transité est alors de seulement 8 000 m³... qui transitent sans difficulté dans la zone d'étude.

Il s'agit du fonctionnement normal du Vénéon en l'absence d'apport entre Plan du Lac et Vénosc.

Ce calcul est réalisé avec un diamètre moyen de 10 centimètres (ce qui est important). La prise en compte d'un diamètre moyen de 5 centimètres, comme dans le secteur de Plan du Lac correspond à transit de 22 000 m³ ... qui transitent sans difficulté dans la zone d'étude.

3.3.2. Capacité de reprise

Pour le calcul de la capacité de transport dans la zone d'étude, il est possible de considérer deux pentes :

- La pente de 1.4 % qui correspondrait à l'absence de dépôt dans l'état actuel,
- La pente de 1.9 % qui correspondrait à un lissage entre les seuils. Elle est sans doute assez proche de la pente "naturelle" dans cette zone. Pour cette pente, un débordement en amont du camping "le Champ du Moulin" (engravement de 2 mètres) paraît très probable. Cette pente correspond aussi à un lissage de la pente en aval du seuil situé à la confluence avec la Muzelle.

Le graphique suivant montre les capacités de transport pour un diamètre moyen de 10 cm (mal connu en cas d'éboulement amont) pour ces différentes hypothèses :

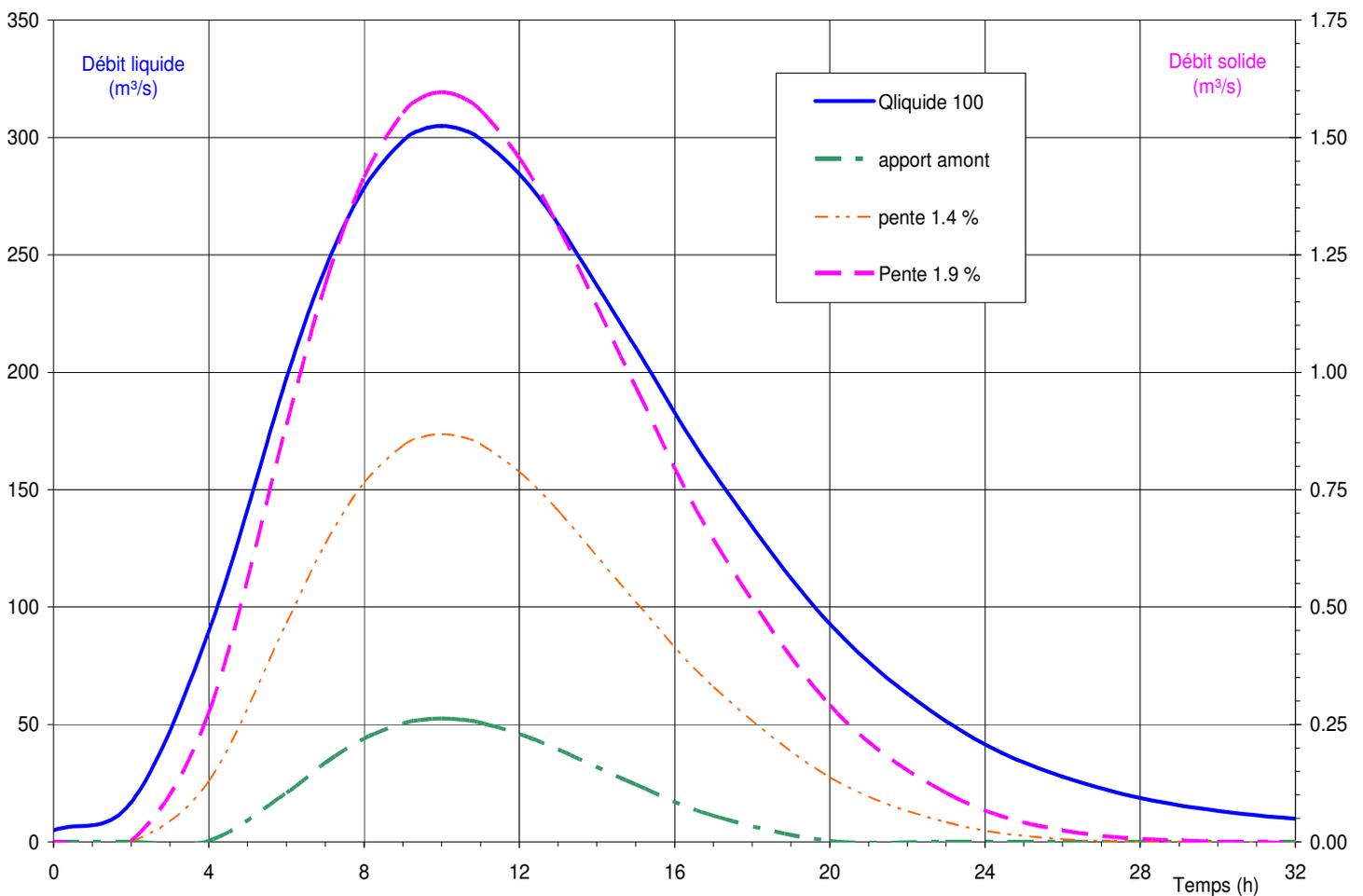


Figure 24 : Apport et capacité de transit dans la zone d'étude.

L'augmentation de pente combinée à la réduction de largeur conduit à une forte majoration de la capacité de transport dans la zone d'étude. Il est alors possible de calculer le volume total transporté durant la crue.

Le graphique suivant établi un bilan de transport :

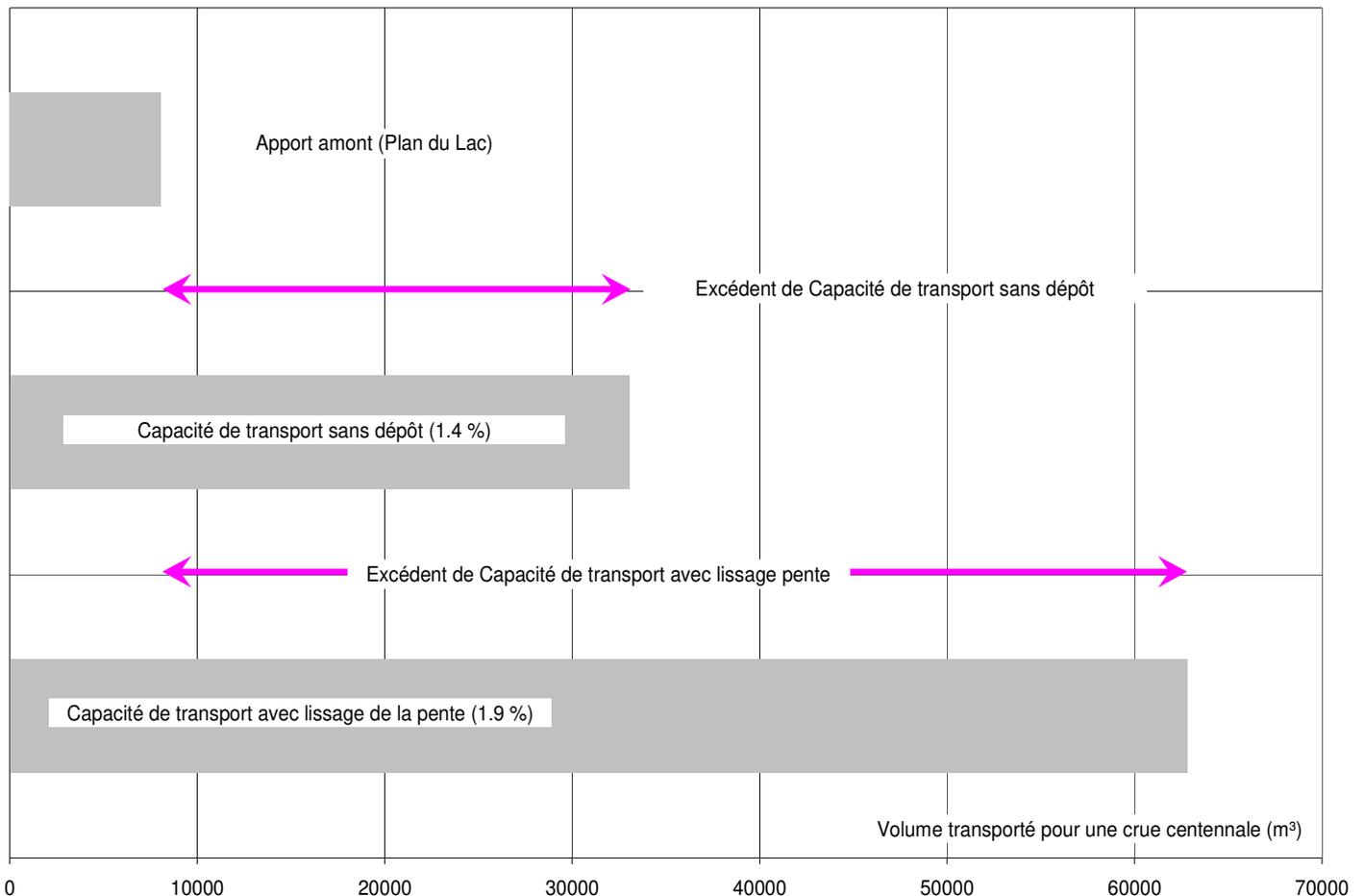


Figure 25 : Bilan de transport pour une crue centennale.

Ce graphique conduit au bilan suivant :

- Sans dépôt dans le lit (1.4 %) la capacité de transit dans la zone d'étude excède de 25 000 m³ les apports amont au niveau de Plan du Lac. Sans pavage ce volume serait érodé sur le site. Cette capacité excédentaire permet de faire transiter
 - Les 9 000 m³ qui pourraient provenir du torrent de la Muzelle.
 - 16 000 à 25 000 m³ (en fonction de ce qui est apporté par le torrent de la Muzelle) correspondent à ce qui pourrait être apporté par éboulement entre Plan du Lac et la zone d'étude. Notons que les apports du Sellier, situés en aval de la passerelle aval dans une zone plus raide, n'entrent pas dans ce bilan.
- Avec un lissage de la pente (1.9 %) la capacité de transit dans la zone d'étude excède de 54 000 m³ les apports amont sous réserve de l'absence de débordement massif. Cette capacité excédentaire permet de faire transiter
 - Les 9 000 m³ qui pourraient provenir du torrent de la Muzelle.
 - 45 000 à 54 000 m³ (en fonction de ce qui est apporté par le torrent de la Muzelle) correspondent à ce qui pourrait être apporté entre Plan du Lac et la zone d'étude.

Ainsi, le fonctionnement est le suivant :

- + Sans apport en aval de Plan du Lac, les matériaux transitent sans difficulté. Pour une crue au moins décennale, les apports du torrent de la Muzelle sont repris sans difficulté sous réserve d'un faible dépôt en aval du seuil (si les apports sont effectivement localisés au niveau du seuil).
- + Pour un apport en aval de Plan du Lac inférieur à 25 000 m³, les matériaux transitent sans dépôt pour une crue centennale (par contre un tel apport et une crue inférieure conduirait à un dépôt). Les matériaux apportés par le torrent de la Muzelle sont repris au prix d'un dépôt en aval du seuil.
- + Pour un apport supérieur, l'engravement conduirait à un dépôt et vraisemblablement à un débordement en amont du camping avec une chute de la capacité de transport.
- + Dans l'état "naturel" avec un lit de 60 mètres de largeur et une pente de 1.9 %, la capacité de transit sans dépôt était de l'ordre de 44 000 m³ soit un excédent de 35 000 m³... mais une forte capacité de dépôt dans un lit large et potentiellement divaguant, comme après 1946.

Ainsi, pour une période de retour centennale, il paraît adapté, en accord avec le maître d'ouvrage de retenir une situation du Vénéon sans dépôt majeur, sauf un lissage du lit par les apports du torrent de la Muzelle. Il convient cependant de rappeler que plus la crue est faible et plus le risque de dépôt est important, le Vénéon n'ayant alors qu'une faible capacité de reprise.

Le risque majeur par rapport à une forte crue est plutôt l'érosion du lit, notamment entre l'amont du camping "le Champ du Moulin" et le pont, la pente étant forte dans cette zone.

D'autre part, en l'absence de protections résistantes face à des contraintes hydrauliques fortes, des érosions de berge sont très probables sur l'essentiel du linéaire.

À partir de la topographie actuelle, le RTM a réalisé un calcul hydraulique qui conduit aux résultats présentés page suivante.

Les débordements correspondent pour l'essentiel au camping le "Champ du Moulin" rive droite, implanté dans l'ancien lit, qui est menacé notamment par un débordement très préoccupant en amont.

Au contraire, la rive gauche correspondant au cône de déjection du torrent de la Muzelle, le risque de débordement y paraît faible en dehors du lit historique. Par contre, les risques d'érosions y sont importants, particulièrement le long du parking en rive gauche en aval du pont.

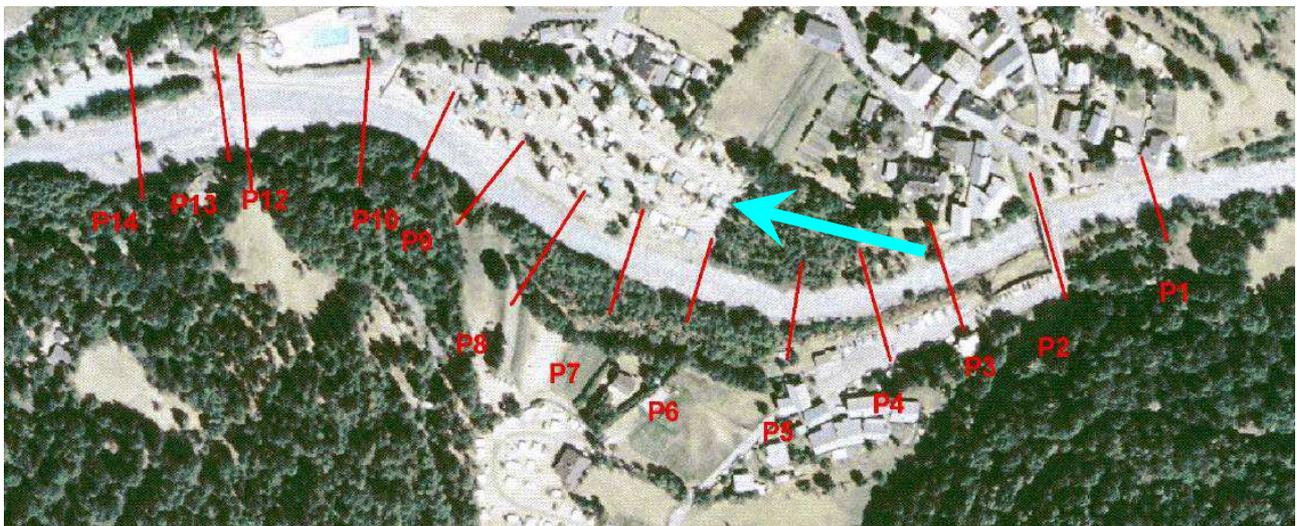
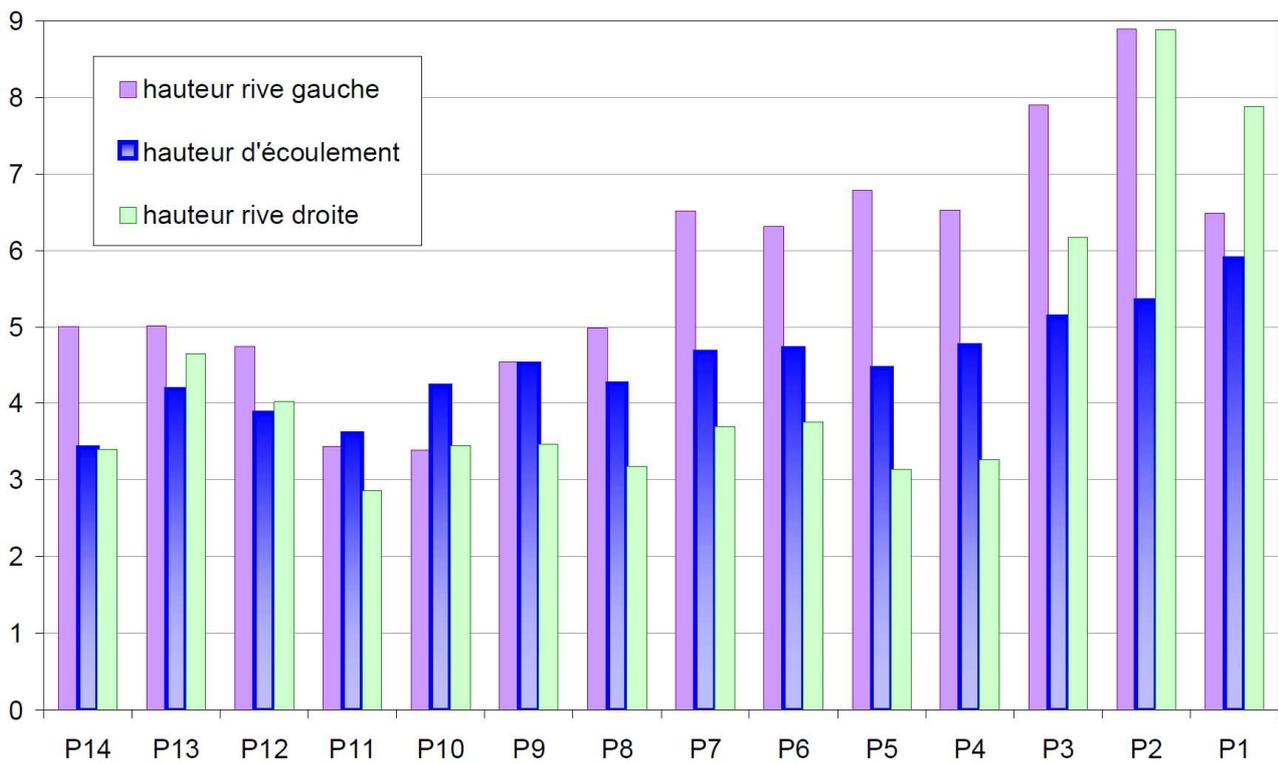


Figure 26 : Conditions d'écoulement d'une crue centennale (documents RTM).

4. PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT

4.1. Synthèse sur l'état actuel

Dans l'état actuel, les fonctionnements des deux cours d'eau sont largement indépendants grâce au pavage du Vénéon :

- Pour le Vénéon, deux phénomènes sont à redouter :
 - Une déstabilisation du lit trop étroit et mal pavé.
 - Un débordement en rive droite vers le camping "le Champ du Moulin", le lit trop étroit conduisant à des hauteurs d'eau excessives.

Dans un tel cas, l'élargissement du lit paraît incontournable.

- Pour le torrent de la Muzelle, les phénomènes sont différents :
 - La passerelle amont présente une section réduite et constitue un point faible, mais isolé.
 - Le dépôt massif dans la partie aval conduit à l'effacement du lit... et au débordement sur le camping de la Cascade, au moins dans sa partie aval. Ce dépôt découle d'une forte réduction de pente sur le cône de déjection - inévitable - mais aussi d'apports amont qui sont mal connus et potentiellement très variables.

Les solutions sont alors plus complexes et passent notamment par une gestion des dépôts massifs sur le cône de déjection.

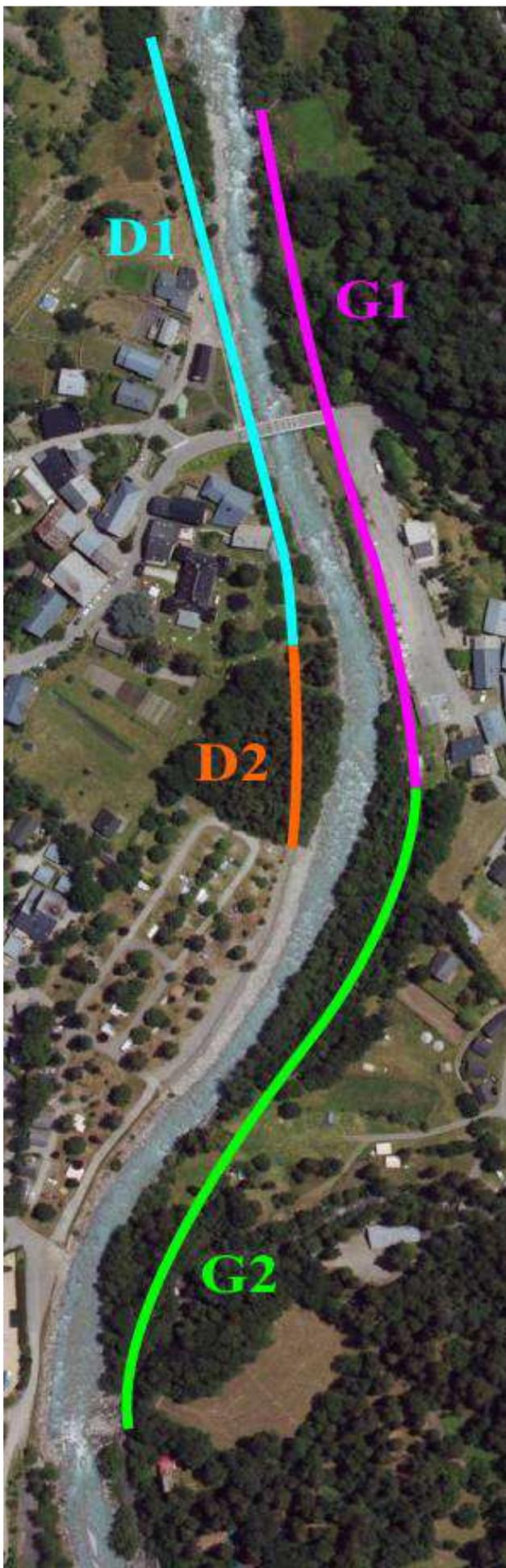
4.2. Principe d'aménagement du Vénéon

4.2.1. Tracé général

Le principe est ici l'élargissement du lit. L'analyse hydraulique a montré qu'une largeur de 40 mètres constitue un minimum acceptable avec un rapport L/h de 23 pour une crue centennale. Cette valeur doit être considérée comme objectif lors de l'aménagement.

Lors de l'aménagement, aucun prélèvement de blocs dans le lit en vue de la constitution d'une protection de berge n'est acceptable !

Aucune modification du profil en long n'est prévue dans le cadre de cet aménagement, l'élargissement devant réduire fortement les risques d'érosion du lit. Seule la mise en place de seuils permettrait d'exclure totalement un enfoncement du lit - notamment dans la partie amont - mais son coût est très important et les impacts sont forts.



Plusieurs tronçons doivent être considérés en vue d'un aménagement :

D1 Dans cette zone, l'élargissement peut être obtenu en reprenant les massifs en enrochements qui sont disposés devant les maçonneries existantes (voir paragraphe 4.2.2 page suivante). La mise en place de protections avec un fruit de 3/2 permet un recul important de la berge et une amélioration des conditions d'écoulement. Il est essentiel dans ce cas de préserver le pavage existant du lit et de disposer un sabot sur toute la largeur entre le nouveau pied de berge et l'actuel.

D2 Cette zone étroite constitue un point faible du dispositif actuel. Un recul important de la berge permet un abaissement très net de la ligne d'eau et une stabilisation de ce tronçon actuellement très vulnérable. Une nouvelle protection doit alors être mise en place pour un raccordement progressif entre le perré existant en amont et celui en aval. Le calage de ce perré sera dépendant du niveau de crue atteint après aménagement (voir paragraphe 4.2.3 ci-dessous). Il est essentiel dans ce cas de préserver le pavage existant du lit et de disposer un sabot sur toute la largeur entre le nouveau pied de berge et l'actuel.

G1 Dans cette zone, l'élargissement peut être obtenu en reprenant les massifs en enrochements qui sont disposés devant les maçonneries existantes. La mise en place de protections avec un fruit de 3/2 permet un recul important de la berge et une amélioration des conditions d'écoulement (voir paragraphe 4.2.2 page suivante). Cela impose un recul important - mais inévitable du parking actuellement non protégé. Il est essentiel dans ce cas de préserver le pavage existant du lit et de disposer un sabot sur toute la largeur entre le nouveau pied de berge et l'actuel.

G2 Il s'agit ici de reculer la berge en face du camping "le Champ du Moulin" afin de retrouver une largeur en base de 40 mètres (voir paragraphe 4.2.3 ci-dessous). La réactivation de cette partie de l'ancien lit paraît hors de portée dans la partie amont du lit car ces terrains sont perchés au niveau du camping rive droite... dont on vise la mise hors d'eau pour une crue centennale. Dans la partie aval (confluence avec la Muzelle) la hauteur de berge est plus faible.... Mais très au dessus du niveau de la crue centennale. Évidemment un sabot large est indispensable à la préservation du pavage. Cet élargissement se terminera au droit du seuil - conservé avec un raccordement au lit actuel de plus de 30 mètres de largeur.

4.2.2. Protection devant un perré existant

La figure suivante montre de façon schématique la reprise des protections de berge amont (D1 et G1) :

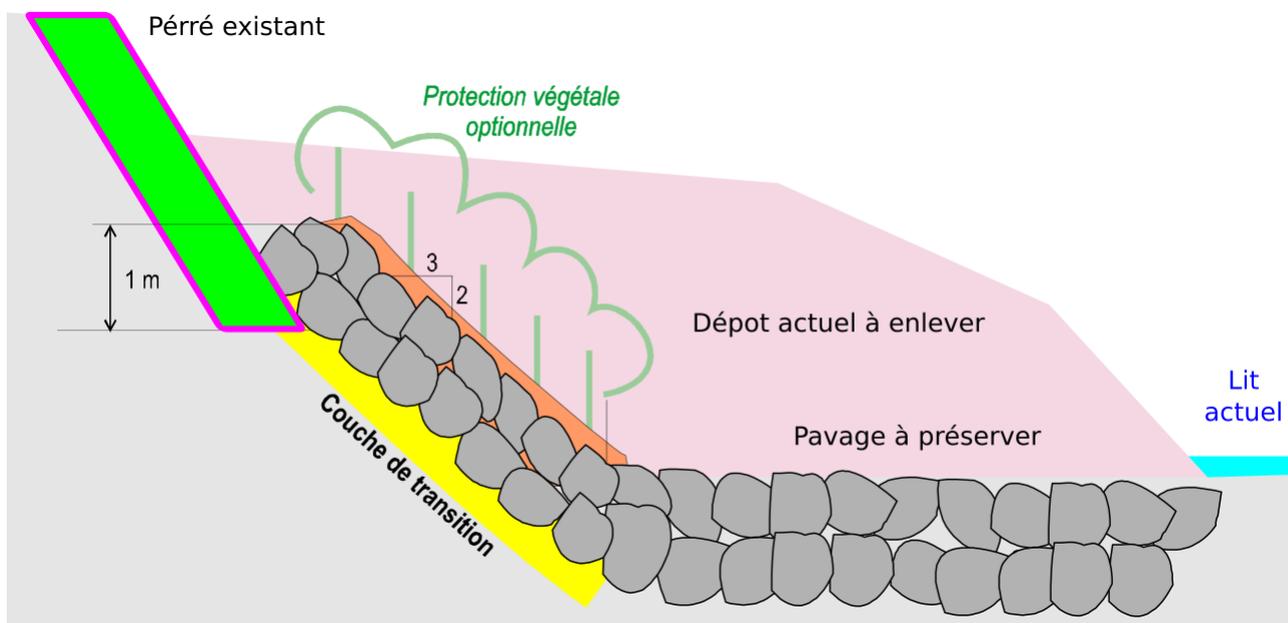


Figure 27 : Reprise des protections le long des perrés existants

Ces protections auront les caractéristiques suivantes :

- Enrochements libres d'un poids de 250 à 3500 kg (poids moyen 1 000 kg) disposés sur deux rangées (épaisseur 1.5 mètres).
- Couche de transition composée d'un géotextile ou d'une couche de 20 centimètres de déchets de carrières (diamètre moyen de 40 mm et d_{80} supérieur à 150 mm). Les matériaux des terrasses décaissées étant assez grossiers, cette couche de transition ne paraît pas nécessaire mais une vérification lors du chantier paraît nécessaire.
- Fruit de 3H/2V.
- Sommet du perré calé un mètre sous le niveau de base des protections existantes.
- Sabot de pied constitué avec des blocs de 250 à 3500 kg disposés de deux à trois couches de blocs en fonction de la largeur gagnée par rapport au lit actuel. Il devra permettre un raccord avec le pavage actuel.
- Les blocs prélevés lors de l'enlèvement du dépôt existant pourront évidemment être utilisés pour constituer cette protection, ce qui en réduira considérablement le coût. Par contre aucun prélèvement de blocs n'est acceptable dans le lit mineur.

La revégétalisation rapide de la berge pourra être encouragée par percolation de terre entre les blocs et installation de boutures de saules (des essais seront nécessaires pour trouver les techniques les plus efficaces). Cette protection végétale - optionnelle - n'est pas fonctionnelle et peut être omise. Elle reste possible pour faciliter l'intégration de l'ouvrage dans le site même si le site est déjà naturellement très minéral.

4.2.3. Protection en l'absence de perré existant

La figure suivante montre de façon schématisque la réalisation de nouvelles protections de berge dans la partie aval du projet (D2 & G2) :

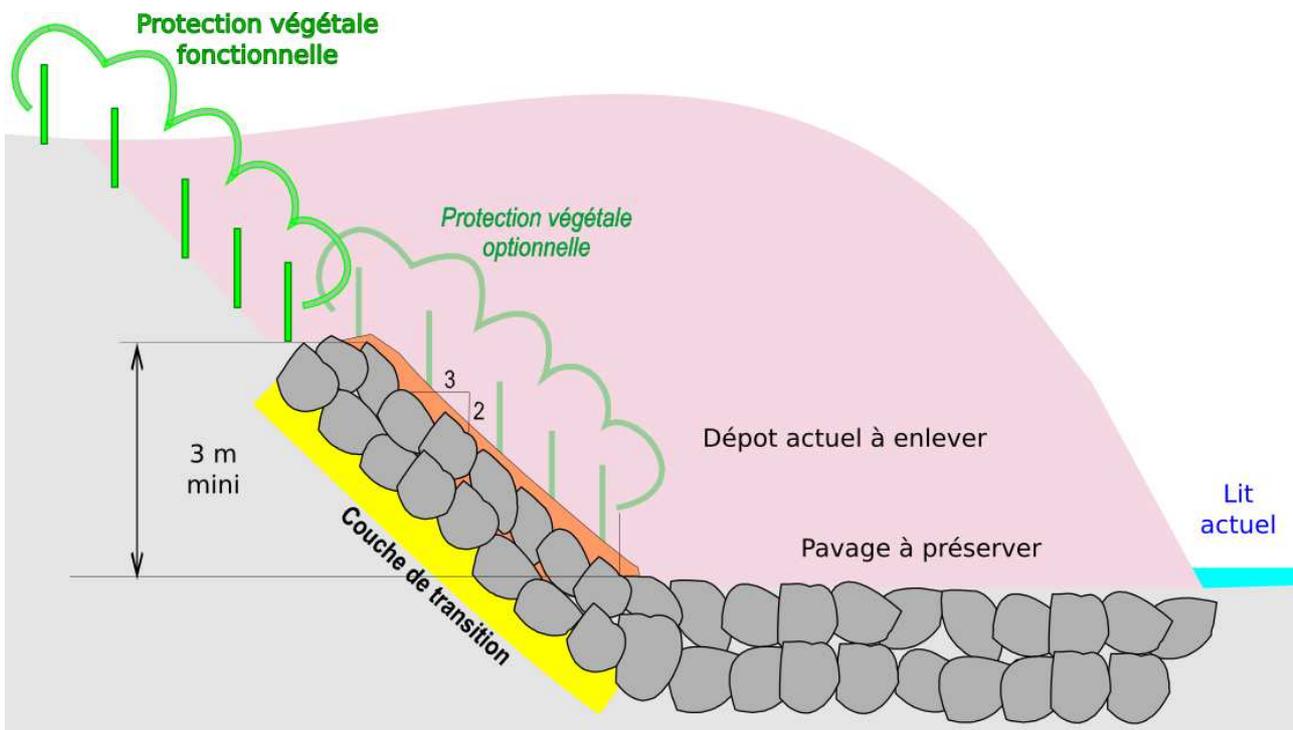


Figure 28 : Mise en place de nouvelles protections

Ces protections auront les caractéristiques suivantes :

- Enrochements libres d'un poids de 250 à 3500 kg (poids moyen 1 000 kg) disposés sur deux rangées (épaisseur 1.5 mètres).
- Couche de transition composée d'un géotextile ou d'une couche de 20 centimètres de déchets de carrières (diamètre moyen de 40 mm et d_{80} supérieur à 150 mm). Les matériaux des terrasses décaissées semblent assez grossiers - sous réserve d'une vérification lors du chantier - pour éviter la mise en place de cette couche de transition.
- Fruit de 3H/2V.
- Sommet du perré calé au dessus du niveau de la charge de l'écoulement. L'augmentation de la largeur de 20 à 40 mètres permet d'abaisser le niveau de charge de 1.2 mètres pour être de "seulement" 2.6 mètres. Une revanche minimum impose une hauteur d'au moins 3 mètres.
- Si le terrain naturel est situé nettement au dessus du sommet de la protection, un talus présentant un fruit de 3/2 minimum (2/1 de préférence), devra être réalisé. Ce talus devra être végétalisé. Cette précaution permet de faire face à une surélévation modérée et temporaire du niveau d'eau. Elle est cependant loin de procurer la même résistance que les enrochements mais son coût est très faible. Cette protection est fonctionnelle et doit être mise en œuvre.
- Sabot de pied constitué avec des blocs de 250 à 3500 kg disposés sur deux à trois couches de blocs en fonction de la largeur gagnée par rapport au lit actuel. Il devra permettre un raccord avec le pavage actuel.

- Les blocs prélevés lors de l'enlèvement du dépôt existant pourront évidemment être utilisés pour constituer cette protection, ce qui en réduirait considérablement le coût. Par contre aucun prélèvement de blocs dans le lit mineur n'est acceptable.

La revégétalisation rapide de la berge pourra être encouragée par percolation de terre entre les blocs et installation de boutures de saules (des essais seront nécessaires pour trouver les techniques les plus efficaces). Cette protection végétale - optionnelle - n'est pas fonctionnelle et peut être omise. Elle reste possible pour faciliter l'intégration de l'ouvrage dans le site même si le site est déjà naturellement très minéral.

La vue en plan suivante correspond à une l'emprise du lit restauré :

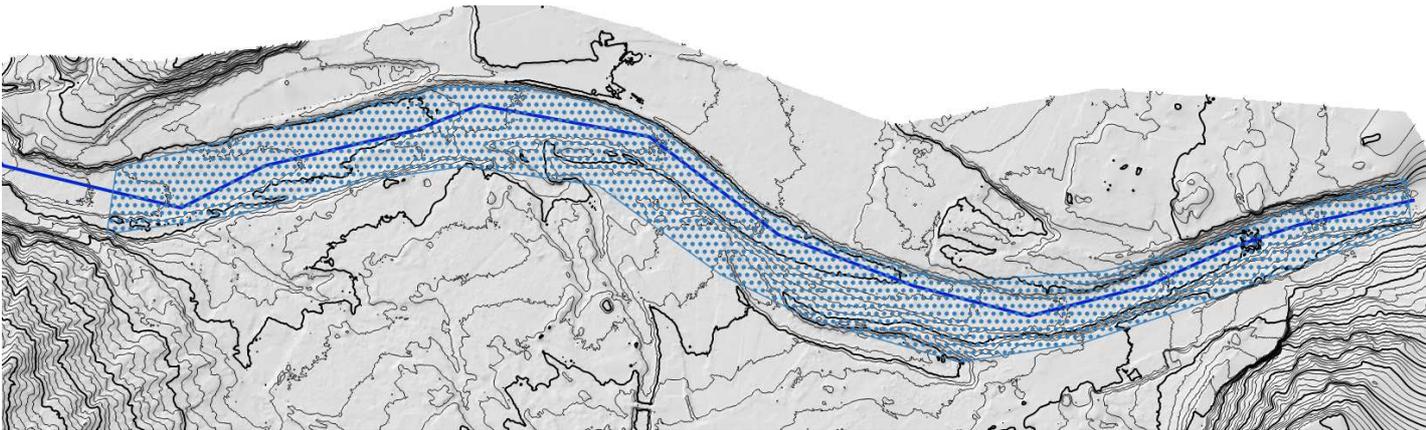


Figure 29 : Emprise du Vénéon après aménagement.

4.3. Aménagement du torrent de la Muzelle

4.3.1. Gestion des dépôts

Des dépôts massifs sont probables dans la zone de confluence et en aval (voir en amont en cas d'apports exceptionnels). Le lit du torrent serait alors "effacé" par les dépôts et divaguerait largement au moins en aval de la passerelle au droit du camping "La Cascade".

D'autre part, la confluence actuelle n'est pas favorable dans la mesure où :

- ❖ Le seuil impose des niveaux élevés en amont. Un apport solide à ce niveau générerait un dépôt dans le lit du Vénéon dans la zone critique du camping "le Champs du Moulin".
- ❖ En aval du seuil, la pente du Vénéon n'est que de 1.4 % (et 2 % pour l'effacement du seuil) ce qui est nettement inférieur à la pente en aval.
- ❖ Les enjeux dans la zone de confluences sont importants : parc de sport en rive gauche, centre aquatique en rive droite, plan d'eau....

Ainsi, les solutions envisageables sont les suivantes :

- Une réduction des apports dans le bassin versant paraît hors de portée en l'absence de zone d'érosion clairement identifiée.
- Une remontée des digues dans le cours aval avec un lit toujours aussi étroit imposera des hauteurs totalement disproportionnées (une dizaine de mètres de hauteur).
- Un curage du lit, en minorant la pente terminale du lit, majorerait les dépôts dès le début de la crue, effaçant tout le gain attendu.
- La mise en place d'une plage de dépôt en amont du cône de déjection imposerait des travaux de grande ampleur par manque de site favorable, imposerait des curages récurrents et risquerait de déstabiliser le lit en aval.
- Ainsi, la gestion des dépôts sur le cône de déjection constitue la solution la plus adaptée. Elle doit prendre en compte les éléments suivants :
 - Pour une crue centennale, les apports amont peuvent atteindre 36 000 m³. Le transit aval n'est que de 8 000 m³ environ. La différence doit se déposer sur le cône de déjection ce qui impose une surface importante.... Bien au delà du lit actuel.
 - Un dépôt trop épais par rapport au lit actuel va remonter en amont du coude... généralisant le débordement sur le camping depuis l'amont.
 - Il est incontournable de préserver la pente aval (voir de l'augmenter si possible) afin de maximiser le transit vers le Vénéon.
 - La pente du Vénéon en aval de la confluence doit être maximisée afin de favoriser la reprise des matériaux et réduire les dépôts et les débordements.
 - Une confluence dans une zone de faibles enjeux est nettement préférable à la situation actuelle dans une zone d'enjeux forts et avec une forte incertitude sur les tracés.

La figure page suivante montre les profils en long vue en plan correspondante du Vénéon et du torrent de la Muzelle soit en suivant le tracé actuel soit le long du tracé ancien.

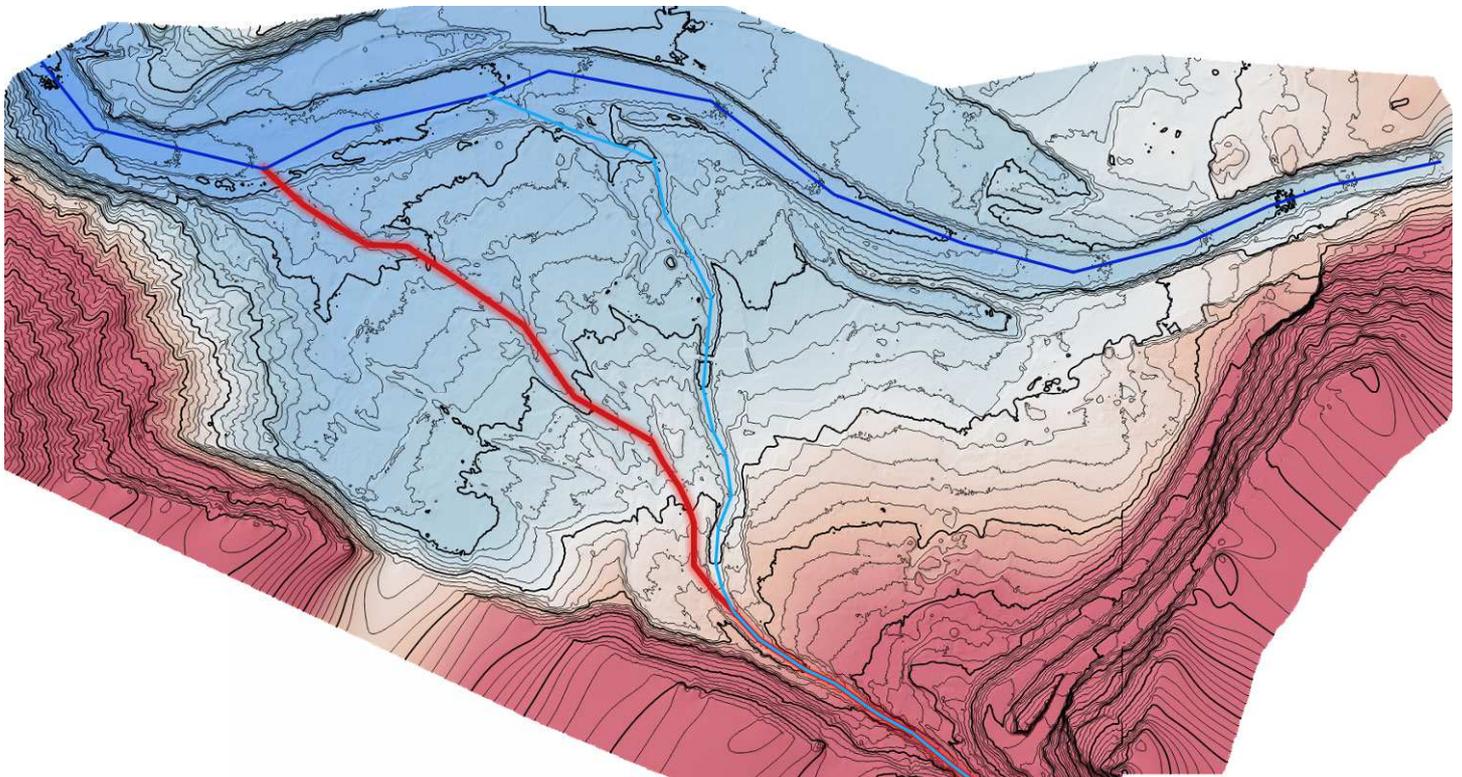
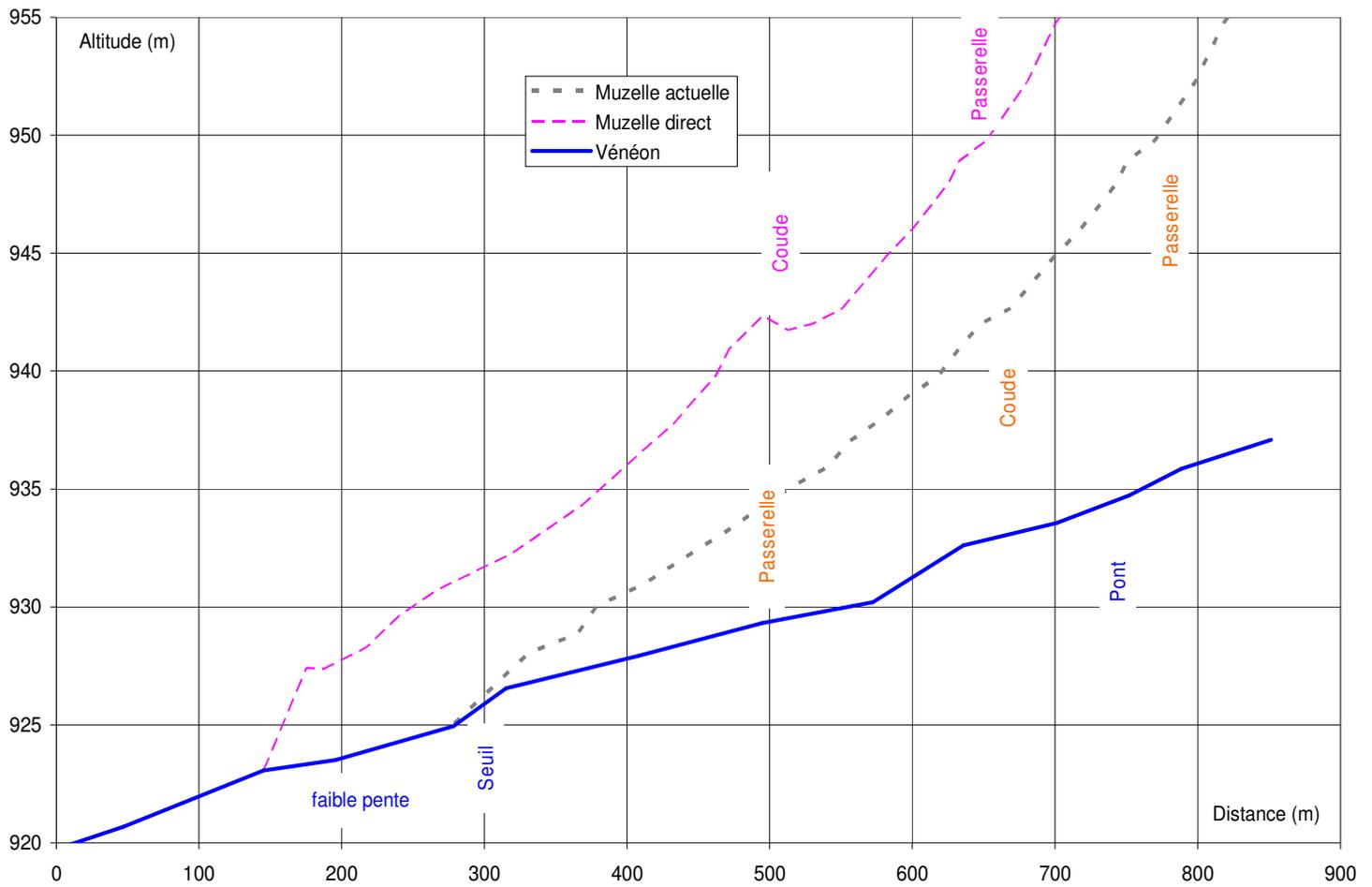


Figure 30 : Différents tracés du torrent de la Muzelle.

Ces documents mettent nettement en évidence un ancien lit le long du versant qui conflue nettement en aval par rapport au tracé actuel. Ce tracé présente trois avantages majeurs :

- La confluence est nettement mieux placée dans une zone sans enjeux importants et avec une forte pente du Vénéon ce qui permet une maximisation de la reprise des matériaux.
- Ce tracé est éloigné du camping "La Cascade" et s'écoule dans une zone de moindre enjeu. Il paraît alors nettement plus accessible de protéger le camping à partir de ce nouveau tracé.
- La chicane en amont de la confluence disparaît, ce qui réduit les risques de dépôts régressifs et les incertitudes sur la localisation de la confluence effective.

Le seul inconvénient de cet aménagement semble être le changement de destination de terrains inondables et peu valorisés sur le cône de déjection.

Le graphique suivant permet la comparaison des deux profils en long (en prenant les mêmes abscisses pour le sommet du cône de déjection) et montre que les profils en long de ces deux tracés présentent des pentes très comparables :

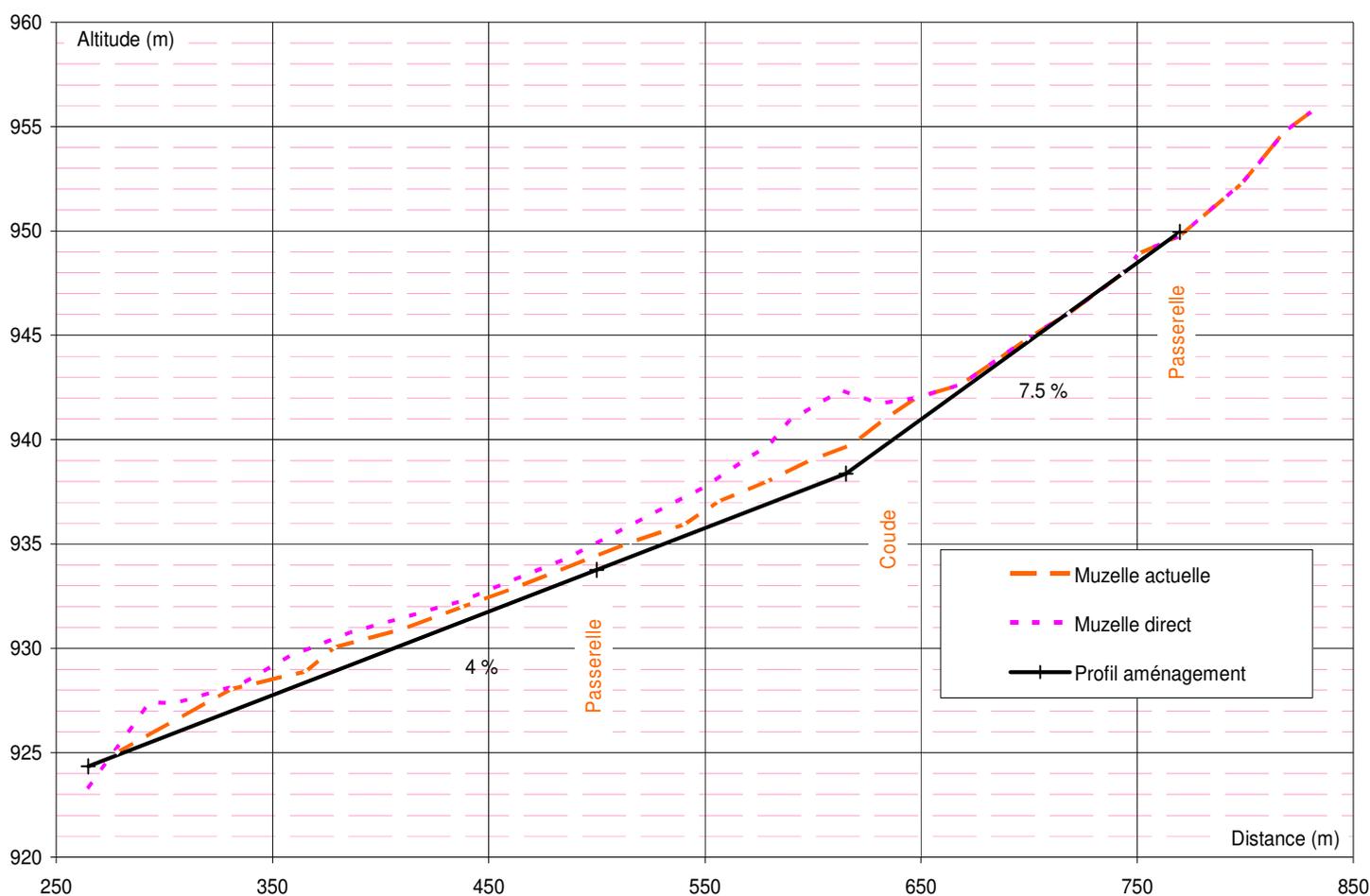


Figure 31 : Profil en long de l'aménagement du cône de déjection.

Ce graphique montre aussi un principe d'aménagement du nouveau lit avec une pente régulière de 7.5 % dans le cours amont - comme aujourd'hui - et une pente majorée à 4 % dans le cours aval, ce qui augmente le transit vers le Vénéon et minore donc le dépôt à la rupture de pente.

Cette solution sera associée à un élargissement important dans la zone du coude afin d'y maximiser le dépôt.

D'autre part, la dérivation du lit permet la création d'un merlon très massif dans le cours amont du chenal, protégeant le camping "La Cascade" qui se retrouve très éloigné du lit, comme le montre la figure suivante avec l'emprise indicative de ce nouveau lit... d'une superficie de près de 2 ha :

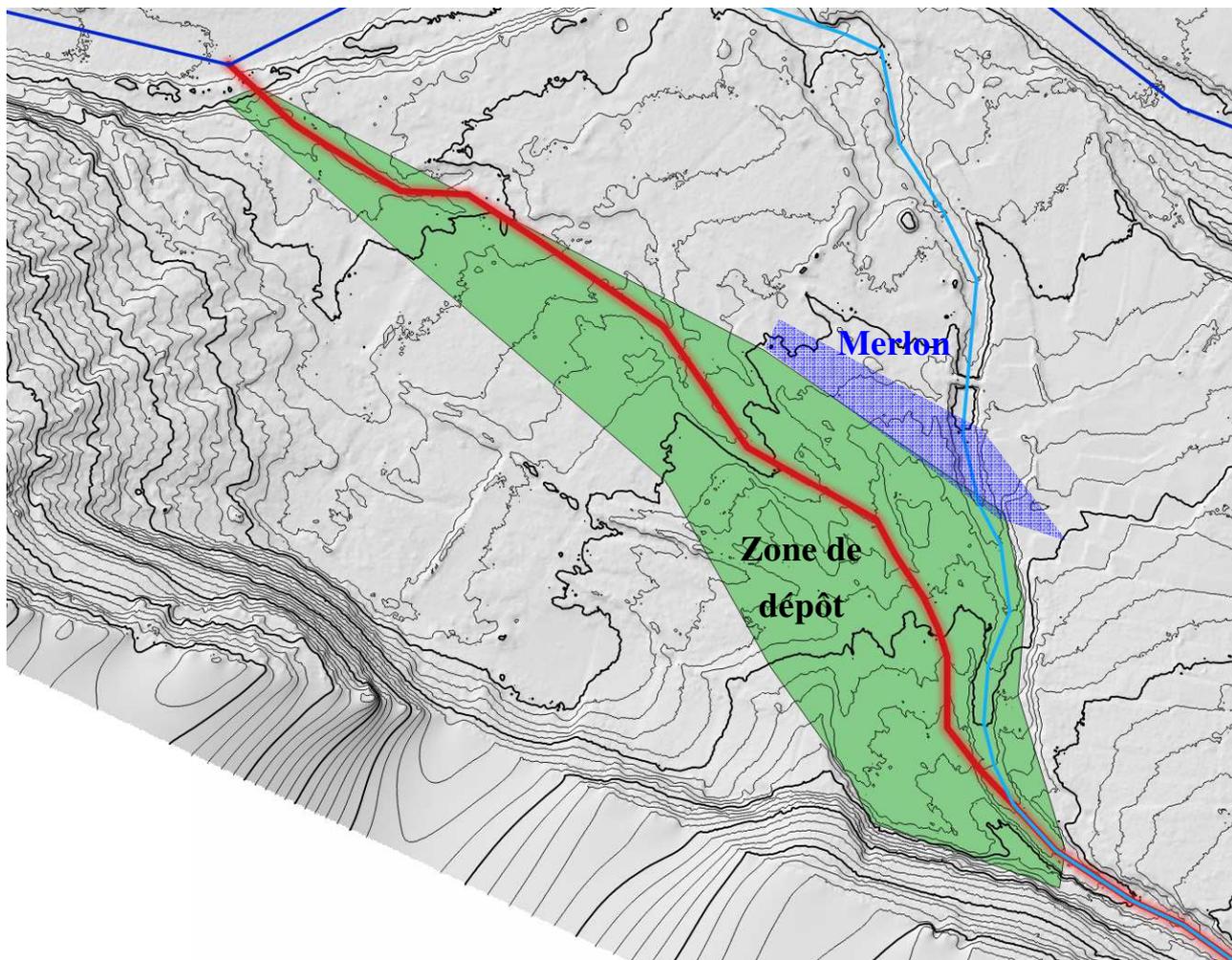


Figure 32 : Emprise du nouveau lit.

Un merlon permettra d'éviter tout débordement en direction du camping "La Cascade". Par contre, il sera suffisamment court pour permettre un étalement généralisé à la seule rive gauche actuelle en cas de crue extrême.

Associée à l'élargissement du lit du Vénéon cette solution permet de réduire considérablement les risques pour les aménagements autour de la confluence actuelle.

Dans cette zone très large, un lit mineur d'environ 5 mètres de largeur et 1 mètre de profondeur devra être taillé afin d'éviter un étalement des écoulements ordinaires (réchauffement, dépôt de matériaux parasite, etc...). Les terrains au dessus de ce lit ordinaire sommairement taillé pourront être utilisés pour des activités ludiques voir le passage d'un chemin (le chemin principal resterait en sommet de berge rive gauche). Dans ce cas, un éventuel franchissement fusible serait limité à ce petit chenal ordinaire.

4.3.2. Passerelle de l'Alleau

Cette passerelle paraît exposée notamment en cas d'obstruction par les embâcles. Une remontée de la passerelle ou son remplacement par un ouvrage plus grand serait très coûteux... pour un résultat aléatoire.

Ainsi, la démarche consiste à accepter ici un débordement du lit mineur mais de favoriser un retour dans le lit en aval. En effet, le chemin qui emprunte cette passerelle présente déjà un point haut très décalé par rapport au sommet de berge.

L'organisation du retour dans le lit mineur en aval de la passerelle permet aussi la prise en compte d'un débordement modéré provenant par exemple de la protection de berge trop avancée juste en amont.

Évidemment, un débordement en dehors du lit mineur doit conduire à l'évacuation immédiate du camping "La Cascade".

La figure suivante montre l'emprise d'un retour dans le lit avec une pente transversale de l'ordre de 5 % en direction du lit. Aucune protection des terrains ainsi terrassés n'est nécessaire, leur mise en culture étant compatible avec un tel projet :

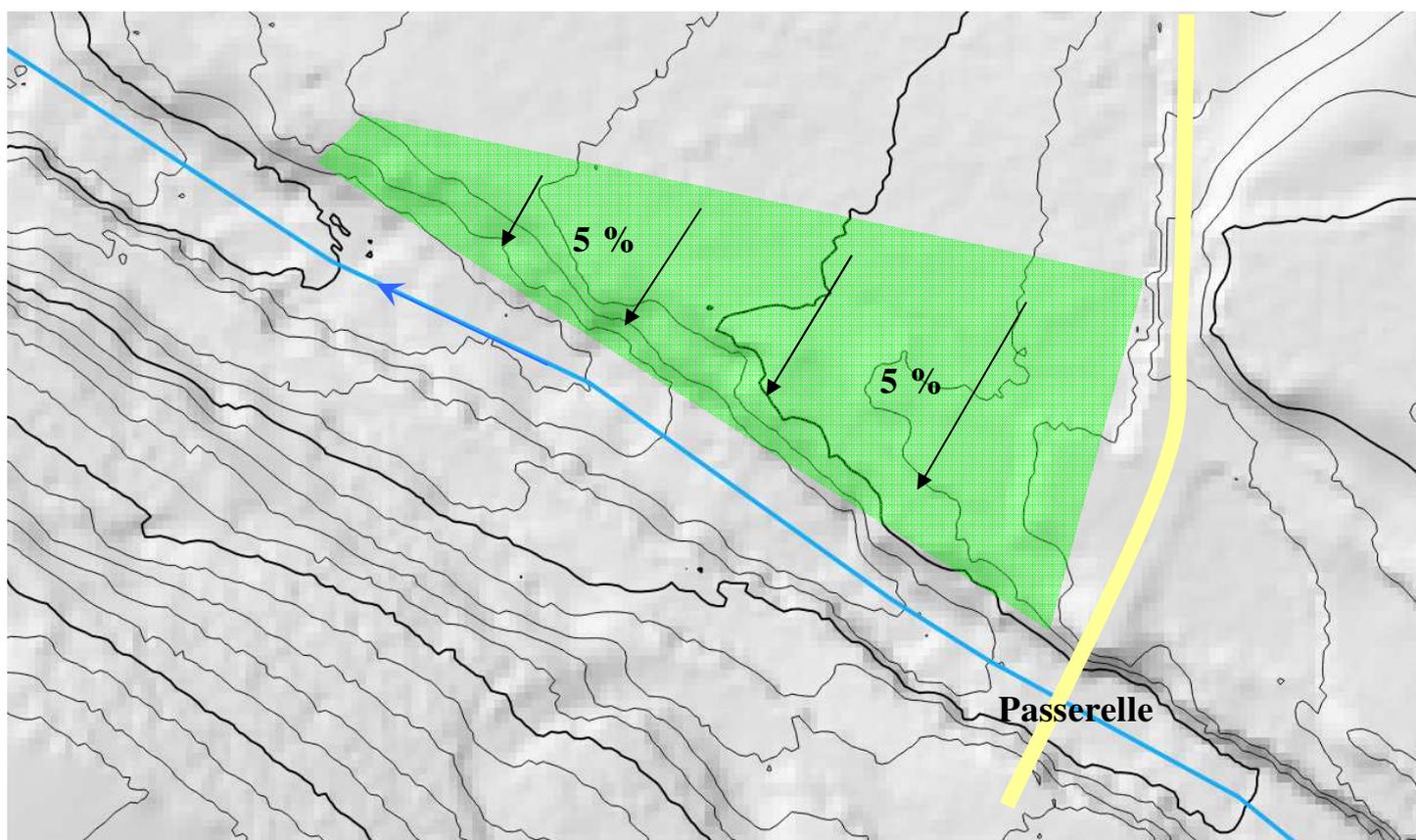


Figure 33 : Décaissement avec une pente transversale de 5 % en aval de la passerelle.

4.4. Entretien

4.4.1. Ouvrages

Ce type d'aménagement ne nécessite pas d'entretien particulier. Les interventions suivantes sont cependant souhaitables :

- Afin de favoriser la reprise de la végétation, un arrosage est à prévoir dans les premiers temps. La mise en place d'espèces locales devrait permettre une reprise durable ne nécessitant pas d'entretien. L'orientation et l'altitude du site relativisent la nécessité de cette intervention, l'important étant le suivi d'une bonne revégétalisation.
- Toute dégradation dans la protection devra être immédiatement réparée. Une inspection annuelle ou après chaque crue est nécessaire.

4.4.2. Curage

Deux types d'intervention doivent être distingués :

- Le curage régulier à la rupture de pente - dans la zone du coude actuel - correspond à l'excédent d'apport ordinaire du torrent.... Ce curage semble marginal dans l'état actuel. Il sera encore plus faible après aménagement car la pente aval serait faiblement majorée à 4 %.
- Le curage exceptionnel après une crue qui l'est tout autant. Une telle intervention est donc rare et correspondra à un dépôt massif. Rappelons que les volumes déposés - et donc à curer - correspondent à un excédent d'apports et ne seraient jamais arrivés jusqu'au Vénéon.

Comme dans l'état actuel, un curage est donc nécessaire pour éviter le "gonflement" du cône de déjection à long terme et l'augmentation des risques débordement dans le coude et en aval. Les curages devront être réalisés afin de restaurer la géométrie initiale du projet.

LISTE DES GRAPHIQUES ET DESSINS

Figure 1 : Cône de déjection du torrent de la Muzelle et Vénéon.	1
Figure 2 : Débit liquide pour une crue décennale et une crue centennale.....	4
Figure 3 : Comparaison entre la carte du XIX ^{ème} siècle et l'actuelle.	5
Figure 4 : Comparaison entre la photographie du milieu du XX ^{ème} siècle et l'actuelle.....	5
Figure 5 : Vu de l'éboulement de 1946 sur la photo de 1952 et actuellement.....	6
Figure 6 : Aménagements réalisés sur le Vénéon.	7
Figure 7 : Lit vers 1900 (document RTM).....	8
Figure 8 : Lit figé après la crue de 1987 (document RTM).....	8
Figure 9 : Vue d'ensemble du cône de déjection avec le tracé du lit actuel.	11
Figure 10 : Profil du torrent de la Muzelle.	17
Figure 11 : Profil en long du lit actuel sur le cône de déjection.	18
Figure 12 : Relation entre débit liquide et débit solide pour différentes pentes.	19
Figure 13 : Hydrogrammes liquide et solides de crue centennale.....	20
Figure 14 : Volumes solides apportés pour une crue.....	21
Figure 15 : Répartition des volumes potentiels d'apports solides.....	23
Figure 16 : Zone inondable d'une crue centennale ordinaire.....	25
Figure 17 : Vue de la rive gauche du Vénéon entre le pont et le torrent de la Muzelle.....	30
Figure 18 : Coupe type à l'amont du camping "le Champ du Moulin".....	31
Figure 19 : Conditions d'écoulement dans le Vénéon.....	32
Figure 20 : Profil en long du Vénéon dans la zone d'étude.....	39
Figure 21 : Relation entre débit liquide et débit solide à Plan du Lac.....	40
Figure 22 : Relations en débit solide et débit liquide.....	41
Figure 23 : Hydrogramme d'une crue centennale sur le Vénéon.....	42
Figure 24 : Apport et capacité de transit dans la zone d'étude.....	43
Figure 25 : Bilan de transport pour une crue centennale.....	44
Figure 26 : Conditions d'écoulement d'une crue centennale (documents RTM).....	46
Figure 27 : Reprise des protections le long des perrés existants.....	49
Figure 28 : Mise en place de nouvelles protections.....	50
Figure 29 : Emprise du Vénéon après aménagement.....	51
Figure 30 : Différents tracés du torrent de la Muzelle.....	53
Figure 31 : Profil en long de l'aménagement du cône de déjection.....	54

Figure 32 : Emprise du nouveau lit.....	55
Figure 33 : Décaissement avec une pente transversale de 5 % en aval de la passerelle.....	56

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Lit au droit de l'éboulement de 1952.....	6
Photo 2 : Bassin versant de la Lauzière dans les schistes.....	9
Photo 3 : Lit rocheux et prise d'eau EDF.....	10
Photo 4 : Cascade de la Muzelle.	10
Photo 5 : Amont du cône de déjection (piège à flottant réalisé en 2015 et lit étroit).....	12
Photo 6 : Passerelle de l'Alleau.	12
Photo 7 : Lit dans la partie amont du cône de déjection et passerelle du camping.....	13
Photo 8 : Lit encaissé et dépôt dans le coude.	13
Photo 9 : Coude avec dépôt en rive gauche et arbres mobilisables.	14
Photo 10 : Ancien lit en rive gauche.....	14
Photo 11 : Lit en aval de la passerelle.	15
Photo 12 : Confluence en amont du seuil construit en 1990.....	16
Photo 13 : Lit du Vénéon en amont de Bourg d'Arud.....	26
Photo 14 : Changement de morphologie à l'amont de Bourg d'Arud.....	27
Photo 15 : Protections de berge en amont du pont.....	28
Photo 16 : Lit étroit en aval du pont.	29
Photo 17 : Fraction de l'ancien lit confisqué au Vénéon.	30
Photo 18 : Point faible en rive droite en amont du camping "le Champ du Moulin".....	33
Photo 19 : Lit au droit du camping "le Champ du Moulin".....	34
Photo 20 : Seuil vu de l'amont puis de l'aval.....	35
Photo 21 : Bassin en aval du seuil et confluence avec l'ancien lit du torrent de la Muzelle.....	36
Photo 22 : Passerelle aval.....	37
Photo 23 : Lit régulier du Vénéon en aval de l'élargissement de Vénosc.	37
Photo 24 : Profil en long général du Vénéon.	38