

Version 07/03/2016

Commune de
Lanslevillard
Station de Val Cenis Vanoise

# Etude hydraulique et propositions d'aménagements pour la protection contre les débordements de l'Arcelle Neuve

rtm
restauration des terrains en montagne

Service Département RTM de la Savoie
42, Quai Charles Roissard
73026 Chambéry Cédex

Office National des Forêts

***Cliché page de garde :*** *Vue d'hélicoptère de l'étalement de la lave du 14 aout 2015 (Source : extrait d'une vidéo PGHM, du 14 aout 2015)*

| Chargé d'études | Relecture | Transmission |
|---|---|---|
| D. ETCHEVERRY<br>R. PAULHE | D.BINET | L. VOISIN |

rtm
restauration des terrains en montagne

Service Département RTM de la Savoie
42, Quai Charles Roissard
73026 Chambéry Cédex

Office National des Forêts

# Table des Matières

**I Introduction ..... 7**

I.1 Contexte ..... 7

I.2 Le torrent de l'Arcelle et ses enjeux ..... 7

I.3 Objectifs ..... 8

**II Description du torrent de l'Arcelle et de son fonctionnement hydraulique ..... 9**

II.1 Historique des évènements ..... 9

II.2 Analyse géomorphologique du torrent ..... 10

II.2.1 Carte géologique ..... 10

II.2.2 Profil en long ..... 10

II.2.3 Description linéaire du torrent ..... 11

**III Analyse et définition de l'évènement de référence ..... 23**

III.1 Sources d'apports solides ..... 23

III.1.1 Erosion linéaire ..... 23

III.1.2 Glissement au sein du glacier rocheux ..... 23

III.1.3 Apports de flottants et risque d'embâcles ..... 24

III.2 Type d'écoulement ..... 24

III.2.1 Forme des crues à la traversée du cône de déjection ..... 24

III.2.2 Formation du phénomène de référence ..... 25

III.3 Analyse hydrologique : estimation des débits liquides ..... 25

III.4 Estimation des volumes d'apports de matériaux ..... 26

III.4.1 Volume des crues historiques ..... 26

III.4.2 Utilisation de méthodes de détermination de volume de laves ..... 26

III.4.3 Méthode basée sur la géomorphologie ..... 26

III.4.4 Méthode hydrologique ..... 27

III.4.5 Méthode ECSTREM et abaques RTM ..... 28

III.4.6 Formules classiques de transport solide ..... 29

III.4.7 Synthèse ..... 30

III.5 Synthèse : crue de référence ..... 31

**IV Analyse de l'aléa ..... 32**

IV.1 Identification des points de débordements ..... 32

IV.2 Analyse des conditions d'écoulements sur les tronçons « chenalisés » ..... 33

IV.2.1 Retour sur la crue du 14 aout 2015 ..... 33
IV.2.2 Estimation de la section d'écoulement de la crue de référence ..... 34
IV.3 Modélisation 2D de l'étalement des laves sur le cône de déjection ..... 37
IV.3.1 Modèle utilisé ..... 37
IV.3.2 Données topographiques et maillage ..... 37
IV.3.3 Reproduction de la crue du 14 Aout 2015 ..... 38
IV.3.4 Modélisation de la crue de référence ..... 40
IV.4 Cas des crues à fort charriage ..... 43
IV.5 Cartographie de l'aléa torrentiel ..... 43
IV.5.1 PPR en vigueur ..... 43
IV.5.2 Cartographie de l'aléa au regard des résultats de l'étude ..... 44

**V Propositions d'aménagements ..... 45**
V.1 Aménagement d'une plage de dépôt (option 1) ..... 46
V.1.1 Description technique de la solution ..... 46
V.1.2 Impact de l'aménagement sur l'aléa ..... 46
V.1.3 Obligations réglementaires ..... 47
V.1.4 Exploitation de l'ouvrage ..... 48
V.1.5 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage ..... 48
V.1.6 Estimation sommaire du montant de l'opération ..... 49
V.2 Aménagement d'un chenal d'écoulement à ciel ouvert (option 2) ..... 50
V.2.1 Description technique de la solution ..... 50
V.2.2 Impact de l'aménagement sur l'aléa ..... 52
V.2.3 Obligations réglementaires ..... 53
V.2.4 Exploitation de l'ouvrage ..... 54
V.2.5 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage ..... 54
V.2.6 Estimation sommaire du montant de l'opération ..... 55
V.2.7 Variantes avec dalot sur tout le linéaire ..... 56
V.3 Suppression des enjeux et parcours à moindre dommage (option 3) ..... 56
V.3.1 Description technique de la solution ..... 56
V.3.2 Impact de l'aménagement sur l'aléa ..... 57
V.3.3 Obligations réglementaires ..... 57
V.3.4 Exploitation de l'aménagement ..... 57
V.3.5 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage ..... 58
V.3.6 Estimation sommaire du montant de l'opération ..... 58
V.4 Aménagement de la traversée de la piste St Pierre ..... 58

V.4.1 Description technique de la solution ..... 58

V.4.2 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage ..... 61

V.4.3 Estimation sommaire du montant de l'opération ..... 61

V.5 Aménagements complémentaires de réduction du risque : entretien de la végétation et du lit du torrent ..... 61

**Table des illustrations ..... 63**

**Table des annexes ..... 65**

# I Introduction

## I.1 Contexte

Le 14 aout dernier (2015), le village de Lanslevillard est envahi par deux laves torrentielles successives du torrent. Entre 10 et 15 000 m³ de matériaux se déposent sur le cône de déjection. De nombreux et coûteux dégâts sont à déplorer : gare d'arrivée de télésiège, locaux de la société de remontées mécaniques, restaurants, logements et voirie sont touchés.

Le torrent s'était déjà manifesté dans un passé récent (24/08/1987 et 24/09/1993), causant toutefois des dégâts de moins grande ampleur.

Dans ce contexte, la commune a sollicité le service RTM afin de définir des aménagements pour se protéger contre les débordements du torrent.

## I.2 Le torrent de l'Arcelle et ses enjeux

Le torrent de l'Arcelle est un affluent rive gauche de l'Arc, avec lequel il conflue sur la commune de Lanslevillard. Son bassin versant, orienté sud, draine une surface allongée de 2,97 km² et est dominé par la ligne de crête entre le Rocher de la Cailla (3010 m), le Signal du Mont Cenis (3377 m), le col du Lou (3042 m) et le sommet de la Nunda (3023m).

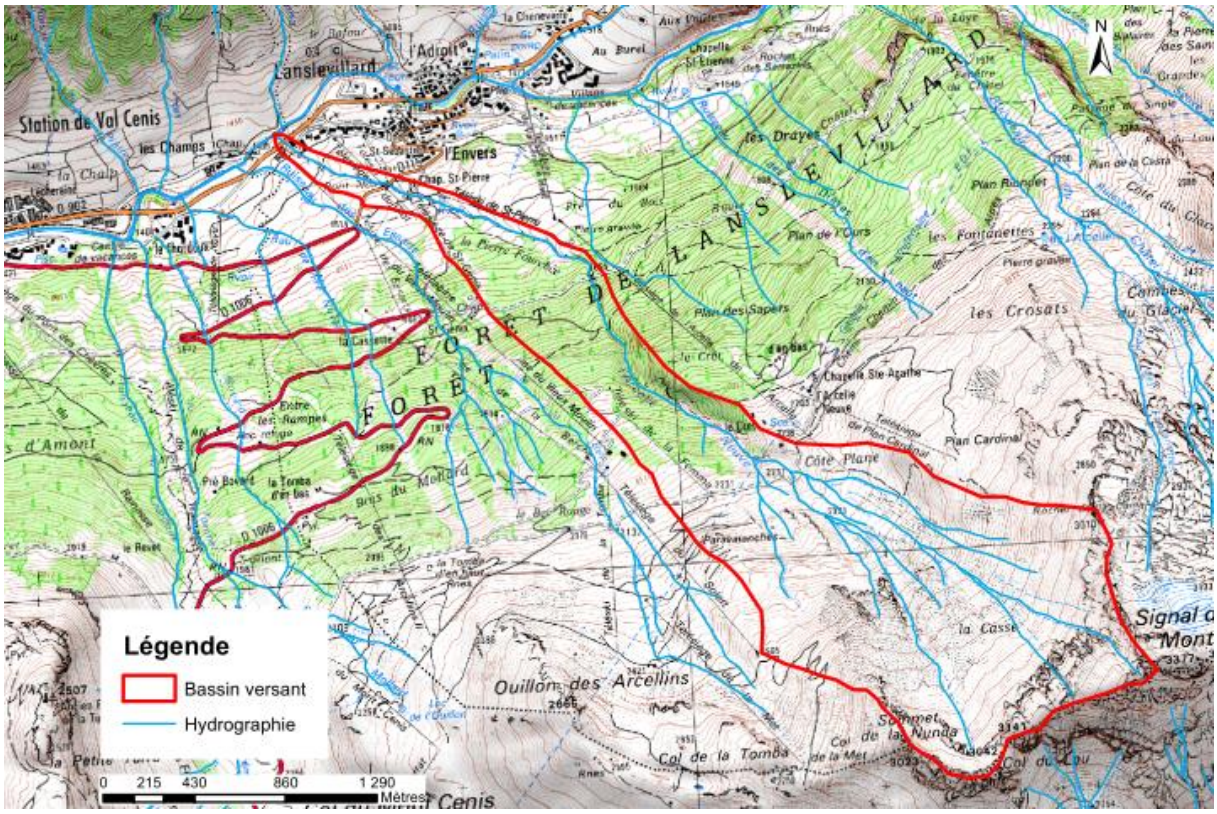



**Figure 1 : Zone d'étude**

Les principaux enjeux se situent sur le cône de déjection et sont :

- Village de Lanslevillard en cas de sortie du torrent au niveau de la piste St Pierre (arrivé par le passé, nous le verrons) et route départementale RD 115,
- Secteur traversé par l'extrémité aval du torrent avec : Bâtiment de la SEM ValCenis en rive gauche, hôtel « Les Mélèzes » et restaurant mitoyen en rive droite, route départementale RD 902 et parkings.

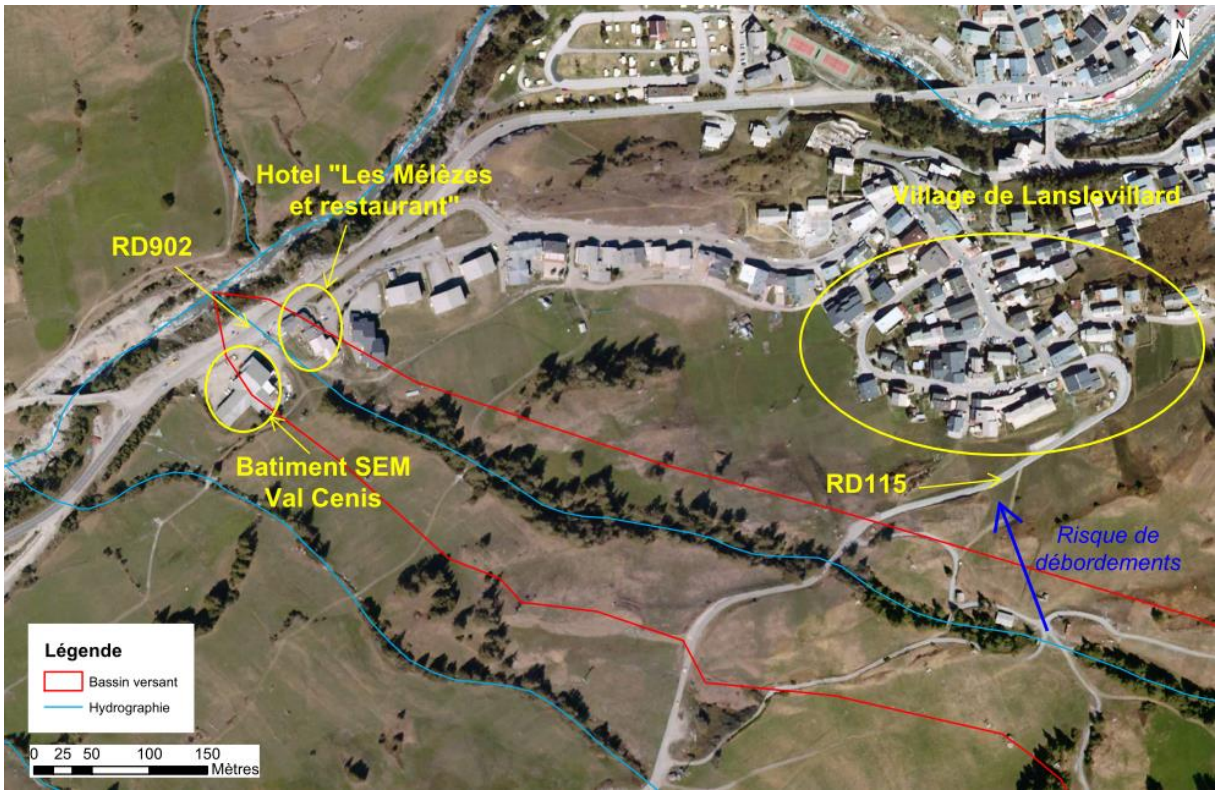



**Figure 2 : Enjeux**

Sur le bassin versant, les enjeux sont secondaires : pistes de ski, radier de la piste forestière « route du Chatel » (cote 1695 m).

# I.3 Objectifs

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Décrire et analyser le fonctionnement torrentiel de l'Arcelle ;
- Définir l'évènement de référence à prendre en compte pour le dimensionnement des aménagements ;
- Analyser les conditions d'écoulements et identifier les risques de débordements ;
- Proposer des stratégies d'aménagement et différentes solutions de protection ;
- Implanter, dimensionner et chiffrer ces solutions techniques proposées ;
- Définir les contraintes règlementaires et procédures administratives associées à chacune d'elle.

# II Description du torrent de l'Arcelle et de son fonctionnement hydraulique

## II.1 Historique des évènements

**14/08/2015 :** Cet évènement est vraisemblablement le plus intense connu à ce jour sur le torrent de l'Arcelle. Le torrent a connu deux laves torrentielles successives (30 min d'intervalles). Le passage busé a rapidement été obstrué et les coulées se sont étalées sur le cône de déjection, pour un volume estimé entre 10 et 15 000 m³. Les écoulements se sont propagés sur la RD1006 en aval du rond-point et ont traversé l'Arc par le pont du hameau des Champs (commune de Lanslebourg). Une personne à proximité a créé, à la pelle mécanique, un merlon d'urgence redirigeant les écoulements vers l'Arc.

Aucune victime ni blessé n'est à déplorer mais le bilan matériel est lourd :

- Bâtiment de la SEM Val Cenis : ils ont été traversés par la coulée ; les dépôts accumulés varient entre 1 et 2,5 mètres. Les installations électriques, 9 dameuses, plusieurs motoneiges et véhicules sont submergés.
- Hôtel et restaurant en rive droite : cave inondée avec plus de 2 mètres de boue
- La route départementale a été coupée par la lave.
- Habitations : seule une habitation en cours de rénovation a été touchée par des infiltrations d'eau dans les parties basses. Des jardins ont été endommagés.

L'origine de la crue est à trouver dans deux glissements successifs au droit du glacier rocheux. L'épisode pluvieux précédant la crue n'a pas été exceptionnel. La canicule de l'été 2015 a accentué la fonte de la partie supérieure du glacier rocheux désolidarisant les matériaux. La poussée hydrostatique augmente dans les matériaux et l'épisode pluvieux vient augmenter cette pression entrainant alors la rupture. Au vu des volumes mis en mouvement et des fortes pentes, ces glissements se propagent rapidement en coulée boueuse.

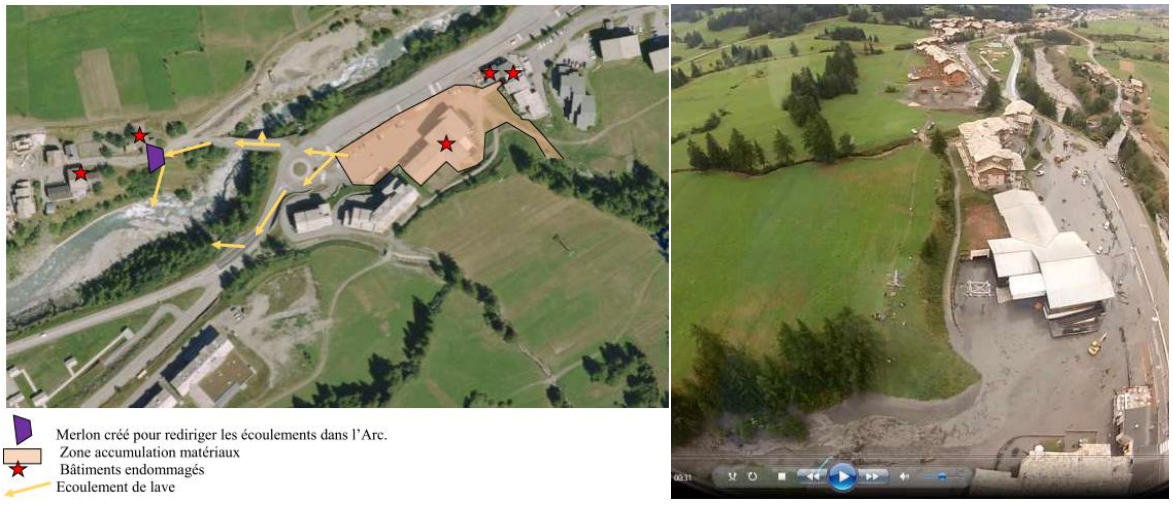



**Figure 3 : Vue aérienne des débordements**

**24/09/1993 et 1994 :** Ces évènements ont été évoqués lors d'échanges et rapports après la crue d'aout 2015. Des crues avec débordement se seraient produites. Toutefois, aucun document n'a été retrouvé dans les archives RTM. Ces dates correspondent aussi à celles des crues de l'Arc. Quid de réelles crues majeures sur l'Arcelle ?

**24/08/1987 :**

La buse en amont de la gare de la télécabine du Vieux Moulin a été obstruée et est à l'origine des débordements. Les arbres qui avaient été arrachés par l'avalanche à l'aval de la route

du Chatel en 1983, et accumulés en fond du lit ont été charriés et ont grandement contribué à cette obstruction suivie de débordements. (Sources : PPR, archives RTM)

**Avant 1987 :**

- Par le passé, une crue aurait atteint le village. Le débordement se serait produit vers la chapelle Saint Pierre. Au niveau de l'actuel passage St Pierre (piste de ski), il existe une possibilité d'obstruction du canal bétonné qui entrainerait alors un débordement similaire. (Source PPR)
- Le torrent de l'Arcelle a probablement connu d'autres crues marquantes. Toutefois, en l'absence du passage busé (construit en 1985), principal point noir de l'aménagement torrentiel, les dégâts ont dû être moindres (voire nuls ?).

# II.2 Analyse géomorphologique du torrent

La description géomorphologique est basée sur l'analyse conjointe des données suivantes :

- Carte géologique ;
- Profil en long ;
- Analyse terrain : parcours pédestre du lit du ruisseau de la confluence jusqu'à la Route du Chatel (octobre 2015), vidéo du survol hélicoptère des gorges et du bassin de réception (post crue, aout 2015), visite pédestre du glacier rocheux (post crue, aout 2015)

Ainsi, les deux sous paragraphes présentent seulement la carte géologique et le profil en long. Leur analyse est incluse à la description géomorphologique.

## II.2.1 Carte géologique

La carte géologique du bassin versant est présentée sur la figure suivante :

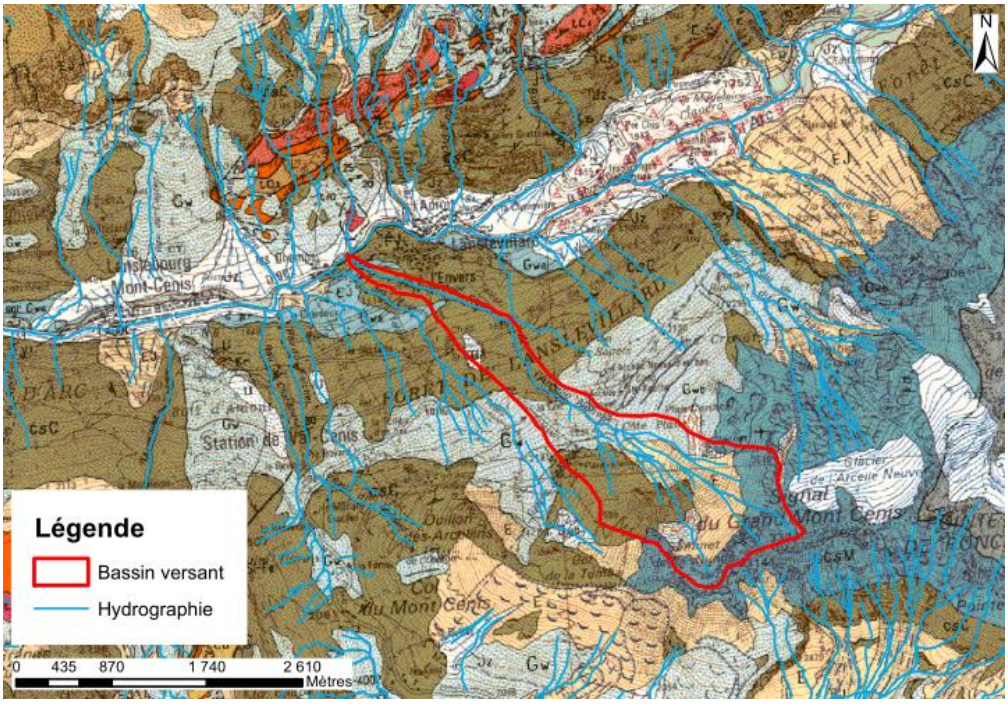



**Figure 4 : Carte géologique**

## II.2.2 Profil en long

Le profil en long du torrent est obtenu à partir de la couche « hydro » de la BD Topo de l'IGN ayant une propriété 3D. Il est présenté sur la figure suivante.

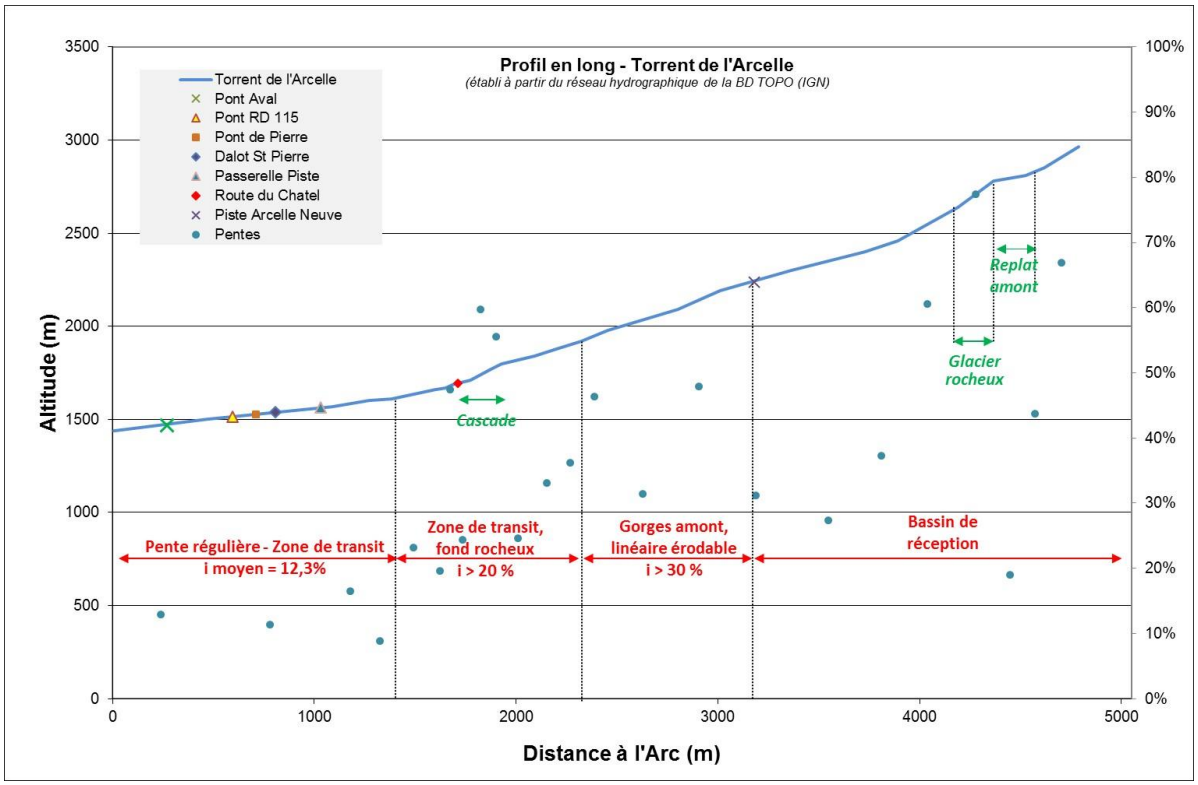



**Figure 5 : Profil en long général**

Dans le cadre de l'étude (pour l'étude des solutions de protection), un levé topographique du site a été réalisé de l'Arc, au premier pont aval lorsqu'on remonte le torrent. La pente en long depuis le pont jusqu'à la sortie aval de la buse est globalement régulière autour de la valeur moyenne 10,9 %. La différence avec les 12,3% moyens affichés sur le graphique précédent vient du tronçon considéré et de l'imprecision de la méthode utilisée dans la construction du profil en long à partir de la couche de la BD Topo de l'IGN.

Le profil en long relevé par le topographe est présenté sur la figure ci-dessous :

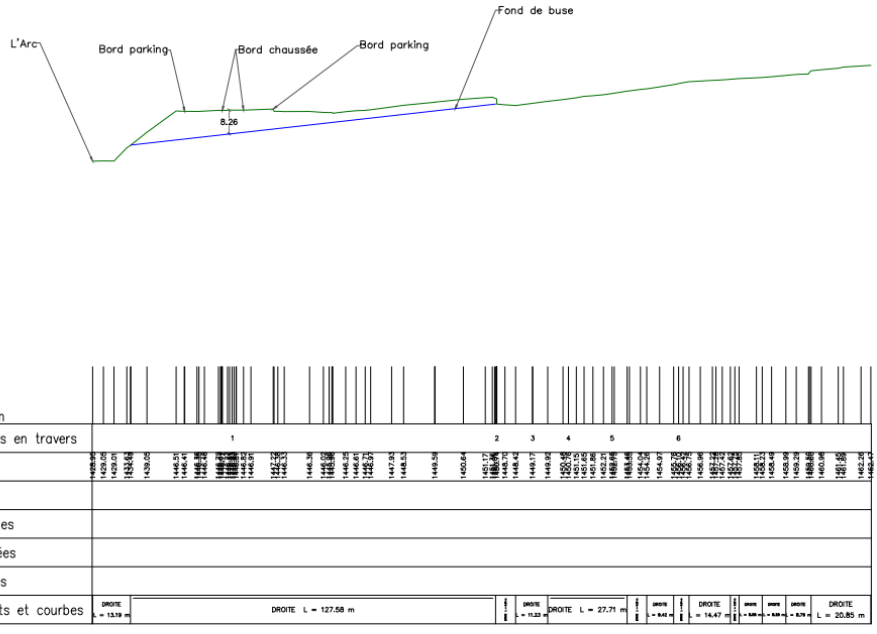



**Figure 6 : Profil en long (levé topo) du secteur aval**

## II.2.3 Description linéaire du torrent

***Bassin de réception :***

Le bassin versant est dominé par sa ligne de crête entre, du nord au sud, le Rocher de la Cailla, le Signal du Grand Mont Cenis, le col du Lou et le sommet de la Nunda. Ces crêtes sont taillées dans des roches du Crétacé supérieur, des marbres phylliteux.

L'érosion lente de cette partie sommitale a formé et continue d'abonder la zone d'éboulis formée en son pied. Sur ces éboulis, de multiples ravines se sont creusées afin de constituer le chevelu hydrologique drainant le bassin de réception. Ces ravines alimentent le torrent de l'Arcelle en matériaux.



**Figure 7 : Bassin de réception**

***Le glacier rocheux (dans le bassin de réception toujours) :***

Au sud-ouest de cette zone d'éboulis, toujours dans le bassin de réception, on note la présence remarquable d'un glacier rocheux actif. Il semble être à l'origine des coulées de lave du 14 Aout 2015. Avant cette date, son existence était vraisemblablement méconnue, ou du moins sa menace était sous-estimée.

L'altitude élevée du sommet du bassin versant (autour de 3000m) et son exposition au nord y rendent probable la présence de pergélisol (couche de terrain située sous la surface qui reste gelée toute l'année).

Dans nos massifs alpins, situé dans des zones de forte pente, le pergélisol est particulièrement soumis aux phénomènes gravitaires et peut se manifester par la présence de glaciers-rocheux. Ses derniers sont définis comme étant d'importantes masses de débris et de glace fluant. Ils sont repérables par leurs caractéristiques particulières : présences de rides et de sillons perpendiculaires à la direction d'écoulement, un front raide en partie terminale aval, et la racine en partie amont souvent difficile à délimiter, qui constitue la zone d'alimentation du glacier-rocheux.

Dans le cas du bassin versant de l'Arcelle, les indices géomorphologiques témoignent de la présence d'un glacier rocheux en contre bas du col du Lou. Il est délimité par un trait rouge sur la Figure 8.**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On repère en aval la présence de fronts (plus raide) laissant apparaitre une granulométrie plus fine mais aussi la présence de petites rides qui témoignent de l'activité (fluage) du glacier-rocheux. Sur l'orthophoto (campagne aérienne 2012) tiré de géoportail, on remarque en amont la présence relativement pérenne de névé, mélangé aux débris fournis par les parois rocheuses voisines, et qui par processus de néveification (compaction d'une couche de neige jusqu'à formation de glace) alimente le glacier-rocheux.

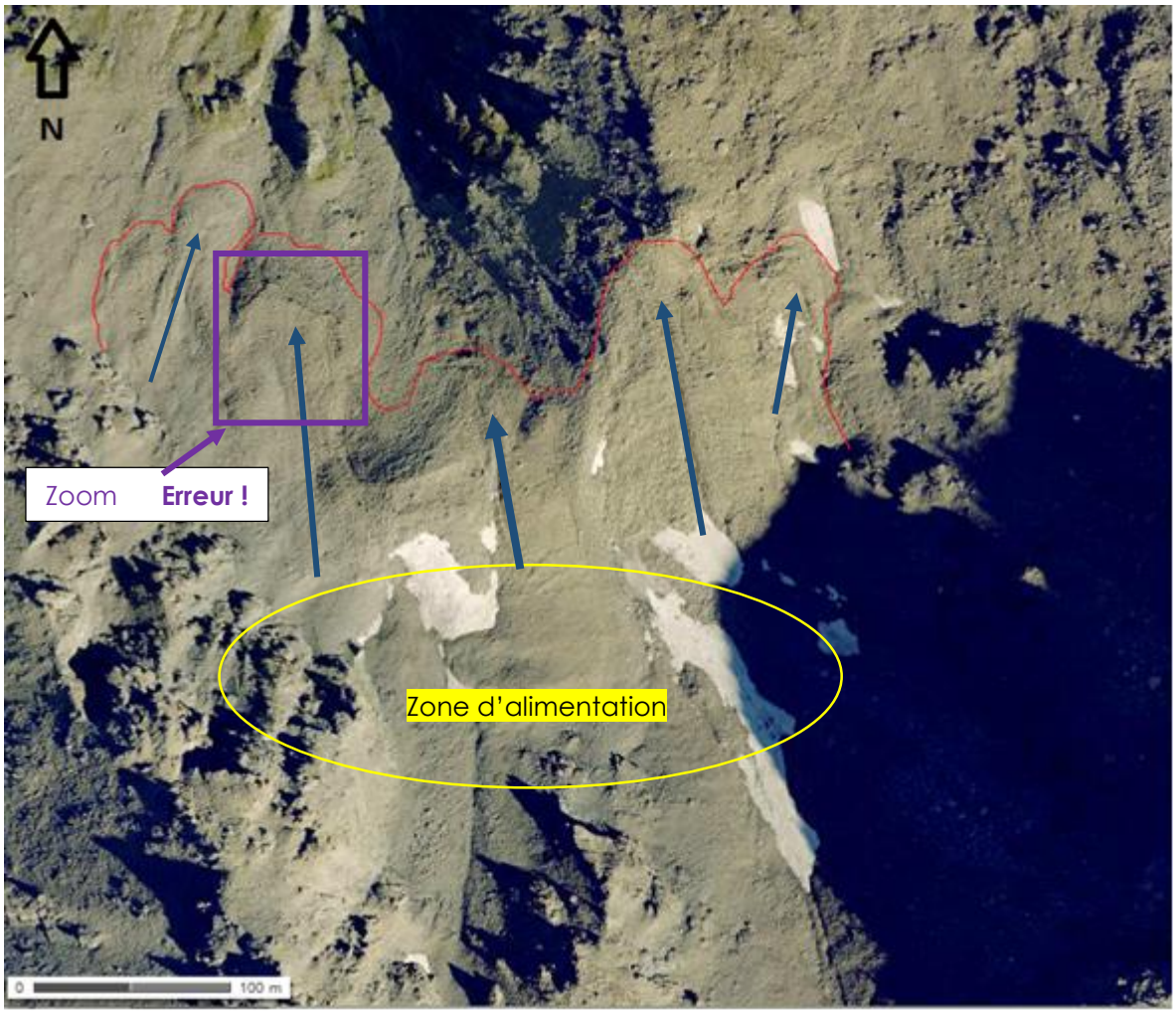



**Figure 8 -Glacier-rocheux versant nord du col du Lou. En rouge, limite aval du glacier rocheux. En jaune, zone d'alimentation (glace + débris). Flèches en bleu, direction d'écoulement du Glacier-Rocheux. (source : Géoportail)**

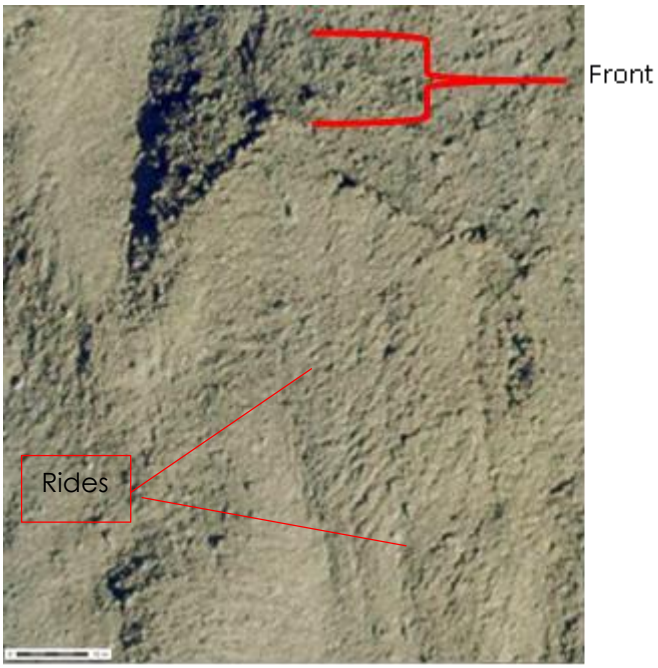



**Figure 9 - Zoom sur le front du glacier rocheux avec la présence de rides témoignant de l'activité de celui-ci. (Source : *Géoportail*)**



**Figure 10 : Glacier rocheux, avec départ des coulées du 14/08/2015 - vues de l'amont et de l'aval**

***Amont des gorges amont, creusées dans des terrains morainiques***

La confluence de toutes les ravines s'effectue légèrement en aval de la piste de l'Arcelle, à la cote approximative de 2230 m. Avant l'entrée en gorges, ces terrains fragiles ont été incisés au passage de la lave, mais l'incision reste « raisonnable ». La faible hauteur de berges limite aussi ces apports.



**Figure 11 : Amont de l'entrée des gorges : terrains morainiques incisés**

Le torrent entre ensuite dans les gorges de l'Arcelle. Entre les cotes 2300 (amont de la confluence) et 1920 m (dans les gorges), soit sur environ 850 m linéaires, le torrent s'est creusé sur des terrains morainiques (Gw). Toutefois, de l'analyse de la vidéo du survol du bassin versant, une fois engagé dans les gorges, le torrent a soit mis à jour le fond rocheux, soit reste pavé par de gros blocs. L'alimentation du torrent s'effectue donc essentiellement latéralement : par chutes de blocs (gros volume parfois) et par glissements et ravinement de berges, elles, toujours morainiques. Ces matériaux s'accumulent au fond du lit et sont repris par les crues.

L'analyse du profil en long confirme également une incision du lit stabilisée : le profil est régulier jusqu'à atteindre un point dur à l'aval : le fond des gorges plus à l'aval, qui sont, elles, clairement sur fond rocheux.




**Figure 12 : Tronçon amont des gorges et apports latéraux**

***Gorges rocheuses de l'Arcelle :***

Sous la cote 2000 m, la formation géologique change : le torrent a mis à jour le socle rocheux constitué de calcschistes et de marbres impurs. Cette formation géologique sera rencontrée jusqu'au cône de déjection, avec la présence proche du rocher tout du long, et quasi constamment apparent.

A l'amont de la piste forestière de l'Arcelle (cote 2231 m), le torrent a creusé un court linéaire en cascade. Dans ces gorges rocheuses, le fond est dur par définition, Aucune incision n'y est donc à craindre. Des chutes de blocs ou des délitements de berges schisteuses peuvent alimenter latéralement le torrent. Ces apports restent toutefois très faibles lors d'un évènement, par comparaison au volume pouvant venir de l'amont. Le fonctionnement de ce tronçon à

forte pente (supérieure à 20%) et à fond rocheux reste essentiellement celui d'une zone de transit.

A l'aval de la cascade, le torrent est toujours encaissé et le fond rocheux reste apparent. La pente diminue à environ 20 %, mais l'étroitesse du lit, le fond rocheux très lisse et cette pente suffisamment élevée pour un transit de lave, ne permettent pas l'arrêt et le dépôt de matériaux au fond du lit.

La lave du 14 aout 2015 a toutefois laissé des traces de boues et quelques matériaux latéralement, ces matériaux seront repris au fil des prochaines crues (charriage ou lave).




**Figure 13 : (g) Transition gorges amont et gorges aval rocheuses - (d) Gorges rocheuses avec traversée de la route du Chatel au milieu**




**Figure 14 : Fond rocheux et traces de lave à l'aval des gorges (altitude : 1650 m env.)**

***De la sortie des gorges au dalot de la piste St Pierre***

La réduction de pente amorcée à l'aval de la cascade devient plus marquée autour de la cote 1600 – 1650 m et le lit du torrent s'élargit également quelque peu. A la faveur de ces évolutions, les crues déposent des matériaux.



**Figure 15 : Elargissement du lit et dépôts de la lave du 14/08/2015**

Les deux laves du 14 aout ont déposé une quantité non négligeable de matériaux. Ces dépôts se sont faits au fond du lit, sur quelques étalements latéraux et sur des bourrelets de lave avec arrêt d'embâcles et de gros blocs. Un gros dépôt s'est formé à l'aval immédiat de la passerelle ski (cote 1560 m), après le blocage successif de deux gros embâcles derrière des arbres. Un volume important de gros blocs et de bois a ainsi pu être arrêté.



**Figure 16 : Dépôts latéraux par étalement et sur bourrelets à l'amont de la passerelle de ski**



**Figure 17 : Deux embacles successifs et blocage de matériaux**



**Figure 18 : Passerelle de ski**

De l'aval de la passerelle de ski, au gabarit généreux, jusqu'au dalot de la piste St Pierre (cote 1540 m), la pente s'est stabilisée. Des dépôts sont encore observés en fond de lit et latéralement mais ils restent moins conséquents qu'à l'amont. Le fond rocheux fait des apparitions locales entre les dépôts. Par ailleurs, les berges sont érodables. Toutefois, d'une part, elles sont beaucoup moins raides et le lit est plus large et d'autre part, le rocher est parfois apparent. Cette érosion reste donc peu marquée mais elle suffit à déchausser des arbres.




**Figure 19 : Linéaire entre la passerelle ski et le dalot de la piste St Pierre**

Au niveau de la piste Saint Pierre, le torrent transite dans un dalot de dimensions L. 3,80 m x H. 2,0 m. Un entonnement bétonné existe au niveau des berges. Son obstruction par embâcles (couvert forestier amont et embâcles 2015 témoins à l'amont) ou par matériaux et gros blocs est possible. Le cas échéant, les débordements s'écoulent vers la rive droite et menacent d'abord un premier bâtiment de la station de ski avec des installations électriques au niveau inférieur, puis menacent de plonger et d'atteindre directement la RD115 et le village de Lanslevillard.

Des traces des coulées d'aout 2015 témoignent d'un écoulement à plein bord. La non-obstruction de l'ouvrage lors de cet évènement est étonnante. Les embâcles et les gros blocs stockés plus haut auraient vraisemblablement occasionné cette obstruction et des débordements vers le village de Lanslevillard. Ce point de débordement sera abordé dans l'analyse des conditions d'écoulements.

Des crues sous forme de charriage peuvent suffire à obstruer l'ouvrage. Ce fut le cas en 1987 avec formation d'embâcles en entrée du dalot.




**Figure 20 : Dalot St Pierre et risques de débordements**

***Du dalot de la piste St Pierre au passage busé :***

A partir de la passerelle Saint Pierre, le torrent de l'Arcelle redevient plus étroit et le fond rocheux est apparent tout le long. Le fonctionnement torrentiel de ce tronçon est celui d'une zone de transit.

La crue de 2015 a laissé des traces latéralement. Ces dépôts restent minimes et ne restent que du « tapissage » de berges.




**Figure 21 : Linéaire entre le dalot de la piste Saint Pierre et le pont de la RD115**




**Figure 22 : Linéaire à l'aval de la RD115**

A la sortie de la forêt, on ne retrouve plus le fond rocheux sur la cinquantaine de mètres précédant le passage busé. Le torrent est donc ensuite busé sur près de 150 mètres jusqu'à l'Arc.




**Figure 23 : Linéaire du pont aval au passage busé**

Le risque d'obstruction en entrée du passage busé (Φ2000) est inéluctable pour une coulée boueuse, et très probable pour une crue à fort charriage au vu du risque de formation d'embâcles. Notons que la grille détruite en aout 2015 a récemment été remise en œuvre, comme préconisé après la crue. Dans l'attente de nouvel aménagement, elle permet en cas de nouvelle crue, l'obstruction de la buse en entrée plutôt qu'au cœur de l'ouvrage. La remise des eaux dans la buse est alors possible rapidement après l'évènement, et la gestion de crise est simplifiée.

La pente en long du pont amont jusqu'à la sortie de la buse varie très peu autour de sa valeur moyenne de 10,9% (cf. profil en long issu du levé topographique). L'obstruction de la buse est ici uniquement due à une section hydraulique beaucoup trop contrainte.

***Confluence avec l'Arc :***

La sortie de la buse se situe environ 3 mètres au-dessus du fond du lit. Le tronçon de l'Arc à la confluence est très encaissé et sur fond rocheux. Il n'y a pas de risque de dépôts régressifs dans la buse.

L'Arc y est capable d'accueillir les matériaux charriés par l'Arcelle et de les évacuer rapidement. Dans le cadre des travaux d'urgence suite à la crue d'aout 2015, les matériaux ont été remis à l'Arc sur la berge rive droite à l'aval de la confluence. Dès lors que les matériaux arrivent au fond du lit, ils sont immédiatement remobilisés.




**Figure 24 : Confluence : buse perchée et Arc profond sur fond rocheux**

# III Analyse et définition de l'évènement de référence

## III.1 Sources d'apports solides

La principale problématique du torrent de l'Arcelle est celle du transport solide, comme sur de très nombreux torrents de montagne. Les sources d'apports solides du torrent, déjà évoquées, dans la description linéaire du torrent, sont rappelées dans ce paragraphe.

### III.1.1 Erosion linéaire

***Bassin de réception, ravines en érosion :***

Les multiples ravines creusées dans l'éboulis en sommet de bassin versant ou encore dans la couche supérieure du glacier rocheux alimentent le torrent en matériaux. Un orage violent en sommet de bassin versant est capable de remobiliser d'importantes quantités de matériaux sur ces fortes pentes.

***Du bassin de réception à la sortie des gorges :***

Après confluence de toutes les ravines drainant le bassin de réception, le torrent s'écoule sur des terrains morainiques érodables.

Avant l'entrée en gorges, le profil en long est globalement stabilisé, ce qui limite l'incision. Les berges sont érodables, mais leur faible hauteur limite aussi cette érosion. Des apports solides sont donc attendus sur ce linéaire, mais à plus petite échelle qu'un glissement amont dans le glacier rocheux.

Dans les gorges, le torrent est alimenté par des chutes de blocs sur le linéaire à fond rocheux, et par des ravinements, des petits glissements de berges et des chutes de blocs sur la partie amont des gorges.

***Aval des gorges jusqu'au cône de déjection :***

Depuis la sortie aval des gorges, quelques secteurs localisés présentent des berges érodables, notamment à l'aval de la passerelle de ski. Cette contribution reste faible.

Par ailleurs, la lave de 2015 a déposé des volumes importants de matériaux entre la sortie des gorges et le dalot Saint Pierre. Les futures crues, même liquide, sont susceptibles de se charger abondamment en matériaux sur ce linéaire. Ces apports ne sont pas à négliger.

Les matériaux déposés entre le dalot Saint Pierre et le passage busé sont quant à eux bien moindres, mais restent remobilisables.

### III.1.2 Glissement au sein du glacier rocheux

Au-delà de l'érosion de surface du glacier rocheux, ce dernier est susceptible d'apporter des volumes conséquents par « glissement », comme ce fut le cas en 2015. La fonte des terrains gelés, accélérée par la canicule de l'été 2015, génère des pressions dans les matériaux (poussée hydrostatique) jusqu'à atteindre un état de rupture. Un volume important de matériaux est alors libéré et se met en mouvement jusqu'à former une coulée boueuse.

De l'observation visuelle du glacier, les glissements de 2015 ont déstabilisé les terrains autour. D'autres mouvements peuvent donc être attendus. Par ailleurs, l'épisode 2015 a montré l'activité de ce glacier rocheux. Des évènements du même type sont alors possibles.

La question du volume encore disponible, et surtout du volume pouvant être libéré en un seul évènement se pose : un volume bien plus conséquent que les 10 -15 000 m³ de 2015 peut-il être libérer en une seule fois ? Une étude est en cours de réalisation par XXX afin d'apporter un maximum d'éléments de connaissance sur ce glacier rocheux.

### III.1.3 Apports de flottants et risque d'embâcles

Depuis l'aval de la piste forestière (cote 2200), les berges du torrent sont boisées. L'historique des crues suffit à montrer l'importance des flottants dans le fonctionnement torrentiel de l'Arcelle :

- 2015 : bien que peu de flottants aient été retrouvés sur la zone de débordement, d'importants bois (troncs entiers) ont été repérés lors du parcours pédestre du linéaire du torrent. Deux gros embâcles se sont formés en amont de la passerelle de ski et ont retenu d'importantes quantités de matériaux. Enfin, des arbres sont encore présents en travers du torrent et d'autres se retrouvent sous cavés après le passage de la lave.
- 1987 : L'obstruction du passage busé par des flottants a entrainé des débordements.

Le risque d'avalanche est avéré sur ce torrent, comme le montre l'extrait du PPR ci-dessous. Les arbres apportés par l'avalanche peuvent, comme en 1987, obstruer la buse aval. Avant cela, ils peuvent aussi générer l'obstruction du dalot St Pierre et engendrer des débordements vers le village de Lanslevillard. Les écoulements suivraient alors la topographie naturelle du site i.e. la même direction que celle de l'avalanche. Ce point sera détaillé par la suite.

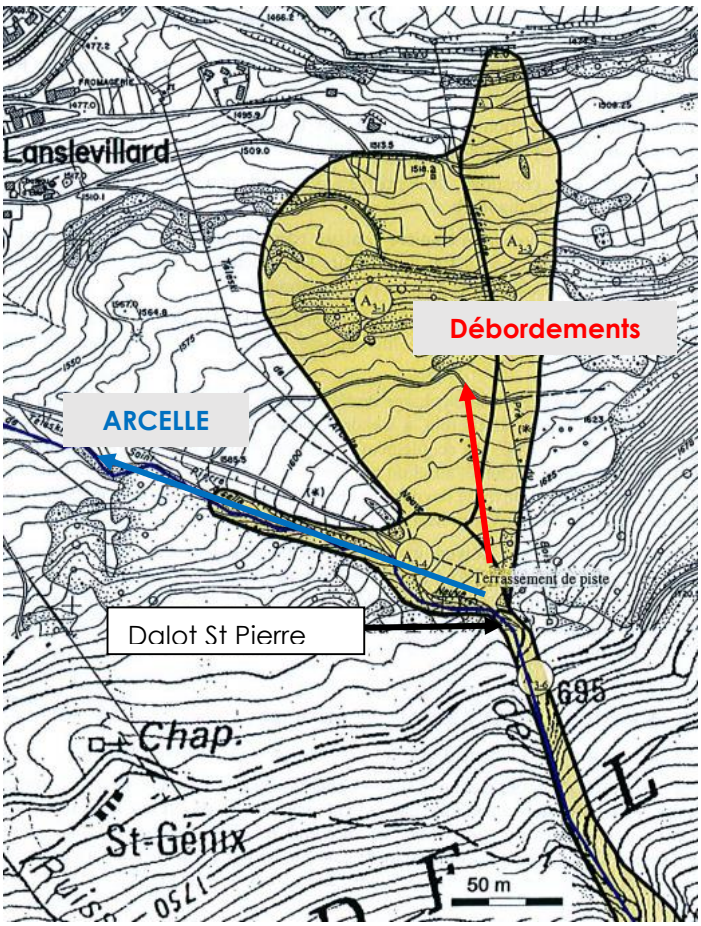



**Figure 25 : Cartographie de l'aléa avalanche (PPR) et apports de flottants associés.**

Ainsi, le risque d'embâcles est élevé. Il est à prendre en considération dans l'analyse des conditions d'écoulements.

## III.2 Type d'écoulement

### III.2.1 Forme des crues à la traversée du cône de déjection

En 2015, la crue s'est écoulée sous forme de lave torrentielle et celle-ci était déjà formée dès le sommet du bassin de réception. Ces laves sont le résultat de la propagation de glissements depuis le glacier rocheux.

Jusqu'à 2015, il n'est pas certain que le torrent se soit déjà manifesté sous forme de coulée boueuse. Cependant, plusieurs crues sous forme de charriage, déjà dommageables, ont déjà été recensées. Notons qu'avant 1985, le torrent franchissait le cône de déjection à ciel ouvert. L'absence du passage busé, point noir évident de l'aménagement torrentiel actuel, justifie probablement le peu d'évènements recensés ou entrés dans la mémoire des locaux. Des crues d'intensité notable ont très probablement transité sans débordement.

**Le torrent de l'Arcelle est donc un torrent mixte. Restant le type d'écoulement le plus dommageable, l'évènement de référence sur le torrent de l'Arcelle est une crue sous forme de lave torrentielle.**

### III.2.2 Formation du phénomène de référence

L'évènement de 2015 l'a montré : un glissement au sein du glacier rocheux est susceptible de se propager sous forme de lave torrentielle jusqu'au cône de déjection.

Hormis le glacier rocheux, les autres zones d'apports sont essentiellement cantonnées en tête de bassin versant, et les ravines sont nombreuses. Au vu des pentes et des terrains, des petites coulées sont attendues sur ces ravines. La pente faiblit au pied de toutes les ravines pour atteindre la pente des gorges (encore élevée toutefois) ; les petites coulées peuvent s'y arrêter. Quoi qu'il en soit à l'amont, une fois engagée dans les gorges, une lave ne pourra plus se charger démesurément. Ainsi, la mobilisation d'une lave torrentielle majeure et sa propagation jusqu'à l'aval nécessiterait une quasi concomitance de multiples coulées d'intensité majeure sur quasi toutes les ravines. Mobiliser un volume tel qu'observé en 2015 par somme de coulées sur plusieurs ravines semble peu probable. Ainsi, dans le cas d'un orage violent sans glissement du glacier rocheux, un écoulement à fort charriage est plutôt probable.

Comme ce fut le cas en aout 2015, un orage peut être facteur déclenchant de glissements au sein du glacier rocheux. Cet apport en eau est même vraisemblablement nécessaire à créer une « sur »-pression hydrostatique à l'origine de la rupture. En 2015, l'orage n'a pas été intense, ce qui s'est traduit par une très faible érosion des autres ravines (voire nulle). En cas d'orage violent, la concomitance d'apports depuis les ravines et depuis le glacier ne peut être exclue.

**Ainsi, le scénario de référence retenu (période de retour proche du siècle) est celui d'une lave torrentielle issue d'un glissement au sein du glacier rocheux et rechargée par les apports provenant des multiples ravines du bassin de réception.**

## III.3 Analyse hydrologique : estimation des débits liquides

Etant donné que le phénomène de référence retenu pour le torrent de l'Arcelle est un écoulement sous forme de lave torrentielle, les débits liquides sont des éléments de connaissances secondaires. Ils ne serviront en effet pas au dimensionnement hydraulique d'aménagement. Les hauteurs d'écoulement de lave seront bien plus importantes que ce que pourraient être une hauteur d'eau d'une crue centennale.

L'analyse hydrologique détaillée est présentée en annexe de ce rapport.

On retient les débits liquides de références suivants :

| Période de retour | Débits (m³/s) |
|---|---|
| 10 ans | 5 m³/s |
| 100 ans | 11,5 m³/s |

Les débits présentés dans l'étude SAGE de 2006 nous paraissent élevés. Ils étaient respectivement de 6,3 m³/s pour le débit décennal et de 16,3 m³/s pour le débit centennal. Ces valeurs conduisent à des débits pseudo-spécifiques (i.e. rapportés à une surface) très élevés.

# III.4 Estimation des volumes d'apports de matériaux

Dans ce paragraphe, différentes méthodes d'estimation sont présentées. Toutes ne peuvent pas conceptuellement représenter des apports provenant d'une érosion linéaire des ravines et d'apports par glissement depuis le glacier. Le dernier paragraphe de synthèse distinguera la représentation physique de chaque approche avant de déterminer le volume global de l'évènement de référence.

## III.4.1 Volume des crues historiques

La seule crue répertoriée pour laquelle nous disposons de donnée sur le volume de l'évènement est celle du 14 aout 2015.

Le volume de la crue ayant atteint le cône de déjection est de 10 à 15 000 m³.

Les matériaux mobilisés lors de cette crue provenaient de deux glissements sur le front du glacier rocheux et l'érosion des autres ravines était négligeable.

## III.4.2 Utilisation de méthodes de détermination de volume de laves

Les formules d'estimation de volumes de laves ont également été utilisées pour approcher les apports du bassin versant. Classés en trois classes suite à une étude paramétrique des différentes formules, les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| Méthode | Classe | Volume ($m^3$) | Variables utilisées |
|---|---|---|---|
| COURBE ENVELOPPE REGIONALISEE | V exceptionnel | **72000** | S |
| KRONFELLNER-KRAUS (1985) | V exceptionnel | **98000** | S, K, Im |
| RICKENMANN (1997) | V exceptionnel | **228000** | L, Ic |
| D'AGOSTINO (1996) | V(T≥100) | **60000** | S |
| D'AGOSTINO (1996) | V(T≥100) | **68000** | S, Im, IG |
| ZELLER (1976), c2=20 | V(T≥100) | **35000** | S, c2 |
| TAKEI (1980) | V(T≈100) | **26000** | S |
| ZELLER (1976), c2=6 | V(T=100) | **11000** | S, c2 |
| BROCHOT (1998) | V(T=100) | **#N/A** | Classe torrent |
| BROCHOT (2003) | V(T=100) | **16000** | S, Hmax, Hmin, IGM, SNV, P10-24h |

Les résultats assez dispersés rappellent la grande incertitude de ce genre d'estimation.

Néanmoins, il en ressort un volume d'apport centennal entre 10 et 25 000 m³.

Des volumes d'apports supérieurs à 30 000 m³ correspondraient à un évènement d'une période de retour supérieure à 100 ans.

## III.4.3 Méthode basée sur la géomorphologie

L'approche géomorphologique consiste à définir à dire d'expert un taux d'érosion linéique par tronçon homogène de torrent et de l'intégrer sur l'ensemble du réseau hydrographique afin d'estimer un volume total d'apports solides. Cette méthode d'évaluation correspond à l'approche de HUNGR (1984). Les taux d'érosion linéique moyens ont été déterminés à dire d'expert au vu de l'observation du terrain et de l'analyse géomorphologique présentée précédemment.

Les différents tronçons sont illustrés sur la figure suivante.

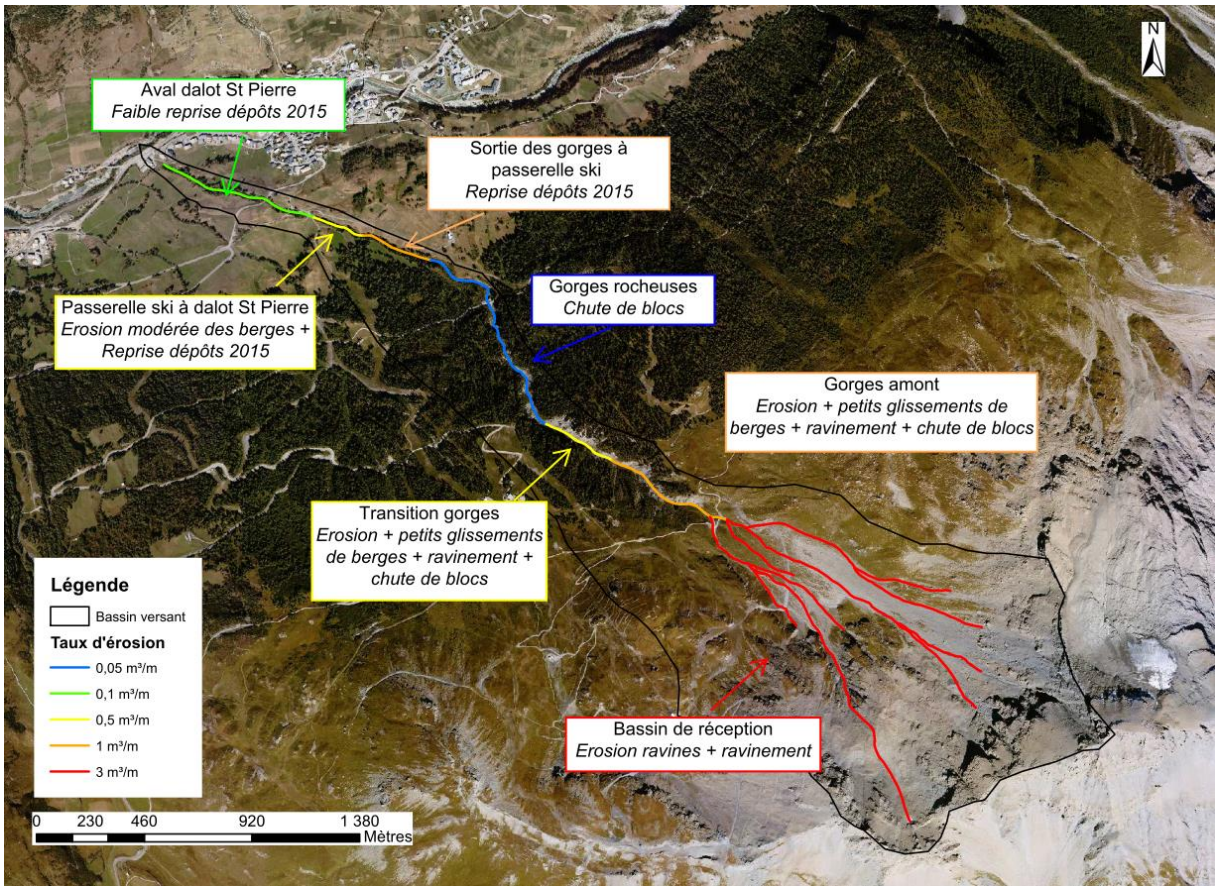



**Figure 26 : Tronçons homogènes et taux d'érosion linéique**

Par intégration, le volume d'apport est estimé à 20 000 m³. Conceptuellement, cette approche ne peut pas représenter l'apport d'un glissement depuis le glacier rocheux.

## III.4.4 Méthode hydrologique

Cette méthode s'applique uniquement aux apports provenant de l'érosion de ravines mais ne peut pas représenter le volume issu d'un glissement du glacier rocheux.

Nous admettons qu'il existe un lien entre le volume apporté et celui d'un ruissellement en eau claire. Il est alors considéré que le volume transporté à l'aval correspond à une remobilisation d'une surface en érosion par la lame d'eau précipitée. Evidemment, cette approche garde un caractère très réducteur donnant l'impression d'un déroulement très linéaire de l'érosion. En réalité, ces processus sont bien plus complexes et plus nombreux que le laissent présager ces hypothèses.

L'estimation est présentée dans le tableau suivant :

| Durée de l'orage D | 15 min | 20 min | 30 min |
|---|---|---|---|
| Surface en érosion active | 0,66 km² | 0,66 km² | 0,66 km² |
| Pluie centennale précipitée durant la durée D (calculée à partir des données pluvios) | 20,2 mm | 22,8 mm | 27,3 mm |
| Pertes initiales (fixée arbitrairement à 20% de la pluie) | 4,0 mm | 4,6 mm | 5,5 mm |
| Volume liquide contribuant à la formation de la coulée (m³) | 10 666 | 12 038 | 14 414 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Concentration solide | 20 % | 20 % | 20 % |
| Volume solide mobilisé (m³) | 2 666 | 3010 | 2544 |
| **Volume de la coulée (m³)** | **13 332 m³** | **15 048 m³** | **16958 m³** |

Par cette approche, on estime un volume d'apports probable de l'ordre de 15 000 m³.

## III.4.5 Méthode ECSTREM et abaques RTM

Les apports solides ont été déterminés à l'aide de la méthode ECSTReM[1] développée par les services RTM et le Cemagref [Peteuil et Liebault, 2011]. Le principe de la méthode repose sur l'exploitation statistique des données de curage de plus de quarante plages de dépôt gérées par les services RTM. Le quantile centennal de volume d'apport sédimentaire est modélisé avec deux variables explicatives, la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique, et la dénivelée entre le point culminant du bassin versant et la zone d'étude.

Des abaques RTM ont également été développés dans le cadre de la même étude. Ils constituent une approche du volume d'apports à partir de la surface du bassin versant et de la caractérisation de l'intensité des phénomènes érosifs.

La surface en érosion active connectée au réseau hydrographique a été déterminée à partir de l'analyse du site et de la carte géologique. Comme déjà identifié dans l'analyse géomorphologique, les surfaces en érosion se situent dans le bassin de réception et au début des gorges. On considère que les eaux précipitées lors de l'orage viennent se charger dans l'éboulis mais qu'au final, les apports directs provenant de la falaise lors d'un évènement sont négligeables. En ce sens, les falaises en partie sommitale du bassin versant ne sont pas incluses à la surface en érosion directement connectée au réseau hydrographique. La surface considérée est alors la suivante :

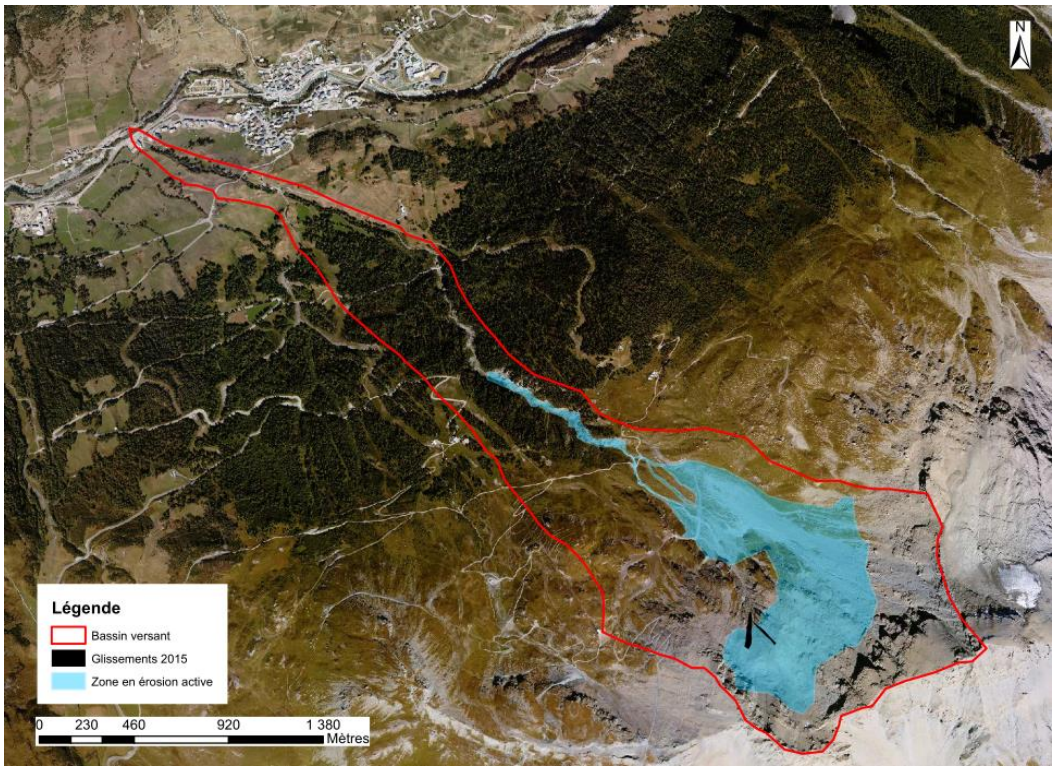



**Figure 27 : Zones en érosion active connectées au réseau hydrographique**

[1] Acronyme de **E**stimation de la **C**harge **S**édimentaire des **T**orrents par **Ré**gressions **M**ultivariées".

Pour l'application de la méthode, on retient un écoulement de type charriage et une érosion « modérée à forte », choix de paramètre restant sécuritaire.

Les résultats sont les suivants :

| Méthode | Variable | Estimation |
|---|---|---|
| Abaque RTM | V100 | 10 700 à 23 300 m³ |
| Méthode ECSTREM | V100 | 14 700 |
| | Intervalle de confiance à 90 % | [3000 ; 36 600] |

## III.4.6 Formules classiques de transport solide

Pour des crues sous forme de charriage, au vu du potentiel d'apport du bassin versant, le facteur limitant reste à priori la capacité de transport solide du torrent. Ainsi, le calcul de la capacité de transport permet d'approcher le volume apporté en crue.

De nombreuses formulations empiriques, issues de l'expérimentation en canal de laboratoire, ont été établies pour mettre en relation les différents paramètres explicatifs du transport solide (pente, débit liquide et débit solide, granulométrie des matériaux transportés). Elles expriment la capacité maximale de transport, qui peut être atteinte si aucune limitation due aux apports amont ou à la fourniture de sédiment par le lit n'est atteint, ce qui est le cas ici.

Ces formules sont très sensibles aux paramètres d'entrée : la forme de l'hydrogramme de crue liquide retenu (en particulier la durée de la crue) et surtout la pente d'équilibre mesurée dont l'estimation reste difficile.

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser deux formules adaptées au contexte torrentiel :

- La formule de Meunier (1988) : cette formule relie le débit solide au débit liquide en fonction de la pente.
- La formule de Lefort-Sogreah (1991) : formule à seuil, c'est-à-dire qui détermine un débit minimum au-delà duquel le transport devient possible. Elle fait intervenir des paramètres granulométriques ($d_{90}/d_{30}$, $d_{50}$) et la pente.

L'hydrogramme est construit par application de la méthode empirique proposée par Lavabre (1997). Le temps de montée est calculé de telle sorte que le volume de l'hydrogramme soit le même que l'hydrogramme calculé avec la méthode empirique proposée par le ministère de l'agriculture (1982). Pour cette méthode, la durée caractéristique est un paramètre important dans la construction l'hydrogramme de crue. Par conséquent, deux hydrogrammes de crue sont construits pour **deux durées caractéristiques de 1h et de 2h.**
La pente conditionnant les apports solides sur le cône de déjection est fixée à 11%. Au vu de la granulométrie observée, le diamètre moyen est fixé à 8 cm et le rapport d90/d30 est par défaut pris égal à 9. La granulométrie n'a pas été mesurée plus précisément.

Les deux hydrogrammes construits sont les suivants :

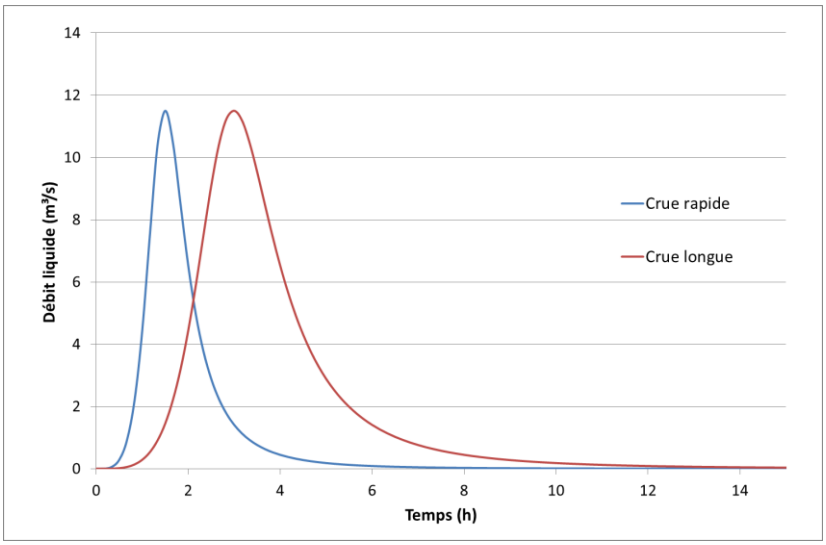



**Figure 28 : Hydrogrammes de crue liquide**

Les calculs de capacité maximale de transport solide donnent les résultats suivants :

| Méthode | Crue courte (1h) | Crue longue (2h) |
|---|---|---|
| Meunier | 5 210 m³ | 10 400 m³ |
| Lefort – Sogreah | 5 280 m³ | 10 600 m³ |
| **Valeur retenue** | **5 500 m³** | **11 000 m³** |

Ces résultats sont à considérer avec précaution. Les incertitudes sont nombreuses : incertitudes propres aux méthodes, limite de domaine de validité des formules (pour les pentes observées), hypothèse sur les durées de crues, incertitude sur l'hydrogramme construit à l'aide d'une méthode empirique (proposée par Lavabre, 1997). Ces estimations sont donc, au mieux, à considérer comme ordre de grandeur.

## III.4.7 Synthèse

Le tableau suivant rassemble les différentes estimations selon le processus de fournitures en matériaux qu'elles peuvent représenter. La concomitance des apports du glacier rocheux et de l'érosion de ravines étant retenu, le volume de référence sera à composer en sommant ces deux contributions.

L'approche historique, uniquement fondée sur la crue de 2015, ne considère que des apports provenant du glacier rocheux. Une expertise du glacier rocheux par un bureau spécialisée est en cours. Elle permettra probablement de quantifier le volume encore mobilisable au sein du glacier rocheux.

Plusieurs autres approches sont fondées sur des concepts physiques ne pouvant représenter que des apports provenant d'érosion de ravines.

Enfin, les estimations réalisées à partir d'approches déterministes (ECSTREM, abaques RTM et formules « classiquement » utilisées en ingénierie) ont volontairement été mise entre deux colonnes. Ces différentes formules ont été établies par calage de paramètres géomorphologiques réels (surface de bassin, dénivelée, surface en érosion, pluie,…) sur des bassins versants pour lesquels des données de volumes étaient existantes. Ainsi, les volumes considérés sont globaux et peuvent alors inclure, pour certains bassins versants de l'échantillon, des apports provenant de processus érosifs « classiques » et d'autres issus de glissements. Au contraire, les connaissances scientifiques sur les glaciers rocheux sont très récentes et les cas de glacier rocheux actifs pouvant alimenter les crues d'un torrent par glissement sont probablement peu nombreux. Ainsi, en l'absence de crue de ce type, ce type d'apports a très bien pu ne pas être rencontré dans les échantillons de torrent et de crues de calage.

| Méthode | Glissement au sein du glacier rocheux seul | Concomitance des deux formes d'apports (scénario retenu) | Erosion des ravines sans glissement au sein du glacier rocheux |
|---|---|---|---|
| Approche historique (lave 2015) | 10 – 15 000 m³ | | |
| Etude du glacier rocheux en cours | Attente des conclusions de l'étude | | |
| Approche hydrologique | | | 13 à 17 000 m³ |
| Formules de transport solide | | | 5 à 11 000 m³ |
| Approche géomorphologique | | | 20 000 m³ |
| Formules de détermination | | 11 à 26 000 m³ | |
| ECTREAM / Abaques RTM | | 10 à 25 000 m³ | |

Au vu de ces différents résultats, la crue de référence aura un volume de 15 000 m³ auxquels viendront s'ajouter les apports directs du glacier rocheux.

En se basant sur l'évènement de 2015, on retiendra alors le volume de référence suivant :

**V = 25 000 m³**

**Ce résultat sera à confronter aux conclusions de l'étude du glacier rocheux. Si celle-ci estime qu'un volume notablement supérieur aux 10 - 15 000 m³ peut être libéré par le glacier rocheux en un seul évènement, le volume de référence devra être revu à la hausse.**

## III.5 Synthèse : crue de référence

La crue de référence (période de retour proche du siècle) du torrent de l'Arcelle s'écoule sous forme de lave torrentielle sur le cône de déjection.

Elle est alimentée à la fois par l'érosion de ravines sur le bassin de réception et des apports provenant de glissements au sein du glacier rocheux.

Le volume centennal susceptible d'atteindre le cône de déjection est estimé à 25 000 m³. Toutefois, il pourrait être revu à la hausse selon les conclusions de l'expertise du glacier rocheux.

Toutefois, en l'absence de glissement sur le front du glacier rocheux, une crue intense, de période de retour également proche du siècle peut se manifester, et charrier un volume estimé à près de 15 000 m³. Dans le cadre des propositions de réduction du risque, le comportement des ouvrages soumis à une telle crue devra également être étudié.

# IV Analyse de l'aléa

## IV.1 Identification des points de débordements

Deux points de débordements sont identifiés, tous deux dus à des ouvrages hydrauliques à capacité insuffisante :

- Au droit du dalot Saint Pierre avec risque d'atteinte du village de Lanslevillard
- A l'entrée du passage busé avec étalement sur le cône de déjection (scénario 2015).

### • Débordement au droit du dalot St Pierre

Au droit de la piste St Pierre, le torrent transite dans un dalot de dimensions L. 3,8 m x H. 2,0 m. Cet ouvrage a été illustré en Figure 20.

Sa capacité hydraulique est jugée insuffisante et son risque d'obstruction par un front de lave ou par des embâcles lors de crues à charriage est fort. La présence de flottants déposés par la crue de 2015 sur le linéaire à l'amont immédiat, les berges boisées en amont et l'aléa avalancheux existant (susceptible de transporter des bois au fond du torrent) contribuent à ce risque élevé d'obstruction.

La crue du 14 aout 2015 s'est écoulée à plein bord avec mise en charge du dalot. Les laisses de crue en témoignent. La non-obstruction du dalot par l'une des deux coulées reste surprenante.

En cas d'obstruction, les débordements ont lieu vers la rive droite. Ils menacent directement le batiment en rive droite et ses installations électriques situées au niveau inférieur. Les débordements s'écouleront aussi le long de la pente douce mais descendante sur quelques dizaines de mètres avant de plonger directement vers le village de Lanslevillard.




**Figure 29 : Direction des débordements vers le bâtiment en rive droite et vers le village**

- **Débordement et étalement sur le cône de déjection**

Le torrent de l'Arcelle transite sur le cône de déjection à travers une buse de diamètre Φ2000. L'entrée en buse est équipée d'une grille qui permet d'arrêter les flottants. La grille a été détruite par la crue puis remise en œuvre.

Cet ouvrage n'est pas adapté au fonctionnement torrentiel de l'Arcelle : il ne permet pas le passage d'une lave et est directement obstrué par le front de lave. L'obstruction de la buse engendre des débordements et un étalement de la lave sur tout le cône de déjection. C'est le scénario du 14 aout 2015.

Les hauteurs de dépôts attendues sont importantes. En témoignent celles atteintes par l'évènement de 2015, pour rappelons le, un volume total de 10 – 15 000 m³, inférieur au volume de référence retenu.




**Figure 30 : Etalement de la lave de 2015 et hauteur de dépôts**

Pour l'évènement de référence, au volume total plus élevé, cela devrait se traduire par des hauteurs de dépôts plus importantes et une propagation plus lointaine sur la route et les parkings. Cette interpolation est à prendre avec précaution dans la mesure où les caractéristiques rhéologiques peuvent varier d'un évènement à l'autre. Rappelons le, la lave de 2015 était très fluide. Une lave plus visqueuse se traduit par une propagation moindre mais des hauteurs de dépôts plus élevées.

Une modélisation hydraulique de l'étalement de la lave sur le cône de déjection est présentée au paragraphe suivant afin d'appréhender plus finement ces débordements.

# IV.2 Analyse des conditions d'écoulements sur les tronçons « chenalisés »

## IV.2.1 Retour sur la crue du 14 aout 2015

Les seules données de hauteurs d'écoulement dont nous disposons sont celles de l'évènement de 2015.

**Section d'écoulement :**

La lave torrentielle était formée dès le glacier rocheux. Les sections d'écoulements observées dans le bassin de réception et à l'amont de l'apex du cône de déjection étaient sensiblement les mêmes, de l'ordre de 8 à 10 m² :

- Au droit du dalot Saint Pierre, la section était de 7,6 m² (plein bords).
- Dans le bassin de réception vers la cote 2200 m, la section était de 8 m²




**Figure 31 : Section d'écoulement de la crue du 14 aout 2015 vers la côte 2200 m**

**Comparaison à des méthodes d'estimation de débits :**

Selon un témoin de l'évènement, la lave aurait mis entre 15 et 25 min pour parcourir le linéaire de torrent entre la cote 2250 m et le cône de déjection.

Au vu de la distance parcourue et de la section identifiée précédemment, la vitesse de l'écoulement est estimée entre 2 et 3,5 m/s, ce qui donne un débit de lave entre 20 et 35 m³/s.

Pour un évènement de 15 000 m³, l'estimation du débit de lave boueuse selon Mizuyama (1992) est de 37 m³/s et l'application d'un hydrogramme triangulaire d'une durée de 15 à 20 min conduit à un débit de 25 à 33 m³/s. Ces données sont cohérentes avec les observations.

**Comparaison aux approches de Rickenmann :**

Rickenmann (1999) propose deux approches de caractérisation de l'écoulement des laves :

- 1ère approche : application de la formule de Manning-Strickler, avec un coefficient de rugosité entre 7 et 12 pour des laves boueuses

  Elle s'écrit : $V = Kl_{ave} \times R_h^{2/3} \times i^{1/2}$, avec V, vitesse moyenne en m/s ; Q, débit de pointe en m³/s ; i, pente du chenal en m/m et $R_h$, rayon hydraulique

- 2ème approche : celle-ci ne fait pas apparaitre de coefficient de rugosité.

  Elle s'écrit : $V = 2{,}1 \times Q^{1/3} \times i^{1/3}$.

Le débit estimé avec la 1ère approche est de 38 m³/s pour un coefficient fixé à K=8, ce qui est cohérent avec les estimations précédentes.

En considérant la première estimation de débit 2015 ($Q_{2015}$ = 20 à 35 m³/s), l'application de la seconde approche donne à l'aval une section d'écoulement entre 7 et 10,4 m², estimation encore une fois cohérente avec l'observation (entre 8 et 10 m²)

## IV.2.2 Estimation de la section d'écoulement de la crue de référence

Ce paragraphe est un préambule au dimensionnement d'un chenal d'écoulement sur le cône de déjection.

**Débit de lave**

Pour un évènement de 25 000 m³, le débit de lave selon la formule de Mizuyama est estimé à 56 m³/s. L'application d'un hydrogramme triangulaire d'une durée de 15 à 25 min donne un débit de pointe de 33 à 56 m³/s.

On retient donc un débit de l'ordre de 50 m³/s.

**Approches de Rickenmann, 1999 :**

Par application de la 2ème approche sur le cône de déjection, la section d'écoulement de la crue de référence est estimée à **14 m².**

Par application de la première approche sur le cône de déjection, on estime les conditions d'écoulement suivantes :

| Section | Trapézoïdale Base : 4m Fruit 1/1 | Rectangulaire Largeur 4 m | Rectangulaire Largeur 5 m |
|---|---|---|---|
| Coefficient de rugosité | | K=8 | |
| Pente | | 11% | |
| Hauteur d'écoulement | 2,36 m | 3,91 m | 3,05 m |
| Section | 15 m² | 15,6 m² | 15,3 m² |
| Vitesse | 3,3 m/s | 3,2 m/s | 3,3 m/s |

**Estimation de la hauteur par application du modèle de Herschel-Bulkley (Coussot, 1996) :**

L'annexe 4 présente une description des écoulements de type lave torrentielle et de la loi de comportement usuellement utilisée pour les représenter (modèle de Herschel-Bulkley).

Pour l'analyse hydraulique, les paramètres déterminants sont la contrainte seuil τc et le coefficient K dépendant de la nature des matériaux. A défaut d'analyse rhéologique, il est couramment fixé pour des laves torrentielles boueuses des rapports K/τc et τc/ μ et respectivement voisins de 0,3 et 1,5.

Les valeurs des paramètres rhéologiques jugées représentatives des écoulements de laves sont les suivantes :

- Contrainte seuil : 2 000 à 3 000 Pa ;
- Paramètre K du modèle de Herschel-Bulkley : 600 à 900 ;
- Masse volumique : 2 000 à 2 500kg/m³.

Afin de couvrir l'étendue de paramètres rhéologiques plausibles, les trois combinaisons de paramètres suivantes seront considérées:

- $\tau_c$ = 2000, *K* = 600, μ = 2000 kg/m³
- $\tau_c$ = 2500 et *K* = 750 et μ = 2000 kg/m³
- $\tau_c$ = 3000 et *K* = 900 et μ = 2200 kg/m³

Ces couples sont classés dans un ordre de viscosité croissante.

L'écoulement de 2015 a été relativement liquide, ce qui se traduirait par des conditions plus proches de l'estimation réalisée avec la première combinaison.

Le graphique suivant montre l'évolution de la hauteur de lave estimée suivant la pente, dans le cas d'un chenal rectangulaire de largeur 4 mètres.

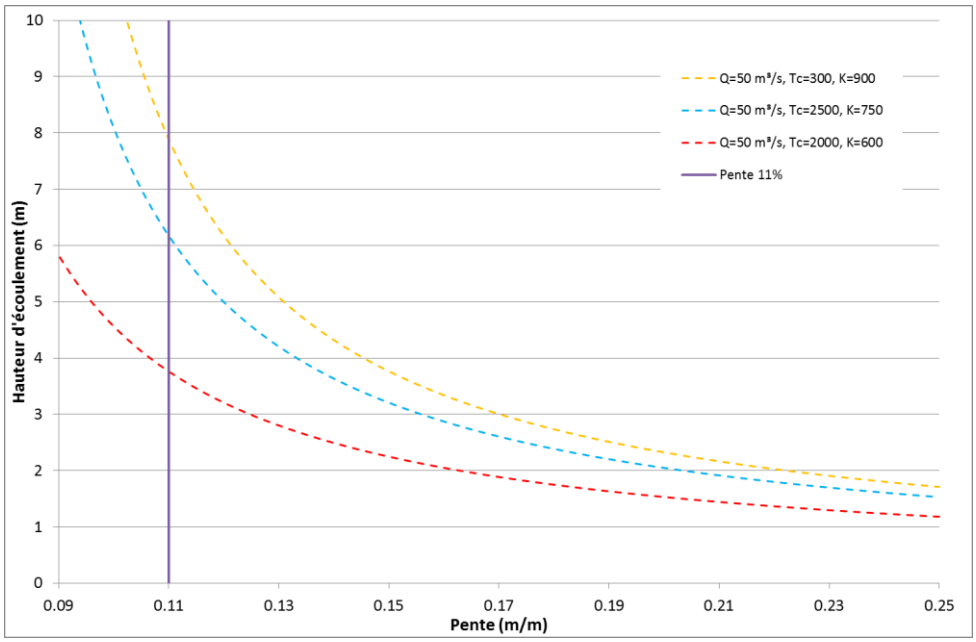



**Figure 32 : Hauteur d'écoulement dans un chenal rectangulaire de largeur 4 mètres**

Pour les trois géométries choisies précédemment, l'application du modèle d'Herschel-Bulkley donne les estimations suivantes, pour une pente de 11 % (pente actuelle).

| Section | Trapézoïdale Base : 4m Fruit 1/1 | Rectangulaire Largeur 4 m | Rectangulaire Largeur 5 m |
|---|---|---|---|
| $\tau_c$ = 2000, $K$ = 600 (type fluide) | S = 17,7 m² H = 2,66 m | S = 15,1 m² H = 3,8 m | S = 14,5 m² H = 2,9 m |
| $\tau_c$ = 2500 et $K$ = 750 | S = 24,2 m² H = 3,3 m | S = 24,7 m² H = 6,2 m | S = 21,1 m² H = 4,2 m |
| $\tau_c$ = 3000 et $K$ = 900 (type visqueux) | S = 27,47 m² H = 3,6 m | S = 31,5 m² H = 7,9 m | S = 25,1 m² H = 5,0 m |

Les résultats obtenus pour les conditions les plus fluides sont cohérentes avec l'approche de Rickenmann calée sur l'évènement de 2015. Ces conditions rhéologiques sont aussi cohérentes avec l'observation.

**Synthèse :**

Tout d'abord, rappelons que les estimations présentées précédemment sont le résultat d'application de modèles tentant d'appréhender un type d'écoulement complexe. Les incertitudes autour des valeurs présentées ne doivent pas être omises. D'autre part, les hauteurs estimées sont celles du corps de lave torrentielle, mais la hauteur du front de lave charriant embâcles et gros blocs est plus importante. Enfin, d'une lave à l'autre, les conditions rhéologiques peuvent varier. Ainsi, bien que les conditions les plus fluides ($\tau_c$ = 2000 ; $K$ = 600) semblent être une bonne approximation de l'évènement de 2015, nous n'excluons pas des rhéologies plus visqueuses pour des évènements futurs ($\tau_c$ = 2500 ; $K$ = 750).

Ainsi, on retient les deux sections types d'écoulements suivantes sur le cône de déjection pour une pente de 11%

- **Section trapézoïdale de base 4m, fruit 1/1 et hauteur 3,5 m**
- **Section rectangulaire : L.5 m x H. 4,5 m**

**Dans le cadre du dimensionnement d'un nouvel aménagement (chenal), ces dimensions pourront être adaptées selon d'éventuelles modifications de la pente en long.**

# IV.3 Modélisation 2D de l'étalement des laves sur le cône de déjection

## IV.3.1 Modèle utilisé

Le modèle LAVE2D, développé par IRSTEA a été utilisé pour simuler les écoulements de lave torrentielle boueuse. Le lecteur trouvera les informations complètes sur les équations mises en jeu dans ce modèle dans les travaux de Laigle (1998) et Laigle et al. (2003, 2010).

Ce modèle est fondé sur les équations de Saint-Venant associées à une loi de frottement déduite des travaux de Coussot (1996) et ne s'appliquant qu'aux écoulements de laves torrentielles boueuses décrites par une loi de comportement de type Herschel-Bulkley.

Ce modèle est applicable aux écoulements se produisant sur des cônes de déjection, lors de la phase d'étalement de la coulée. Il n'est normalement pas applicable aux canaux étroits. Ainsi, on prendra avec précaution les hauteurs d'écoulement estimée dans le torrent au lit étroit avant l'atteinte du cône de déjection.

De manière opérationnelle, le modèle calcule pour chaque maille et pour chaque pas de temps de calcul la hauteur de matériaux et la vitesse dans les deux composantes du plan. A l'issue de chaque simulation, il est donc possible d'établir une carte représentant les hauteurs maximales de matériaux atteintes dans chaque maille.

## IV.3.2 Données topographiques et maillage

Les données topographiques utilisées dans le modèle sont issues d'un assemblage du levé topographique pédestre réalisé dans le cadre de l'étude (octobre 2015) et d'un levé LIDAR réalisé en 2015 par le Syndicat des Pays de Maurienne (SPM) et mis à disposition à titre gracieux. Cet assemblage a permis de couvrir une zone de modélisation suffisamment large.

Il a été utilisé un maillage rectangulaire (forme imposée par lave 2D) comportant 33 858 mailles de taille unitaire 2 x 2 mètres.

L'emprise du modèle est identifiée en rouge sur la figure suivante :



**Figure 33 : Emprise de la modélisation**

La « dégradation » des données topographiques initiales pour atteindre la taille de maille de 2x2m reste tout à fait acceptable, comme illustré sur un profil en travers et un profil en long suivant (données initiales en marron, donnée dégradée en vert).

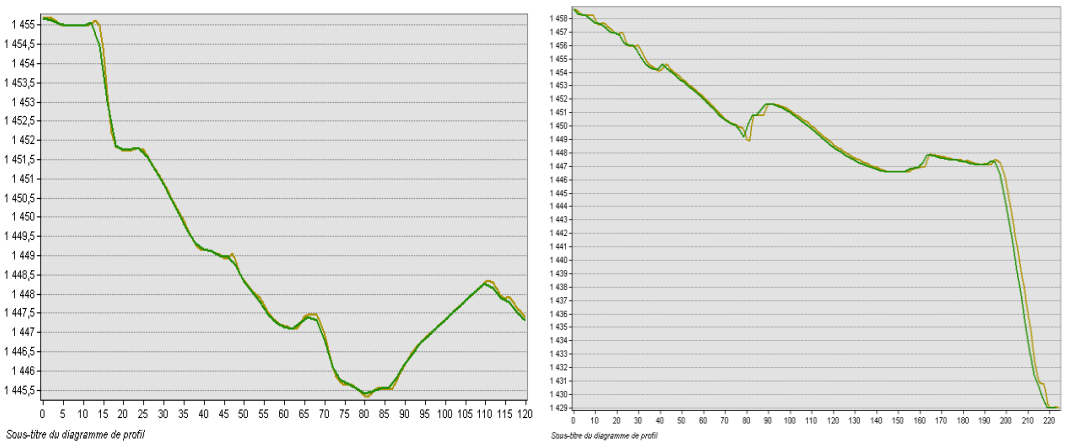



**Figure 34 : Dégradation acceptable des données topographiques pour la modélisation**

## IV.3.3 Reproduction de la crue du 14 Aout 2015

**Hydrogrammes d'injection**

Il a été utilisé un hydrogramme triangulaire, avec le débit de pointe observé au temps initial d'injection. Le débit de crue a été estimé au préalable dans l'étude. La durée de crue est ensuite calculée afin d'atteindre le volume de l'évènement. L'hydrogramme est alors le suivant :

- $Q_{pointe}$=Q(t=0)=30 m³/s
- Durée de la crue = 1000 s
- Volume de la crue = 15 000 m³

Il est décidé de ne pas faire varier les données d'injection pour ne pas complexifier l'interprétation des résultats.

**Paramètres rhéologiques et scénarios testés :**

Deux rapports de paramètres rhéologiques entrent en compte dans la modélisation :

- Rapport $\tau_c/\rho$, avec $\tau_c$ la contrainte seuil et ρ la masse volumique de la lave.
- Rapport K/ $\tau_c$. Il a été choisi de ne pas faire varier ce paramètre qui a une influence plus réduite par rapport à la contrainte seuil, et de choisir une valeur usuellement utilisée dans la littérature : K/ $\tau_c$= 0,3 $s^{1/3}$

Le deuxième rapport étant fixant, plusieurs valeurs du rapport sont simulées dans le but d'obtenir des résultats au plus près de ceux observés lors de la crue du 14 aout 2015.

**Résultats et observations :**

Les figures suivantes illustrent les résultats de 3 simulations effectuées pour des contraintes seuils décroissantes.

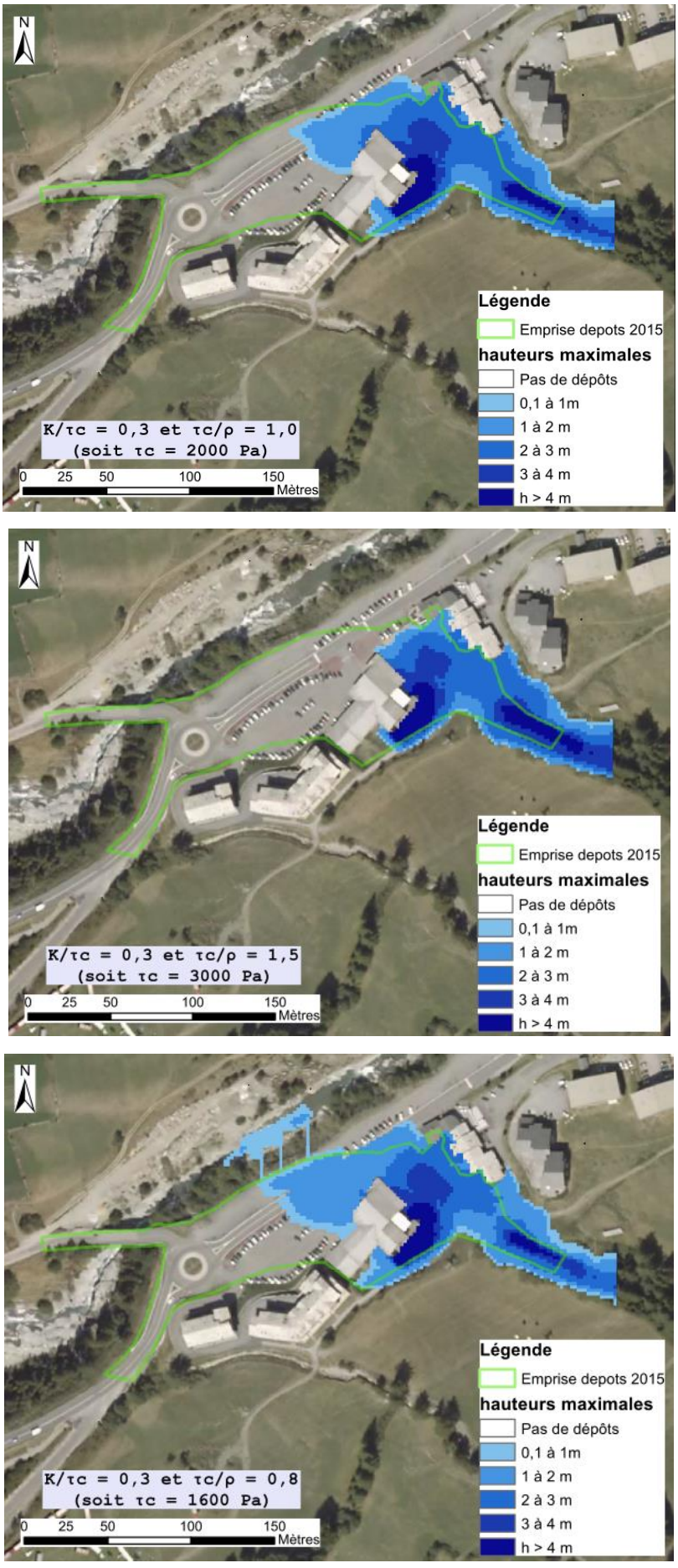



**Figure 35 : Hauteurs maximales modélisées - scénario 2015**

L'analyse des résultats conduit aux observations suivantes :

- La propagation des dépôts sur la route jusqu'à plusieurs mètres à l'aval du rond-point n'a pas pu être modélisée, même pour des conditions très fluides. Toutefois, les dépôts en 2015 y étaient en réalité très peu épais, et ont vraisemblablement été apportés par des écoulements liquides (pas de type lave) en fin d'évènement. Ce comportement ne peut pas être représenté par un modèle de fluide à seuil.
- Une contrainte seuil de 2000 Pa permet de se rapprocher au mieux de l'emprise de l'évènement de 2015 avec des valeurs de hauteurs de dépôts cohérentes. Cette valeur est celle d'une lave fluide, ce qui est cohérent avec l'observation.
- Pour cette valeur de contrainte de 2000 Pa, les hauteurs modélisées sont :
    - Entre 4,5 et 5 m contre la façade sud du bâtiment de la SEM, ce qui reste cohérent avec l'évènement ;
    - Entre 2 et 3 mètres sur la traversée du cône dans l'axe de la buse, légèrement supérieur à l'observation
- La pente des dépôts en amont de la buse est de 6,5 %, ce qui est aussi cohérent avec l'observation : la pente a été mesurée entre 3 et 4°, soit entre 5 et 7 %.

On retrouve ces résultats de hauteurs et de pente sur le profil en long suivant, établi dans l'axe du torrent et de la buse.

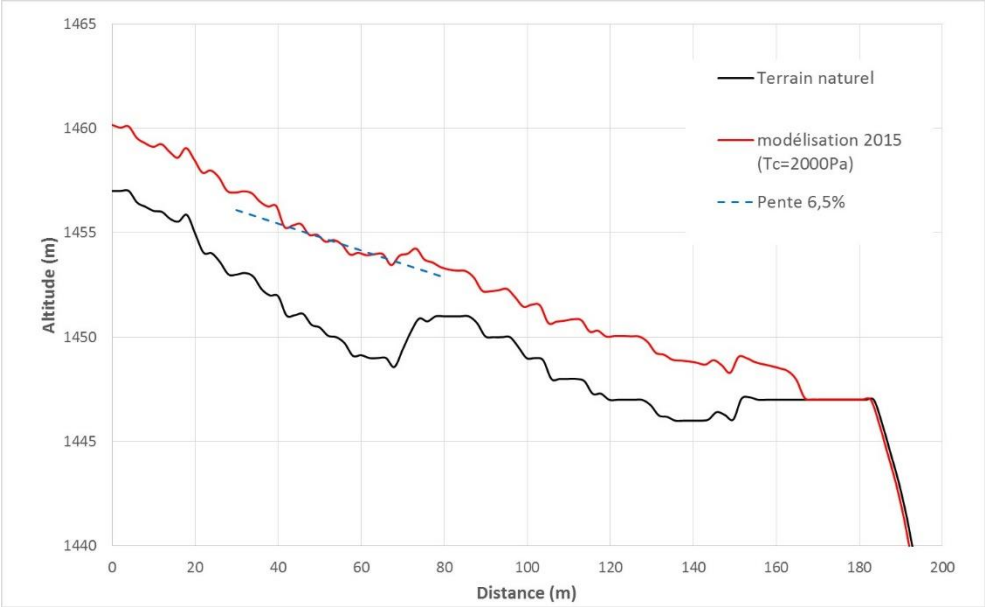



**Figure 36 : Profil des dépôts - scénario 2015, contrainte seuil 2000 Pa**

## IV.3.4 Modélisation de la crue de référence

***Hydrogrammes d'injection :***

La forme de l'hydrogramme modélisé est la même que celle choisie précédemment et les valeurs numériques sont adaptées à la crue de référence retenue :

- $Q_{pointe}$ = Q(t=0s) = 50 m³/s (cf. paragraphe IV.2.2)
- Volume de la crue = 25 000 m³
- Durée de la crue = 1000 s

***Paramètres rhéologiques et scénarios modélisés :***

L'observation de l'évènement de 2015 et sa reproduction sur modèle numérique ont montré que la lave torrentielle boueuse avait été très fluide.

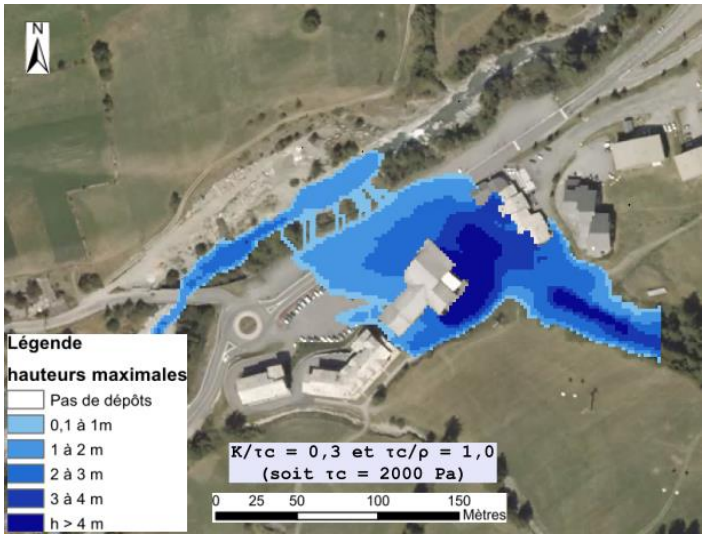
Une première modélisation s'attachera ainsi à modéliser la lave torrentielle de référence avec ces mêmes paramètres rhéologiques. Toutefois, d'un évènement à l'autre, les conditions rhéologiques peuvent varier. Ainsi, deux autres modélisations de la crue de référence seront réalisées pour des conditions plus visqueuses.

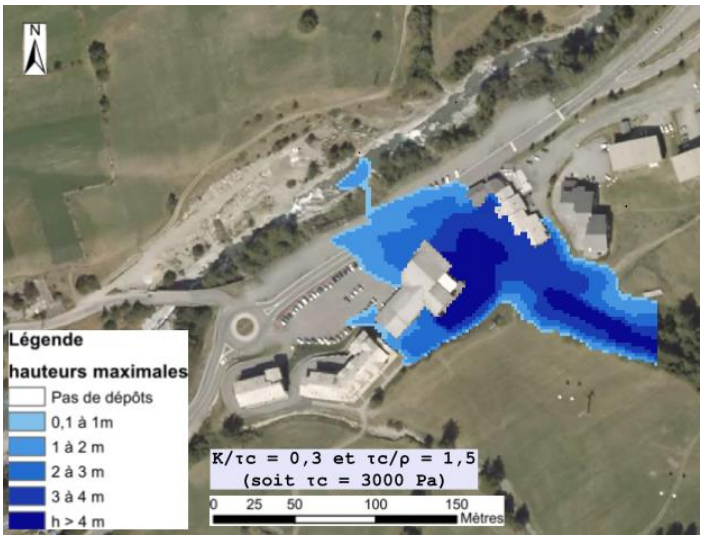
Les trois scénarios suivants sont modélisés :

| N° | Débit de pointe | Volume | $\tau_c/\rho$ ($m^2.s^{-2}$) | $K/\tau_c$ ($s^{1/3}$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 50 m³/s | 25 000 m³ | 1 *(soit $\tau_c$=2000 Pa)* | 0,3 |
| 2 | | | 1,5 *(soit $\tau_c$=3000 Pa)* | |
| 3 | | | 2 *(soit $\tau_c$=4000 Pa)* | |

***Résultats :***

Les hauteurs maximales atteintes sur le cône de déjection pour les trois scénarios testés sont représentées au travers des figures suivantes.



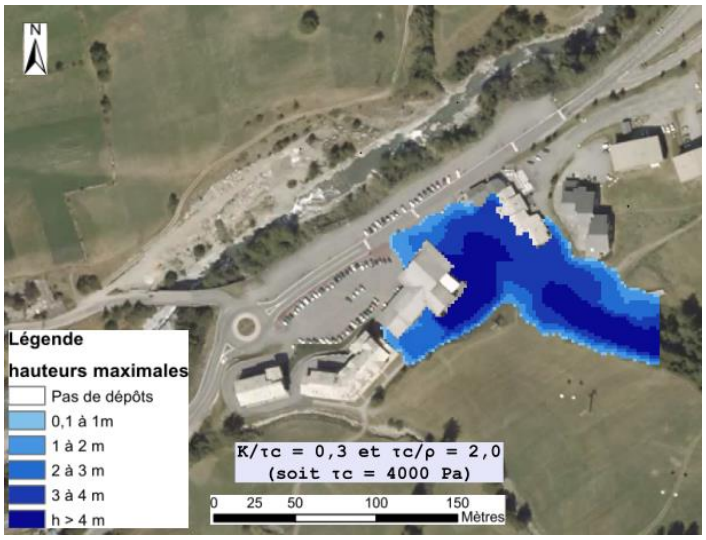



**Figure 37 : Hauteurs maximales modélisées pour la crue de référence**

Le profil en long dans l'axe de la buse est le suivant :

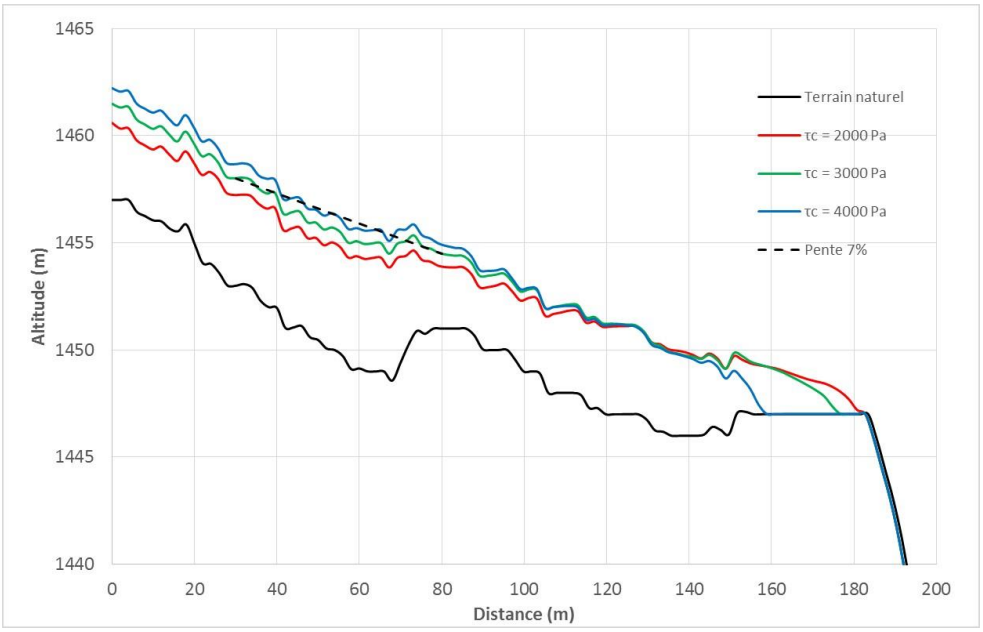



**Figure 38 : Profil de dépôts dans l'axe de la buse pour la crue de référence**

L'analyse des résultats conduit aux observations suivantes :

- Comparé à 2015, l'emprise de l'étalement de la lave torrentielle s'agrandit au niveau de la route et des parkings. Une des conséquences, non modélisée, est que les dépôts charriés par les écoulements liquides en fin de crue risquent de se propager plus à l'aval que 2015 par la voirie. D'autres enjeux peuvent alors être atteints. Toutefois, l'influence de l'augmentation du volume de la crue sur l'épaisseur des dépôts reste plus importante que sur l'emprise de l'étalement.
- Les hauteurs de dépôts attendues sont alors supérieures à celles observées en 2015. On note les valeurs suivantes :
    - Contre la façade sud des bâtiments de la SEM, une hauteur entre 6 et 6,5 mètres est attendue ;

- Devant les bâtiments de la SEM, les hauteurs de dépôts estimées avoisinent les 2,5 mètres.
- Devant l'hôtel des Mélèzes, les dépôts s'accumulent jusqu'à 3 – 3,5m. Notons toutefois qu'en ce point, la représentation de 2015 était déjà surévaluée.
- Les dépôts sur le parking en rive gauche de l'Arc sont de l'ordre du mètre. Une partie des écoulements atteint alors l'Arc.

# IV.4 Cas des crues à fort charriage

Dans le cas d'une crue à fort charriage, de période de retour proche du siècle, les risques de débordements au droit du dalot Saint Pierre et à l'entrée de la buse sur le cône de déjection sont avérés. En effet, ces deux ouvrages hydrauliques présentent un fort risque d'obstruction par des flottants charriés lors de ces crues à charriage. Le potentiel d'apports de flottants a déjà été mis en évidence : berges boisées et couloir d'avalanche.

Pour ce type de crue et de scénario, les mêmes enjeux sont menacés : village de Lanslevillard et le cône de déjection de l'Arcelle. Cependant, les hauteurs de dépôts seront probablement moindres que celles attendues pour une lave torrentielle.

# IV.5 Cartographie de l'aléa torrentiel

## IV.5.1 PPR en vigueur

La commune de Lanslevillard possède un PPR approuvé en date du 23/03/2004.

Le zonage des aléas impactant les urbanisations porte sur :

- les crues torrentielles et inondations
- les avalanches
- le ravinement et les chutes de blocs

Cette étude se concentre sur l'aléa torrentiel. La carte ci-dessous est une reproduction de ce zonage réglementaire en vigueur sur la commune.

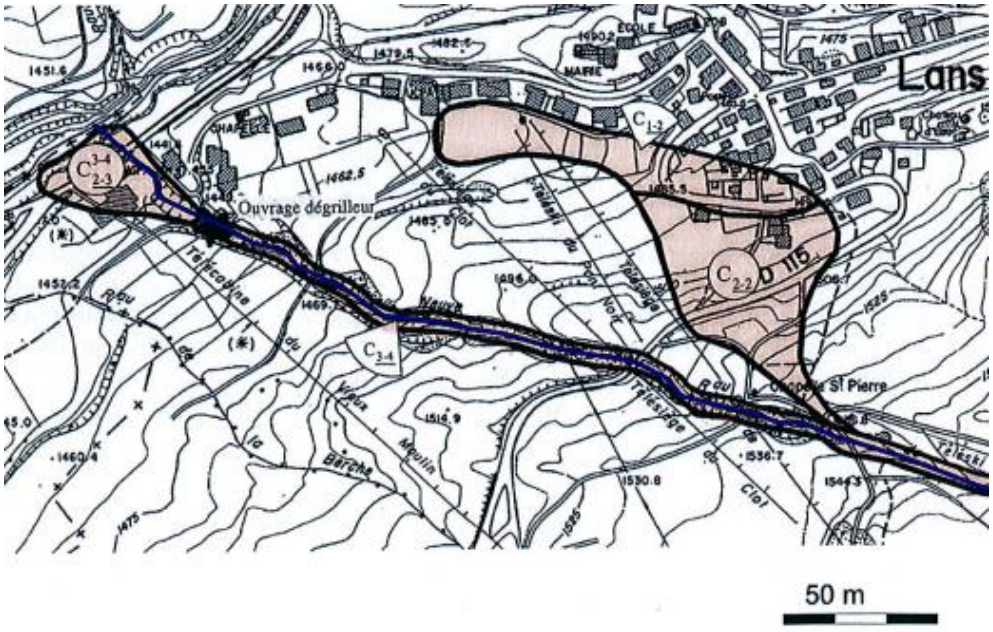



**Figure 39 : Extrait du PPR sur le secteur d'étude**

Les risques de débordements au droit du dalot Saint Pierre étaient déjà identifiés et sont validés par cette présente étude, malgré l'absence de débordement en 2015.

Cependant, au droit du cône de déjection, l'emprise de l'évènement de 2015 a été au-delà des limites prédites dans le PPR. La figure suivante en témoigne.

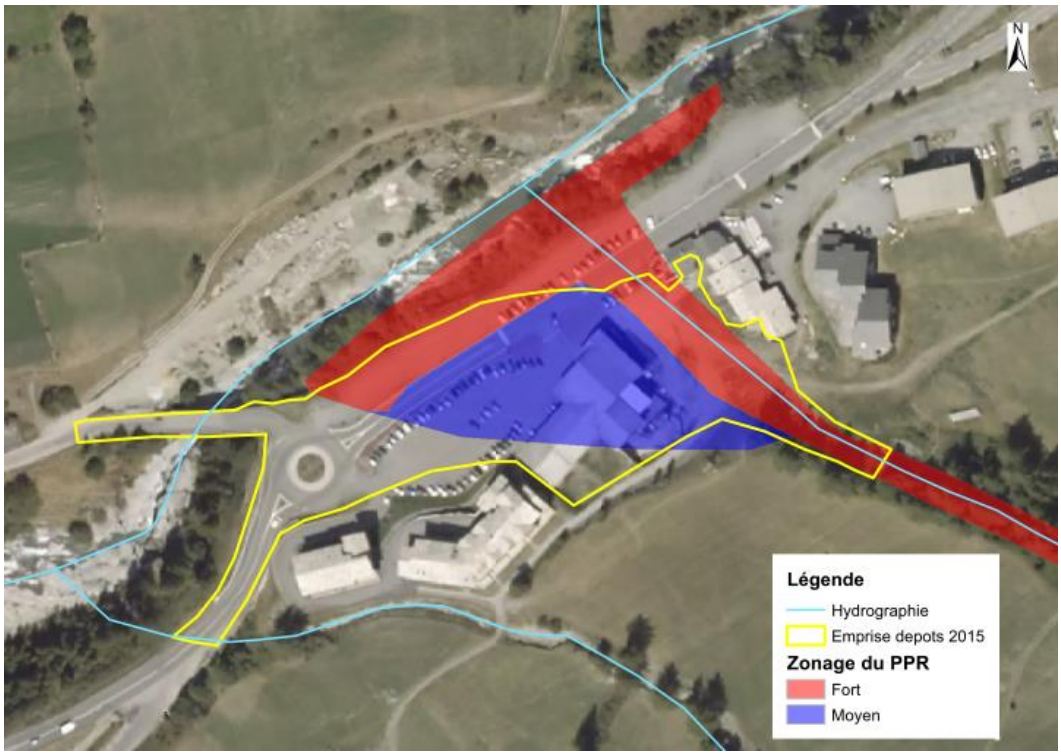



**Figure 40 : Comparaison du zonage PPR et de l'emprise des dépôts 2015**

## IV.5.2 Cartographie de l'aléa au regard des résultats de l'étude

Le zonage dépend de l'intensité du phénomène pour l'aléa de référence correspondant à une lave torrentielle de 25 000 m³ (voir paragraphe III.5.)

L'intensité de l'aléa est définie de la manière suivante :

| | Fort | Moyenne | Faible |
|---|---|---|---|
| Définition de l'aléa au regard des dommages | Destruction du bâti standard<br><br>Endommagement des bâtis renforcés | Dommage structurel du bâti standard<br><br>Pas de dommage au bâti adapté | Dommages limités, non structurel sur un bâti standard |
| Caractérisation de l'aléa à partir de la hauteur de dépôt | Dépôt supérieur à 1m | Dépôt compris entre 0,1 et 1m | Pas de dépôt – zone de ressuyage |

La Figure 37 montre que dans le cas du torrent de l'Arcelle, pour l'aléa de référence, il n'y pas de zone d'aléa moyen identifié car dès qu'il y des dépôts ceux-ci sont supérieurs au mètre. La cartographie de l'aléa recense donc les secteurs d'aléa fort avec des dépôts de matériaux et les zones d'aléa faible qui correspondent aux zones de ressuyage.

La nouvelle carte d'aléa suivante est proposée :




**Figure 41 - Cartographie de l'aléa torrentiel**

# V Propositions d'aménagements

Ce paragraphe présente les différentes solutions envisageables pour réduire les risques de débordements préalablement identifiés.

Les débordements sur le cône de déjection sont dus au passage busé à capacité hydraulique insuffisante et inapproprié au passage de lave torrentielle. Afin d'éviter son obstruction et l'étalement de la crue, deux solutions sont envisageables :

- Création d'une plage de dépôt permettant de stocker, à minima, le volume de référence.
- Aménagement d'un chenal d'écoulement afin de permettre le transit des laves jusqu'à l'Arc

Les débordements au droit du dalot Saint Pierre sont également dus à un ouvrage hydraulique de capacité trop limitée. Deux options seront également proposées :

- Suppression du dalot et terrassement de la rive droite pour éviter tout débordement
- Terrassement pour permettre un retour des débordements au lit de l'Arcelle (digue ?)

# V.1 Aménagement d'une plage de dépôt (option 1)

## V.1.1 Description technique de la solution

La seule position envisageable pour la plage de dépôt est à l'amont immédiat de la buse. Le torrent de l'Arcelle est naturellement encaissé à cet endroit, le principe de l'aménagement consiste donc à :

- Décaisser un maximum de matériaux sur chaque rive pour gagner de la surface pour stockage des laves.
- De créer un ouvrage de fermeture en travers du torrent pour permettre une accumulation de lave en hauteur.

La hauteur et la largeur de l'ouvrage sont contraintes par la topographie du site. La capacité de la plage de dépôt est estimée 15 000 m$^3$. Dans le cadre d'un avant-projet ou d'un projet, l'implantation de l'ouvrage pourrait-être optimisée, mais il paraît toutefois peu probable d'atteindre une capacité de 25 000 m$^3$.




**Figure 42 : Plage de dépôt SFTRF du Saint Martin**

## V.1.2 Impact de l'aménagement sur l'aléa

Cet aménagement permet d'éviter l'obstruction de la buse et les débordements sur le cône jusqu'à atteinte de la capacité maximale de stockage de l'ouvrage projeté.

Rappelons que le volume de référence retenu est de 25 000 m³. Ce volume pourrait être revu à la hausse selon les conclusions de l'étude en cours du glacier rocheux, et notamment sur la capacité maximale d'apports du glacier rocheux lors d'un évènement.

La capacité de l'ouvrage ne permettra donc pas de supprimer l'aléa. Il permettra toutefois de réduire très sensiblement l'aléa de référence et de supprimer l'aléa pour les évènements de période de retour inférieure.

Enfin, rappelons que la doctrine de l'état en termes d'urbanisme est de considérer les ouvrages de protection comme transparents. Il est donc probable que cet aménagement ne modifie pas le zonage réglementaire en vigueur.

## V.1.3 Obligations réglementaires

Au regard des obligations réglementaires listées ci-dessous, les procédures administratives associées à cette solutions nécessitent 2 à 3 années. La réalisation d'une étude d'impact est très pénalisante car celle-ci nécessite des inventaires à chacune des saisons et donc au moins un an pour être rédigée.

- **Autorisation au titre de l'article R214-1 du code de l'environnement :**

Les ouvrages projetés sont susceptibles d'avoir une incidence sur la dynamique du cours d'eau (écoulement des eaux, morphodynamique du lit et des berges) ou la gestion des risques d'inondation. Une procédure au titre de la loi sur l'eau est donc nécessaire.

Le projet sera soumis à autorisation.

Les rubriques suivantes sont potentiellement concernées :

| **Codification, type d'opération** | | **Régime administratif** | | **Cas du projet** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Déclaration (D)** | **Autorisation (A)** | **Grandeurs caractéristiques** | **D, A, sans objet** |
| 3.1.1.0. 1° | Ouvrages dans le lit mineur d'un cours d'eau, obstacles à l'écoulement des crues | Sans objet | X | Ouvrage de stockage 15 000 m³ | A |
| 3.1.1.0. 2° | Ouvrages dans le lit mineur d'un cours d'eau, obstacles à la continuité écologique | h > 20 cm | h > 50 cm | Profil en long du torrent respect pas d'obstacle | Sans objet |
| 3.1.2.0. | Modification des profils en long et en travers ou dérivation d'un cours d'eau, | l < 100 m | l > 100 m | Terrassement de la zone de dépôts env.100ml | A |
| 3.1.3.0. | Ouvrages ayant un impact sensible sur la luminosité | l > 10 m | l > 100 m | | SO |
| 3.1.4.0. | Protection de berges non végétales | l > 20 m | l > 200 m | Protection des berges | D |
| 3.1.5.0. | Travaux de nature à détruire les frayères | s < 200 m² | s > 200 m² | Création plage de dépôt | A |
| 3.2.1.0. | Travaux de curage | v < 2 000 m³ | v > 2 000 m³ | Création zone de dépôt – 15 000m3 | A |
| 3.2.5.0. | Barrage de retenue classe :<br>A : H ≥ 20m et H²√ V ≥ 500<br>B : H ≥ 10m et H²√ V ≥ 200<br>C : H ≥ 2m et V ≥ 0,05 et il existe des habitations à moins de 400m à l'aval<br>(V en million de m³) | Non classé | Classe A, B et C | | D |
| 3.2.6.0. | Ouvrages construits en vue de prévenir les inondations | (sans objet) | X | H = 5 m et population inf à 30 personnes | A |

- **Etude d'Impact**

Selon l'annexe à l'article R122.2 du décret n°2011-2019 du 29 décembre 2011 relatif aux études d'impact le présent projet peut être soumis à étude d'impact notamment aux titres suivants :

- 10°- b Travaux, ouvrages et aménagements sur les cours d'eau – Ouvrages de canalisation, de reprofilage et de régularisation des cours d'eau
- 21° - b Extraction de matériaux liée au curage d'un cours d'eau soumis à autorisation au titre de l'article R214-1 du code de l'environnement

- **Espaces protégés**

La prise en compte des enjeux liés aux espèces de faune et de flore sauvage protégées ou de leurs habitats associés peut conduire à d'éventuelles procédures de dérogation au sens des articles L. 411-1 et L. 411-2 du code de l'environnement.

Le site de travaux se situe au sein de la ZNIEFF 2 – Adret de Maurienne

Le site de travaux se situe à proximité de :

- N2000 – Parc National de la Vanoise
- ZNIEFF 1 – Vallonbrun

- **Régime juridique des terrains d'emprise**

Si les terrains supports des travaux projetés sont des propriétés privées, la collectivité a capacité à intervenir en application des articles L.151-36 à L.151-40 du code rural et L.211-7 du code de l'environnement après enquête publique.

Toutefois, si la collectivité n'est pas propriétaire des terrains, afin d'assurer une bonne gestion future de l'ouvrage, il est souhaitable que les terrains soient acquis par voie amiable ou par voie de DUP.

Depuis le 01/07/2014, sauf en cas de DUP, la collectivité doit justifier, avant la mise en enquête publique au titre du code de l'environnement, de la libre disposition des terrains nécessaires aux aménagements.

## V.1.4 Exploitation de l'ouvrage

- **Exploitation courante de l'ouvrage**

L'exploitation courante de l'ouvrage ne nécessite qu'une visite annuelle pour s'assurer de son bon état. La végétation doit être entretenue pour empêcher le développement des arbres. Les coûts d'exploitation courant sont donc faibles.

- **Exploitation suite à un évènement**

Après chaque crue, l'ouvrage devra être curé. Au regard de l'historique des crues, la périodicité peut être estimée à un curage tous les 10 ans en moyenne.

Il est nécessaire de trouver une destination aux matériaux de curage. Au regard de la proximité de l'Arc et de l'importante incision de l'Arc dans la traversée de Lanslevillard et de Lanslebourg, les matériaux de curage pourront être restitués à l'Arc. Cette solution présente l'avantage de maintenir le transit sédimentaire et de limiter les coûts de curage. Les modalités de curage et la destination des matériaux seront fixées dans le cadre du dossier loi sur l'eau.

## V.1.5 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage

- **Impact paysagé**

La plage de dépôt a été implantée de manière à limiter son impact paysager. En effet celle-ci est creusée dans les terrains en place de manière à limiter les remblais qui ont un fort impact visuel. L'intégration paysagère de la plage de dépôt devra être traitée de manière attentive dans la phase AVP et PRO.

La solution de la plage de dépôt permet de maintenir le front de neige en l'état et ne perturbe pas le passage d'une rive à l'autre du torrent de l'Arcelle pour les skieurs.

- **Impact sur le milieu naturel**

La création de la plage de dépôt va artificialiser le torrent de l'Arcelle sur une centaine de mètres. Concernant le fonctionnement du torrent, elle perturbera le transport solide. L'impact sur le transport solide pourra être annulé en restituant les matériaux à l'Arc.

## V.1.6 Estimation sommaire du montant de l'opération

Avec un volume de déblais excédentaire de 24 000 m³, le montant du projet est directement lié à la possibilité de revalorisation des matériaux dans un périmètre proche.

Les scénarios pour la gestion des matériaux dépendent de la qualité de ceux-ci. Il sera donc nécessaire de réaliser au préalable une étude géotechnique et un classement GTR des matériaux pour s'assurer des possibilités de réemploi. A partir de là, deux scénarios sont possibles : soit la collectivité dispose d'un site ou d'un projet qui réutilise les matériaux, soit les matériaux sont laissés à l'entreprise pour revalorisation. Un mix des deux est envisageable.

En l'absence d'informations précises sur la nature et le devenir des matériaux, l'estimation du montant des travaux pour cette solution est très approximative.

| TRAVAUX | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **N°** | **Nature des travaux** | **Unité** | **Prix unit. HT (en chiffres)** | **Quantité** | **Sous-Total** |
| **1** | **Préparation et installation du chantier** | | | | |
| 1.1 | Installation de chantier | ft | 10 000,00 € | 1 | 10 000,00 € |
| 1.2 | Plan de recollement et dossier des ouvrages exécutés | ft | 1 500,00 € | 1 | 1 500,00 € |
| 1.3 | Dérivation et gestion des eaux pendant le chantier | ft | 5 000,00 € | 1 | 5 000,00 € |
| **2** | **Terrassements** | | | | |
| 2.1 | Terrassement en déblais - remblais sur site | m3 | 4,00 € | 3 000 | 12 000,00 € |
| 2.2 | Terrassement en déblais avec évacuation des matériaux pour revalorisation | m3 | 10,00 € | 24 000 | 240 000,00 € |
| **3** | **Protections de berges en enrochement** | | | | |
| 3.1 | Enrochements secs | m3 | 60,00 € | 400 | 24 000,00 € |
| **4** | **Ouvrage de fermeture** | | | | |
| 4.1 | Géni-civil | ft | 100 000,00 € | 1 | 100 000,00 € |
| 4.2 | Grille acier | ft | 5 000,00 € | 1 | 5 000,00 € |
| **5** | **Travaux d'aménagement divers** | | | | |
| 5.1 | Engazonnement | m2 | 1,20 € | 11 000 | 13 200,00 € |
| 5.2 | Amenagements paysagés et sécurisation des pistes | ft | 50 000,00 € | 1 | 50 000,00 € |
| | | | TOTAL Travaux | | 460 700,00 € |

| Prestations associées | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| PA1 | AVANT PROJET | **ft** | 6 500,00 € | 1 | 6 500,00 € |
| PA2 | Maitrise d'œuvre PRO-ACT-DET-EXE-AOR | **ft** | 25 000,00 € | 1 | 25 000,00 € |
| PA3 | Dossier Loi sur l'eau - autorisation | **ft** | 10 000,00 € | 1 | 10 000,00 € |
| PA4 | Etude d'impacte | **ft** | 15 000,00 € | 1 | 15 000,00 € |
| PA5 | Acquisition foncière | **ft** | 5 000,00 € | 1 | 5 000,00 € |
| | | | TOTAL Prest. associées | | 61 500,00 € |

| Divers et inprévus | | | |
|---|---|---|---|
| D1 | Divers et imprévus | 5% | 27 800,00 € |
| | TOTAL Divers | | 27 800,00 € |
| | **TOTAL OPERATION H.T** | | **550 000,00 €** |

# V.2 Aménagement d'un chenal d'écoulement à ciel ouvert (option 2)

## V.2.1 Description technique de la solution

Le principe consiste à rétablir un chenal à ciel ouvert jusqu'à la RD1006 puis à prolonger le chenal par un dalot rectangulaire suffisamment dimensionné.

Le dimensionnement de cette solution dépend principalement de deux contraintes :

- La relation pente / largeur d'écoulement / hauteur d'écoulement
- Les possibilités techniques pour la création du dalot couvert. Le caractère rectangulaire du dalot impose de forte contrainte sur la hauteur de recouvrement applicable dessus.

D'un point de vu hydraulique, il est préférable d'augmenter la pente au maximum. Cependant plus la pente est importante plus les remblais au-dessus du dalot sont importants ce qui limite

l'utilisation des ouvrages de type dalot. Il convient donc de voir avec les fournisseurs de cadre béton les charges maximales admissibles par les dalots.

Deux profils ont été étudiés :

| | Pente | Section chenal ouvert | Section dalot | Longueur totale | Hauteur max recouvrement dalot |
|---|---|---|---|---|---|
| Profil 11 % | 11 % | L 5 m x H 4,5 m | L=5 m x H 4m | 125 m | 8 m |
| Profil 8 % | 8 % | L 5 m x H 5 m | L 5 m x H 5 m | 125 m | 4 m |

Le profil à 8% nous parait préférable car :

- Il nécessite moins de terrassement et notamment sur des hauteurs moins importantes.
- L'ouvrage cadre est plus grand, donc plus cher à la fourniture mais son positionnement moins profond rend sa mise en œuvre moins chère. Les coûts s'équilibrent donc.
- Le profil à 8% nécessite moins d'enrochements bétonnés pour le chenal d'écoulement.
- Les hauteurs de matériaux sur l'ouvrage cadre sont moins importantes donc les charges appliquées sont plus faibles.
- La confluence avec l'Arc a lieu à une cote plus élevée, ce qui augmente le volume stockable dans l'Arc avec l'apparition de dépôts régressifs dans le dalot et le chenal.

Remarque :

- Hauteur actuelle entre fond de la buse et RD : 8,26m
- Hauteur actuelle max entre fond de la buse et TN : 10 m (bord du parking coté Arc)



**Figure 43 : Chenal en enrochements bétonnés – Hermillon (73)**



**Figure 44 : Mise en œuvre d'un dalot 5mx3m à Embrun**

## V.2.2 Impact de l'aménagement sur l'aléa

Cet aménagement permet de laisser transiter les crues de l'Arcelle jusqu'à l'Arc sans débordements sur le cône de déjection. Cette solution offre l'avantage de réduire le risque identifié, quel que soit le volume de l'évènement. Il n'y a en effet aucune notion de stockage. La configuration de la confluence avec le lit de l'Arc très encaissé dans une gorge rocheuse,

permet un stockage des matériaux au niveau de la confluence sans risque de débordement de l'Arc sur les enjeux.

## V.2.3 Obligations réglementaires

Au regard des obligations réglementaires listées ci-dessous, les procédures administratives associées à cette solutions nécessitent 1 à 2 années. Cette solution ne nécessite pas la réalisation d'une étude d'impact.

- **Autorisation au titre de l'article R214-1 du code de l'environnement :**

Les ouvrages projetés sont susceptibles d'avoir une incidence sur la dynamique du cours d'eau (écoulement des eaux, morphodynamique du lit et des berges) ou la gestion des risques d'inondation. Une procédure au titre de la loi sur l'eau est donc nécessaire.

Le projet sera soumis à autorisation.

Les rubriques suivantes sont potentiellement concernées :

| Codification, type d'opération | | Régime administratif | | Cas du projet | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Déclaration (D) | Autorisation (A) | Grandeurs caractéristiques | D, A, sans objet |
| 3.1.1.0. 2° | Ouvrages dans le lit mineur d'un cours d'eau, obstacles à la continuité écologique | h > 20 cm | h > 50 cm | Profil en long du torrent respect pas d'obstacle | Sans objet |
| 3.1.2.0. | Modification des profils en long et en travers ou dérivation d'un cours d'eau, | l < 100 m | l > 100 m | Modification du profil le long de la buse (à voir avec DDT) | A |
| 3.1.3.0. | Ouvrages ayant un impact sensible sur la luminosité | l > 10 m | l > 100 m | | SO |
| 3.1.4.0. | Protection de berges non végétales | l > 20 m | l > 200 m | Protection des berges | A |

- **Etude d'Impact**

Selon l'annexe à l'article R122.2 du décret n°2011-2019 du 29 décembre 2011 relatif aux études d'impact, le présent projet peut être soumis à étude d'impact notamment aux titres 10°-b Travaux, ouvrages et aménagements sur les cours d'eau – Ouvrages de canalisation, de reprofilage et de régularisation des cours d'eau.

Toutefois au regard du projet, en considérant :
- que le torrent est déjà busé sur la zone des travaux
- que le projet aura un impact plutôt favorable avec la réouverture à l'air libre de plus de 70 m de torrent.

Une étude d'impact ne sera pas forcément nécessaire. Il sera nécessaire de demander à la DDT si elle souhaite la réalisation d'une étude d'impact.

- **Espaces protégés**

La prise en compte des enjeux liés aux espèces de faune et de flore sauvage protégées ou de leurs habitats associés peut conduire à d'éventuelles procédures de dérogation au sens des articles L. 411-1 et L. 411-2 du code de l'environnement.

Le site de travaux se situe au sein de la ZNIEFF 2 – Adret de Maurienne

Le site de travaux se situent à proximité de :

- N2000 – Parc National de la Vanoise
- ZNIEFF 1 – Vallonbrun

### • Régime juridique des terrains d'emprise

Les terrains support des travaux projetés ont plusieurs régimes juridiques :

- Des propriétés privées. La collectivité a capacité à intervenir sur des propriétés privées en application des articles L.151-36 à L.151-40 du code rural et L.211-7 du code de l'environnement après enquête publique.

  Toutefois, afin d'assurer une bonne gestion future de l'ouvrage, il est souhaitable que les terrains soient acquis par la collectivité par voie amiable ou par voie de DUP.

  Depuis le 01/07/2014, sauf en cas de DUP, la collectivité doit justifier, avant la mise en enquête publique au titre du code de l'environnement, de la libre disposition des terrains nécessaires aux aménagements.

- La RD 1006 qui est sous la responsabilité du Conseil Départemental 73. La solution n°2 nécessite la modification de la buse sous la RD. Il est donc nécessaire que la commune engage un dialogue avec le Conseil Départemental concernant la mise en œuvre de cette solution.

## V.2.4 Exploitation de l'ouvrage

### • Exploitation courante de l'ouvrage

L'exploitation courante de l'ouvrage ne nécessite qu'une visite annuelle pour s'assurer de son bon état. Les ouvrages étant en enrochements bétonnés et en béton armé ceux-ci seront résistants aux sollicitations extérieures.

L'élément qui demandera le plus d'entretien est le radier (fond) du dalot en béton armé. En effet, avec une pente de 8%, la capacité d'érosion de l'eau sera importante. Nous préconisons donc de réaliser un radier d'usure en matériaux anti-abrasion de type Fondag® ou Abraroc® pour augmenter sa durabilité. Même avec ce type de matériaux, il sera surement nécessaire de refaire le radier tous les 10 à 20 ans.

### • Exploitation suite à un évènement

Après chaque crue, l'ouvrage devra être contrôlé. Il est possible que des dépôts régressifs aient lieu dans le canal depuis la confluence. Il sera alors nécessaire de curer le canal pour lui restituer sa capacité d'écoulement. Le curage sera de l'ordre de 0 à 2 000 $m^3$. Les matériaux pourront être simplement « poussés » jusqu'à la confluence avec l'Arc.

## V.2.5 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage

### • Impact paysagé

Le chenal d'écoulement aura un impact paysagé limité car il sera creusé dans les terrains en place. La remise en place de l'écoulement à l'air libre du torrent peut même avoir un impact paysager favorable.

Toutefois, la création du chenal d'écoulement coupera le front de neige en 2. Il est donc nécessaire de réfléchir aux solutions techniques pour que l'aménagement perturbe au minimum le domaine skiable. Les deux principales difficultés sont la sécurisation contre les chutes dans l'Arcelle et de permettre le passage des skieurs d'une rive à l'autre.

L'intégration paysagère et l'aménagement du front de neige devront être traités de manière attentive dans la phase AVP et PRO.

- **Impact sur le milieu naturel**

La suppression de la buse et la création d'un écoulement à l'air libre permettra au torrent de retrouver la luminosité nécessaire au maintien de la vie.

Les travaux auront une emprise limitée dans un secteur déjà fortement anthropisé. L'impact sur le milieu naturel sera donc neutre voir favorable avec la mise à l'air libre du torrent.

## V.2.6 Estimation sommaire du montant de l'opération

Le chiffrage ci-dessous identifie les principaux postes de dépenses, il s'agit d'un chiffrage au niveau étude préliminaire qui permet d'avoir un ordre de grandeur du montant de l'opération.

| TRAVAUX | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N° | Nature des travaux | Unité | Prix unit. HT (en chiffres) | Quantité | Sous-Total |
| **1** | **Préparation et installation du chantier** | | | | |
| 1.1 | Installation de chantier | ft | 10 000,00 € | 1 | 10 000,00 € |
| 1.2 | Plan de recollement et dossier des ouvrages exécutés | ft | 1 500,00 € | 1 | 1 500,00 € |
| 1.3 | Dérivation et gestion des eaux pendant le chantier | ft | 10 000,00 € | 1 | 10 000,00 € |
| **2** | **Terrassements** | | | | |
| 2.1 | Terrassement en déblais avec évacuation des matériaux pour revalorisation | m3 | 10,00 € | 5 000 | 50 000,00 € |
| **3** | **Protections de berges en enrochement** | | | | |
| 3.1 | Enrochements bétonnés | m3 | 110,00 € | 2 500 | 275 000,00 € |
| **4** | **Dalot béton armé** | | | | |
| 4.1 | Fourniture et pose Dallot 5x5 | m3 | 7 500,00 € | 50 | 375 000,00 € |
| 4.2 | Fourniture et mise en œuvre du revètement anti abrasion | m3 | 3 000,00 € | 25 | 75 000,00 € |
| **5** | **Travaux d'aménagement divers** | | | | |
| 5.1 | Démontage puis réfection de la RD et du parking | m2 | 50,00 € | 2 500 | 125 000,00 € |
| 5.2 | Démontage,évacuation et recyclage du dalot existant | ml | 50,00 € | 125 | 6 250,00 € |
| 5.3 | Engazonnement | m2 | 1,20 € | 3 000 | 3 600,00 € |
| 5.4 | Amenagements paysagés et sécurisation des abords du chenal | ml | 200,00 € | 150 | 30 000,00 € |
| 5.5 | Aménagement des traversées de piste | ft | 50 000,00 € | 1 | 50 000,00 € |
| | | | TOTAL Travaux | | 1 011 350,00 € |

| Prestations associées | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| PA1 | AVANT PROJET | **ft** | 6 000,00 € | 1 | 6 000,00 € |
| PA2 | Maitrise d'œuvre PRO-ACT-DET-EXE-AOR | **ft** | 50 000,00 € | 1 | 50 000,00 € |
| PA3 | Dossier Loi sur l'eau - autorisation | **ft** | 10 000,00 € | 1 | 10 000,00 € |
| | | | TOTAL Prest. associées | | 66 000,00 € |

| Divers et inprévus | | | |
|---|---|---|---|
| D1 | Divers et imprévus | 6% | 72 650,00 € |
| | TOTAL Divers | | 72 650,00 € |
| | **TOTAL OPERATION H.T** | | **1 150 000,00 €** |

### V.2.7 Variantes avec dalot sur tout le linéaire

Pour limiter l'impact paysagé et les contraintes d'exploitation pour le domaine skiable, il est possible de mettre en œuvre le dalot sur le tout le linéaire. Le chenal en enrochement bétonnés est remplacé par un dalot 5mx5m.

**Le coût de l'opération dans ce cas est estimé à 1 500 000 € H.T**

## V.3 Suppression des enjeux et parcours à moindre dommage (option 3)

### V.3.1 Description technique de la solution

Cette solution consiste à agir sur les enjeux et non pas sur l'aléa. Il consiste à supprimer et protéger les enjeux pour limiter les dégâts.

L'enjeu le plus exposé à l'aléa torrentiel est le bâtiment d'exploitation de la SEM. La SEM a pour projet de construire un nouveau bâtiment à court terme. Le bâtiment pourrait-être déplacé vers l'amont pour se situer hors zone d'aléa.

Les habitations et le restaurant en rive droite, ne peuvent pas être déplacés, toutefois ils peuvent être protégés en :

- Favorisant les écoulements sur la rive gauche grâce à une modification de la topographie
- Créant une protection rapprochée de type « digue » ou « mur » pour éviter les débordements en direction des bâtiments.

Ces aménagements devront être accompagnés d'aménagements de voirie pour faciliter la traversée du torrent jusqu'à l'Arc (exemple : suppression des blocs béton matérialisant le parking entre la RD1006 et l'Arc, création d'un point bas dans la RD).

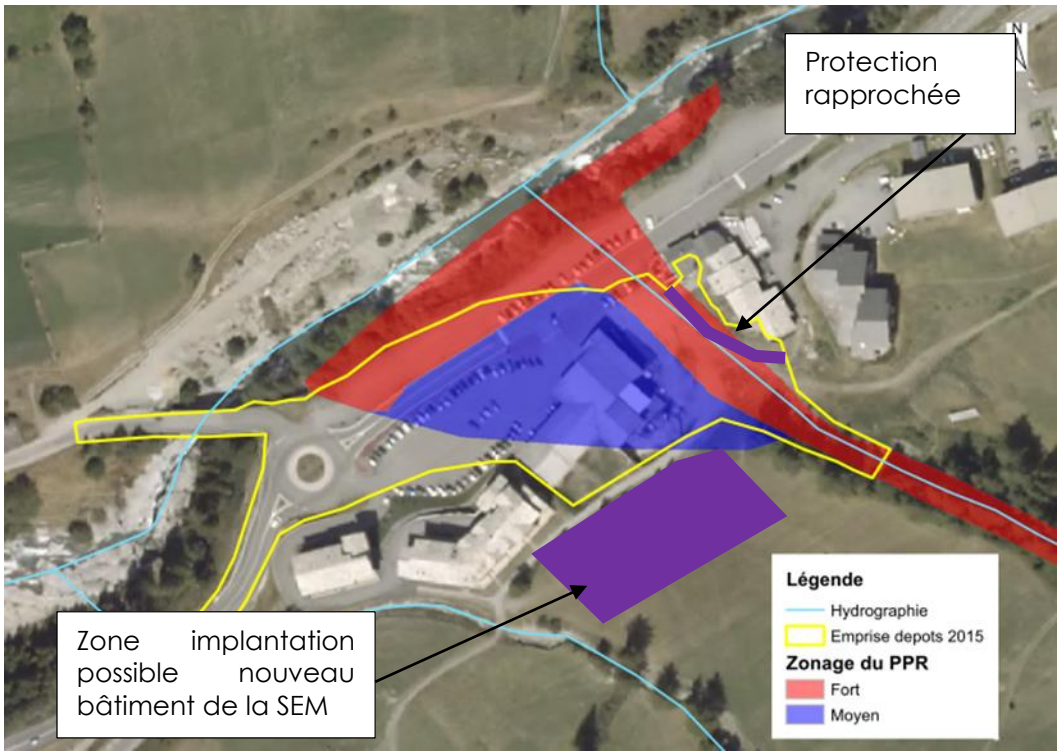


**Figure 45 : Schéma de principe de l'option 3**

## V.3.2 Impact de l'aménagement sur l'aléa

Cet aménagement n'a aucun impact sur l'aléa. La RD1006 et le parking de la SEM resteront donc exposés aux laves torrentielles.

Cet aménagement ne permet pas de protéger les personnes physiques présentes dans la zone de débordement. Compte tenu du caractère imprévisible et rapide des laves torrentielles, si cette solution est retenue, elle pourra-être couplé à un système d'alerte et de détection de type « Détecteur de Lave Torrentielle » qui aura pour but de prévenir en cas de lave torrentielle.

## V.3.3 Obligations réglementaires

- **Autorisation au titre du code de l'urbanisme**

Cette solution entraine la construction d'un nouveau bâtiment sur un terrain qui est actuellement utilisé en pâturage. Il faut s'assurer que la solution proposée soit compatible avec les documents d'urbanisme de la commune.

- **Autorisation au titre de l'article R214-1 du code de l'environnement :**

Le seul ouvrage susceptible de nécessiter une procédure au titre du code de l'environnement est la protection rapprochée en rive droite du torrent de l'Arcelle.

Le projet sera soumis à déclaration ou autorisation suivant l'interprétation qui sera faite du projet par les services de la DDT.

Au regard des obligations réglementaires listées ci-dessous, les procédures administratives associées à cette solutions nécessitent 1 année.

Les rubriques suivantes sont potentiellement concernées :

| Codification, type d'opération | | Régime administratif | | Cas du projet | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Déclaration (D)** | **Autorisation (A)** | **Grandeurs caractéristiques** | **D, A, sans objet** |
| 3.2.6.0. | Ouvrages construits en vue de prévenir les inondations | (sans objet) | X | H environ 1m | A<br>A discuter avec la DDT |

- **Etude d'Impact**

Aucune étude d'impact ne sera nécessaire

## V.3.4 Exploitation de l'aménagement

- **Exploitation courante**

Le seul ouvrage de l'aménagement sera la protection rapprochée en rive droite. L'exploitation courante de l'ouvrage ne nécessite qu'une visite annuelle pour s'assurer de son bon état.

Si un détecteur de lave torrentielle est mis en place, il devra être contrôlé et entretenu régulièrement par des professionnels.

Les coûts d'exploitation courant sont donc modérés (environ 5 000 € par an).

- **Exploitation suite à un évènement**

Après chaque crue, la zone de débordement devra être curée comme lors de l'épisode de 2015.

### V.3.5 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage

- **Impact paysagé**

L'impact paysagé dépendra exclusivement de l'aménagement paysagé du nouveau bâtiment de la SEM et du réaménagement du terrain de l'ancien bâtiment.

- **Impact sur le milieu naturel**

L'impact sur le milieu naturel est limité. Il y aura toutefois une perte de surface cultivée car le nouveau bâtiment serait construit sur une zone de prairie.

### V.3.6 Estimation sommaire du montant de l'opération

Cette opération n'est pas chiffrée car les principales dépenses sont liées à la construction du nouveau bâtiment et l'aménagement du site.

Pour les travaux liés à la protection rapprochée des enjeux en rive gauche le montant des travaux dépend de la solution technique retenue, simple terrassement ou mur en béton. Le montant des travaux peut varier entre 50 000 € et 200 000 €.

La mise en place d'un détecteur de lave torrentielle pour sécuriser le parking et la RD aurait un coup de l'ordre de 80 000 € H.T

## V.4 Aménagement de la traversée de la piste St Pierre

### V.4.1 Description technique de la solution

La traversée de la piste St Pierre génère un important risque de débordement. Etant donné qu'il existe plusieurs points de traversée du torrent de l'Arcelle à l'amont et l'aval de ce dalot la solution la plus adaptée nous semble la suppression de celui-ci accompagné d'un reprofilage du torrent.

Le chenal sera reprofilé dans la continuité des berges à l'amont et à l'aval. En rive droite la berge sera rehaussée pour limiter les risques de débordement. Le dimensionnement du chenal sera à préciser avec le levé topographique lors de la phase AVP ou PRO. On évitera de créer une digue pour s'affranchir des contraintes réglementaires associées et notamment de la procédure d'autorisation.

Dans le cas où la traversée ne puisse pas être abandonnée pour des raisons d'exploitation du domaine skiable, un ouvrage de franchissement de type « pont » pourrait être mis en place après rehausse des berges et reprofilage du lit.

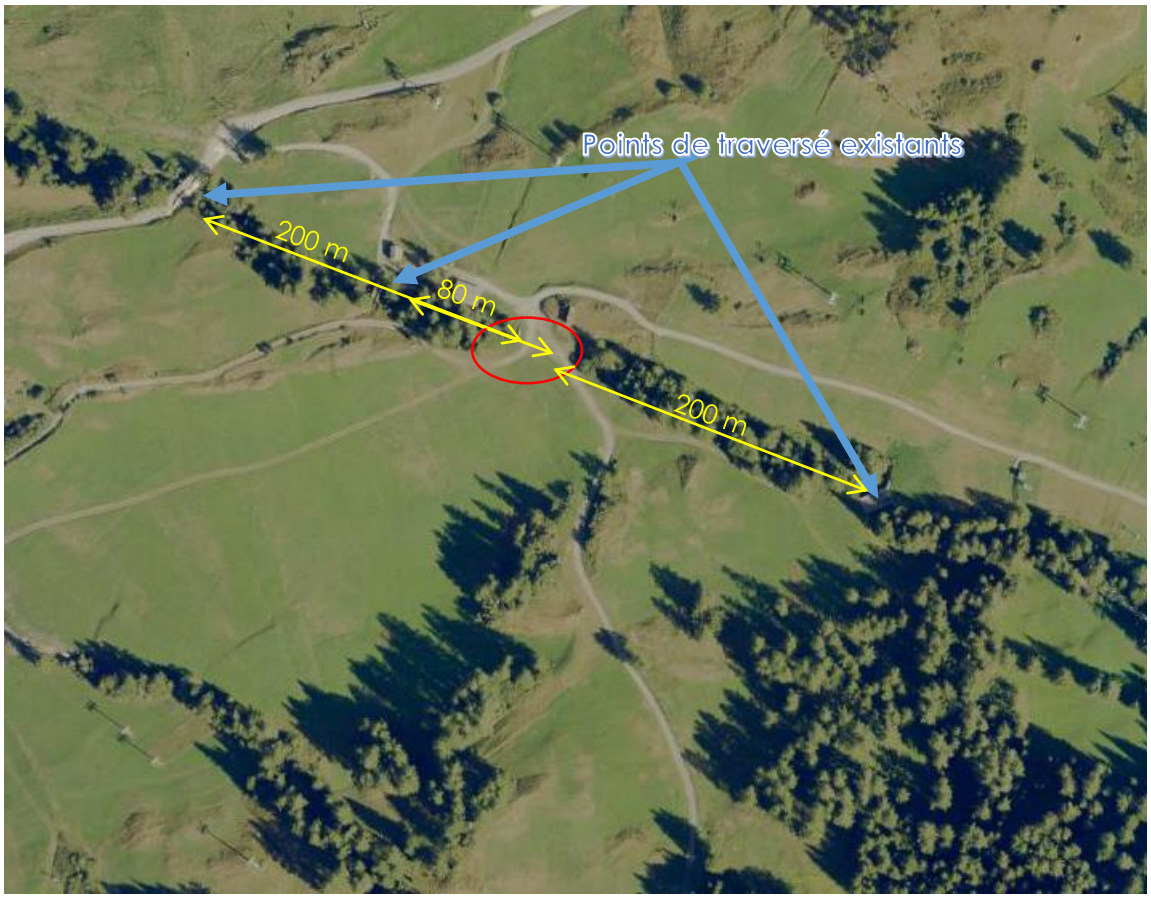



**Figure 46 : Position des points de traversée sur le torrent de l'Arcelle**

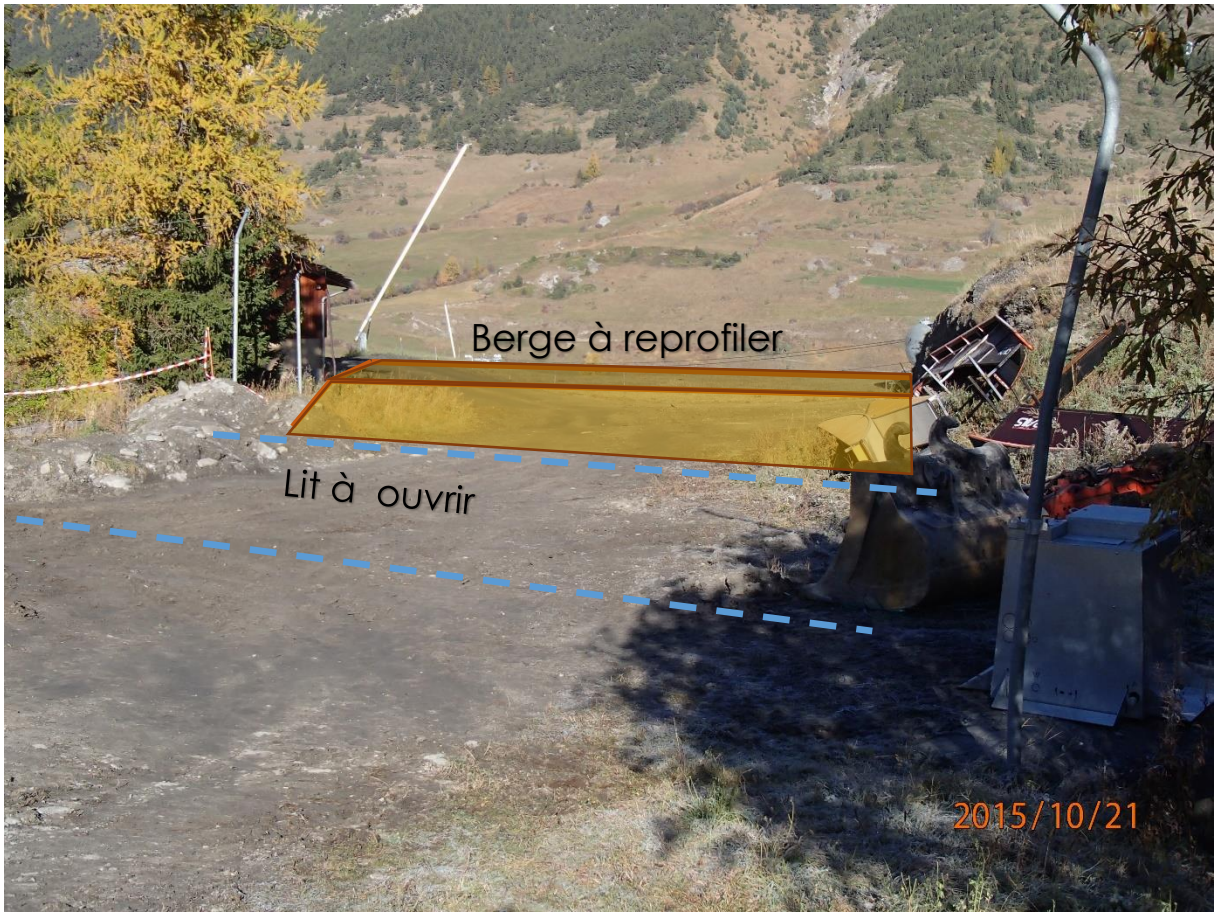



**Figure 47 : Schéma de principe de l'aménagement de la traversée de la piste St Pierre**

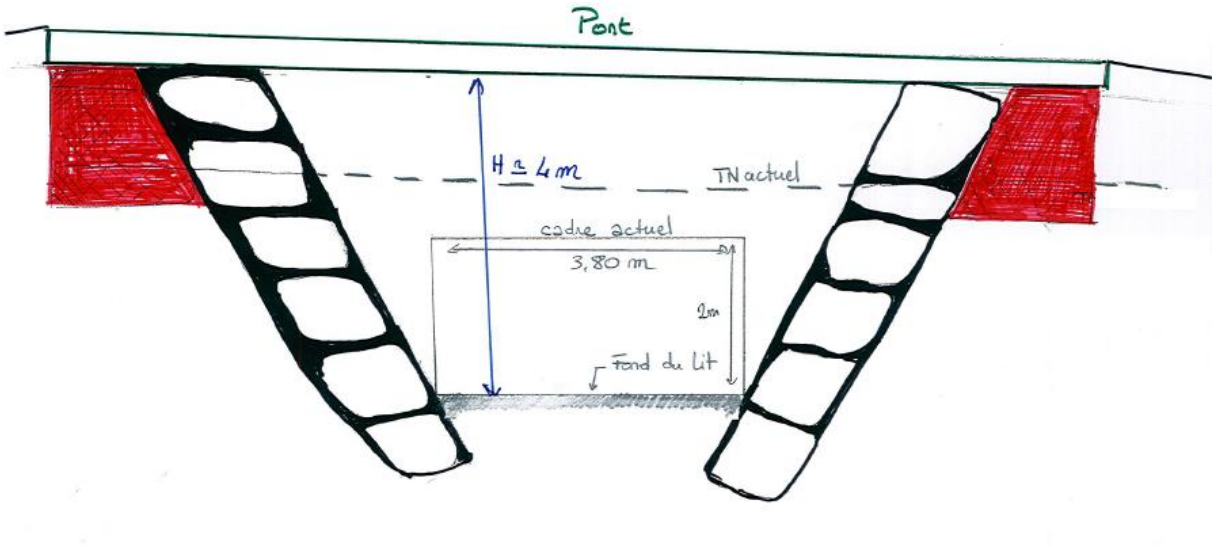



**Figure 48 - Schéma de principe de l'aménagement avec "pont"**



**Figure 49 - Exemple pont pour skieur**

- **Déclaration au titre de l'article R214-1 du code de l'environnement :**

La réglementation à récemment évoluée avec le *décret du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sureté des ouvrages hydrauliques.*

D'après le décret, les procédures d'autorisation sont obligatoires pour les systèmes d'endiguement. Il peut donc être souhaitable de concevoir le projet pour que celui-ci ne soit pas assimilé à un système d'endiguement et notamment en essayant d'avoir une dénivelé la plus faible possible entre le sommet de la berge et le terrain à l'arrière.

Le type de procédure au titre de la loi sur l'eau dépendra de la conception du projet et de l'interprétation que les services de la DDT feront du projet au regard du code de l'environnement.

| Codification, type d'opération | | Régime administratif | | Cas du projet | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Déclaration (D)** | **Autorisation (A)** | **Grandeurs caractéristiques** | **D, A, sans objet** |
| 3.1.2.0. | Modification des profils en long et en travers ou dérivation d'un cours d'eau, | l < 100 m | l > 100 m | Reprofilage sur la longueur du Dallot 32 m | D |
| 3.2.6.0. | Ouvrages construits en vue de prévenir les inondations | (sans objet) | X | | A discuter |

- **Espaces protégés**

La prise en compte des enjeux liés aux espèces de faune et de flore sauvage protégées ou de leurs habitats associés peut conduire à d'éventuelles procédures de dérogation au sens des articles L. 411-1 et L. 411-2 du code de l'environnement.

Le site de travaux se situe au sein de la ZNIEFF 2 – Adret de Maurienne

Le site de travaux se situe à proximité de :

- N2000 – Parc National de la Vanoise
- ZNIEFF 1 – Vallonbrun

### V.4.2 Impact de l'aménagement sur le milieu et le paysage

- **Impact paysagé**

L'impact paysagé sera favorable car le torrent retrouvera son aspect naturel. La principale contrainte réside dans la suppression de la traversée pour les skieurs. Il faut vérifier que ces travaux sont compatibles avec l'exploitation du domaine skiable.

- **Impact sur le milieu naturel**

Ces travaux permettront la re-naturalisation du cours d'eau. Ils auront donc une action bénéfique sur le milieu naturel.

### V.4.3 Estimation sommaire du montant de l'opération

Le montant des travaux pour cette opération est :

- Entre 20 000 et 50 000 € HT dans le cas de la simple suppression du passage compris.
- Entre 50 000 € et 100 000 € dans le cas où un pont est mis en œuvre.

## V.5 Aménagements complémentaires de réduction du risque : entretien de la végétation et du lit du torrent

Les flottants contribuent au risque d'obstruction des ouvrages lors des crues, même sous forme de charriage. Des arbres, certains transportés par la crue de 2015, sont présents au fond du lit. D'autres, sous cavés ou instables sur les berges, menacent d'être emportés par la prochaine crue. Par ailleurs, l'avalanche de l'Arcelle Neuve peut apporter des flottants au fond du lit, alors remobilisables par les crues.

Ainsi, les actions suivantes sont préconisées :

- Entretien périodique (2 à 3 ans) du lit et des berges jusqu'à la piste forestière à la cote 1700 m.

- Parcours du lit du torrent chaque début de printemps et suppression des flottants apportés par l'avalanche

# Table des illustrations

**Figure 1 : Zone d'étude ..... 7**

**Figure 2 : Enjeux ..... 8**

**Figure 3 : Vue aérienne des débordements ..... 9**

**Figure 4 : Carte géologique ..... 10**

**Figure 5 : Profil en long général ..... 11**

**Figure 6 : Profil en long (levé topo) du secteur aval ..... 11**

**Figure 7 : Bassin de réception ..... 12**

**Figure 8 -Glacier-rocheux versant nord du col du Lou. En rouge, limite aval du glacier rocheux. En jaune, zone d'alimentation (glace + débris). Flèches en bleu, direction d'écoulement du Glacier-Rocheux. (source : Géoportail) ..... 13**

**Figure 9 - Zoom sur le front du glacier rocheux avec la présence de rides témoignant de l'activité de celui-ci. (Source : *Géoportail*) ..... 14**

**Figure 10 : Glacier rocheux, avec départ des coulées du 14/08/2015 - vues de l'amont et de l'aval ..... 14**

**Figure 11 : Amont de l'entrée des gorges : terrains morainiques incisés ..... 15**

**Figure 12 : Tronçon amont des gorges et apports latéraux ..... 15**

**Figure 13 : (g) Transition gorges amont et gorges aval rocheuses - (d) Gorges rocheuses avec traversée de la route du Chatel au milieu ..... 16**

**Figure 14 : Fond rocheux et traces de lave à l'aval des gorges (altitude : 1650 m env.) ..... 16**

**Figure 15 : Elargissement du lit et dépôts de la lave du 14/08/2015 ..... 17**

**Figure 16 : Dépôts latéraux par étalement et sur bourrelets à l'amont de la passerelle de ski 17**

**Figure 17 : Deux embacles successifs et blocage de matériaux ..... 18**

**Figure 18 : Passerelle de ski ..... 18**

**Figure 19 : Linéaire entre la passerelle ski et le dalot de la piste St Pierre ..... 19**

**Figure 20 : Dalot St Pierre et risques de débordements ..... 19**

**Figure 21 : Linéaire entre le dalot de la piste Saint Pierre et le pont de la RD115 ..... 20**

**Figure 22 : Linéaire à l'aval de la RD115 ..... 20**

**Figure 23 : Linéaire du pont aval au passage busé ..... 21**

**Figure 24 : Confluence : buse perchée et Arc profond sur fond rocheux ..... 22**

**Figure 25 : Cartographie de l'aléa avalanche (PPR) et apports de flottants associés. ..... 24**

**Figure 26 : Tronçons homogènes et taux d'érosion linéique ..... 27**

**Figure 27 : Zones en érosion active connectées au réseau hydrographique ..... 28**

**Figure 28 : Hydrogrammes de crue liquide ..... 30**

**Figure 29 : Direction des débordements vers le bâtiment en rive droite et vers le village ..... 32**

**Figure 30 : Etalement de la lave de 2015 et hauteur de dépôts ..... 33**

**Figure 31 : Section d'écoulement de la crue du 14 aout 2015 vers la côte 2200 m ..... 34**
**Figure 32 : Hauteur d'écoulement dans un chenal rectangulaire de largeur 4 mètres ..... 36**
**Figure 33 : Emprise de la modélisation ..... 37**
**Figure 34 : Dégradation acceptable des données topographiques pour la modélisation ..... 38**
**Figure 35 : Hauteurs maximales modélisées - scénario 2015 ..... 39**
**Figure 36 : Profil des dépôts - scénario 2015, contrainte seuil 2000 Pa ..... 40**
**Figure 37 : Hauteurs maximales modélisées pour la crue de référence ..... 42**
**Figure 38 : Profil de dépôts dans l'axe de la buse pour la crue de référence ..... 42**
**Figure 39 : Extrait du PPR sur le secteur d'étude ..... 43**
**Figure 40 : Comparaison du zonage PPR et de l'emprise des dépôts 2015 ..... 44**
**Figure 41 - Cartographie de l'aléa torrentiel ..... 45**
**Figure 42 : Plage de dépôt SFTRF du Saint Martin ..... 46**
**Figure 43 : Chenal en enrochements bétonnés – Hermillon (73) ..... 52**
**Figure 44 : Mise en œuvre d'un dalot 5mx3m à Embrun ..... 52**
**Figure 45 : Schéma de principe de l'option 3 ..... 57**
**Figure 46 : Position des points de traversée sur le torrent de l'Arcelle ..... 59**
**Figure 47 : Schéma de principe de l'aménagement de la traversée de la piste St Pierre ..... 59**

# Table des annexes

**Annexe 1 : Analyse hydrologique détaillée**

**Annexe 2 : Rapport RTM de l'évènement du 14 aout 2015.**

**Annexe 3 : Rapport RTM complémentaire au rapport d'évènement du 14 aout 2015 : Visite du glacier rocheux du Col du Lou, le 25/08/2015.**

**Annexe 4 : Les écoulements de type lave torrentielle et leur modélisation**

**Annexe 5 : Plan de l'aménagement de la zone de dépôt à l'amont du Bourg**

**Annexe 6 : Plan de l'aménagement du chenal d'écoulement et du dalot 5x5 m**