

Annexe 11 : AVP Phases 1 et 2 – Étude hydraulique



T et

SYNDICAT PAYS DE MAURIENNE

Aménagement hydraulique du torrent du Saint Antoine à Modane (73)

*Rapport 002 – AVP Phases 1 et 2
Etude hydraulique*

Août 2025



AMÉTEN SIEGE DE GRENOBLE

80 avenue Jean Jaurès

38320 EYBENS

Tél : 04.38.92.10.41

Email : grenoble@ameten.fr



SOCIÉTÉ CANAL DE PROVENCE

Indice	Date	Rédaction	Vérification	Version / Modifications
A	19/12/2024	P. Freydier (SCP, Hydraulicienne/Chef de projet)	J. Boutaghane (SCP, directeur de projet)	Version initiale
B	01/08/2025	P. Freydier (SCP, Hydraulicienne/Chef de projet) 	(J.Boutaghane, directeur de projet)	MAJ des cartes et des probabilité relatives Version finale

SOMMAIRE

1	CONTEXTE ET OBJECTIF	11
1.1	Objectifs de l'étude hydraulique	11
1.2	Présentation du bassin versant et de la zone d'étude	11
1.3	Aléas rencontrés qui font l'objet de la demande d'aménagement.....	13
1.3.1	Laves torrentielles.....	13
1.3.2	Erosion	15
1.4	Profil en long.....	17
1.4.1	Saint Antoine.....	17
1.5	Présentation des ouvrages	21
1.5.1	Plage de dépôt	21
1.5.2	Pont de la RD1006	26
1.5.3	Passerelle de la zone artisanale	29
1.5.4	Pont SNCF	30
2	RAPPEL DE LA METHODOLOGIE	31
2.1	Logiciel HEC-RAS	31
2.2	Caractéristiques des modèles hydrauliques	32
2.2.1	Géométrie du modèle.....	32
2.2.2	Condition aux limites	32
2.2.3	Coefficient de Manning.....	32
2.3	Construction du modèle hydraulique	33
2.3.1	Zone d'étude.....	33
2.4	Modèle rhéologique	35
3	CARACTERISTIQUES DES CRUES	36
3.1	Volume de lave et débits de pointe	36
3.2	Hydrogrammes	37
3.3	Rhéologie	38
3.3.1	Loi de comportement de Herschel Bulkley.....	38
3.3.2	Concentration volumique et masse volumique.....	39
3.3.3	Bilan des paramètres rhéologiques	40
4	SENSIBILITE ET VALIDITE DU MODELE HYDRAULIQUE	41

4.1	Comparaison par rapport aux formules de Coussot (Calculs ponctuels à base rhéologique)	41
4.2	Sensibilité des parametres.....	43
5	CALAGE DU MODELE HYDRAULIQUE	46
5.1	MNT	46
5.2	Hydrogrammes	47
5.3	Emprise des crues historiques	47
5.4	Crue de 2014.....	48
5.5	Crue de 1987.....	53
5.6	Etalement maximal	57
5.7	Validation sur la crue de 2023	59
5.8	Bilan	60
6	RESULTAT DES MODELISATIONS.....	62
6.1	MNT	62
6.2	Prise en compte de sous-scénarios.....	62
6.3	Méthodologie pour établir la carte d'emprise et des intensités	63
6.4	Crue type Q10 (Fréquent).....	63
6.4.1	Résultats bruts des modélisations	63
6.4.2	Scénarios aggravants	65
6.4.3	Dire d'expert	65
6.4.4	Cartographie finale	65
6.5	Crue type Q50 (assez rare).....	65
6.5.1	Résultats bruts des modélisations	65
6.5.2	Scénarios aggravants	68
6.5.3	Dire d'expert	68
6.5.1	Attribution de probabilités conditionnelles.....	70
6.5.2	Cartographie finale	70
6.6	Crue type Q100 (rare)	72
6.6.1	Résultats bruts des modélisations	72
6.6.2	Scénarios aggravants	75
6.6.3	Attribution de probabilités conditionnelles.....	83
6.6.1	Cartographie finale de l'emprise et de l'intensité	85
6.7	Crue type exceptionnelle T>100 ans.....	91
6.7.1	Résultats bruts des modélisations	91

6.7.2	Scénarios aggravants	95
6.7.1	Attribution de probabilités conditionnelles.....	97
6.7.2	Cartographie finale de l'emprise et de l'intensité	98
6.8	Crue Extrême T>1000 ans	102
6.8.1	Résultats bruts des modélisations.....	102
6.8.2	Scénarios aggravants	104
6.8.3	Dire d'expert sur l'interprétation du cône de déjection géologique.....	108
6.8.4	Attribution de probabilités conditionnelles.....	109
6.8.5	Cartographie finale de l'emprise et de l'intensité	110
7	MODELISATION DE LA PLAGE DE DEPOT DANS LES PROJETS D'AMENAGEMENTS	115
7.1	Présentation de l'outil MCB.....	115
7.2	Géométrie des ouvrages de fermeture	115
7.3	Nombre de blocs.....	116
7.4	Modélisation de l'hydrogramme de sortie de la plage de dépôt (PDD)	118
7.4.1	Plage de dépôt actuelle	118
7.4.1	Deux plages de dépôt en série pour un volume total de 48 000 m ³ , projet S3	
Phase2	121	
7.5	Modélisation de la lave torrentielle après aménagement	122

INDEX DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX

Figure 1 : Carte de bassins versant, 5.5 km ² (source RTM 2016, Google Earth)	11
Figure 2 : Caractéristique topographique du bassin versant (source RM 2016).....	12
Figure 3 : Localisation des ouvrages le long du St-Antoine dans la traversée de Modane (source SPM)	12
Figure 4 : Vue sur le cône de déjection du Saint-Antoine et le lit aval après la crue de 1987 (RTM) ...	13
Figure 5 : Plage de dépôt à la suite de la crue de 2023 (RETEX SPM)	15
Figure 6 : Anse d'érosion en amont du pont de la RD1006, avril 2024.....	16
Figure 7 : Profil en long du Saint Antoine, Lidar2021, MNT 2024 et simplification	18
Figure 8 : profil en long du Saint Antoine sur son cône de déjection, MNT2024 et sa simplification ..	19
Figure 9 : zone de « gros bloc », anse d'érosion visible en rive droite et restes d'une canalisation traversante	20
Figure 10 : Extrait d'ETRM 2018. Profil en long du Saint Antoine, Lidar 2014	20
Figure 11 : plage de dépôt suite à la crue de 2014 source ONF-RTM et ETRM 2018	21
Figure 12 : Plage de dépôt, avril 2024	22
Figure 13 : Courbe hauteur volume pour plusieurs pentes de dépôt possible.....	23
Figure 14 : Illustration de la méthodologie du calcul de la courbe hauteur volume	24
Figure 15 : Profil en long de la plage de dépôt et projection sur le Lidar de 2021 et le MNT de 2024	25
Figure 16 : comparaison des courbes hauteur-volume pour la plage de dépôt en 2021 et 2024, pour la pente de dépôt de 4%	26
Figure 17 : Pont de la RD1006 après la crue de 2014.....	27
Figure 18 : Pont de la RD 1006 avril 2024	28
Figure 19 : MNT 2024 au droit du pont, vue en plan	29
Figure 20 : Orthophoto au droit du pont de la RD (VR3D)	29
Figure 21 : Passerelle de la zone artisanale.....	30
Figure 22 : Pont SNCF, avril 2024	31
Figure 23 : répartition des coefficients de Manning sur la zone modélisée	33
Figure 24 : Aperçu des fenêtres de commande principale dans l'interface HEC-RAS 2D avec fond de plan google satellite (module RAS-MAPPER)	34
Figure 25 : vue en plan du modèle centrée sur la zone d'étude.....	35
Figure 26 : Hydrogrammes estimés pour les différentes occurrences de crue	38
Figure 27 : Modélisation de la sensibilité du coefficient de Strickler, K1 K2 et K3	44
Figure 28 : l'étalement d'une crue type Q50, une rhéologie « Fluide » avec une concentration volumique faible (Cv1 bleu), classique (Cv2 vert) et forte (Cv3 rose).....	44

Figure 29 : l'étalement d'une crue type Q50, avec une rhéologie « Extrêmement fluide » (jaune) et « Extrêmement visqueuse » (marron) et profil en travers de l'ouvrage sncf (côte sous poutre 1077.5 m).....	45
Figure 30 : l'étalement d'une crue type Q50, avec une rhéologie « Fluide » pour un débit de pointe de 100 m ³ /s (type Q50 gris) et 150 m ³ /s (type Q100 violet) et pour un pic de 150m ³ /s mais avec un palier de plusieurs minutes au pic générant un volume majoré de 20% un plus gros volume. Profil en travers au niveau du pont SCNF et en amont de la RD.	46
Figure 31 : Hydrogrammes estimés pour la crue de 2014 et la crue Q100 (type 1987)	47
Figure 32 : Emprise des débordements des crues de 1987 (jaune) et 2014 (orange) reproduite d'après RTM 2016 et Lombardi 2018 (EDD).....	48
Figure 33 Emprise des écoulements pour 4 jeux de paramètres rhéologiques testés : très fluide, fluide, visqueux et très visqueux. Pour le cas très fluide, les positions des 4 profils en travers exploités ci-dessous ainsi que l'emprise de la crue de 2014 sont indiqués.	49
Figure 34 : 4 jeux de paramètres testés sur les 4 profils en travers tracés sur la figure précédente. De gauche à droite et de bas en haut : le parking amont du pont de la RD, le pont de la RD, l'epont cadre de la zone artisanale, le pont de la sncf.	50
Figure 35 : crue de 2014, 1m80 de dépôt au droit de la maison rive gauche.....	50
Figure 36 : crue de 2014 entre 1m80 et 1m de dépôt dans l'entrepôt d'autocar rive gauche.....	51
Figure 37 : hauteur de lave modélisée pour l'hydrogramme de la crue de 2014 et la rhéologie « très fluide ».....	52
Figure 38 : hauteur de lave modélisée pour l'hydrogramme de la crue de 2014 et la rhéologie « très visqueuse ».....	53
Figure 39 : crue de 1987 en amont du pont de la RD, langue de débordement en direction du parking de camion, en aval immédiat du PGHM.....	54
Figure 40 : Emprise des écoulements pour 4 jeux de paramètres rhéologiques testés. De gauche à droite et de bas en haut : très fluide, fluide, visqueux et très visqueux. Pour le cas très fluide, les positions des 4 profils en travers exploités ci-dessous ainsi que l'emprise de la crue de 1987 sont indiqués.	55
Figure 41 : Emprise d'un écoulement avec l'hydrogramme type crue de 1987, avec une rhéologie « Très très visqueuse » à 4000 Pa. Profil en travers tracé en rouge sur la vue en plan et présenté avec le niveau d'écoulement.	56
Figure 42 : Emprise d'un écoulement type crue de 1987, avec les 4 jeu de rhéologie et sur un fond de lit relevé de 2.5m. Profil en travers tracé en rouge sur la vue en plan et présenté avec les niveaux d'écoulement.	57
Figure 43 : Emprise de la crue de 2014 resimulée avec la rhéologie de 500 Pa « Extrêmement fluide TTF »	58
Figure 44 : Emprise de la crue de 1987 resimulée avec la rhéologie de 500 Pa « Extrêmement fluide TTF »	58
Figure 45 Emprise de la crue de 1987 resimulée avec la rhéologie de 200 Pa « Extrêmement fluide TTTF »	59
Figure 46 : modélisation de la Q10 au droit du pont de la RD1006 et photo du SPM du pont ajuste après le passage de la crue de 2023	60

Figure 47 : schéma d'arbres de probabilités relatives de sous scénarios d'après INRAE 2022	63
Figure 48 : Profil en long du fond du lit et des haut de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »	64
Figure 49 : La hauteur pour Q10 des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements	64
Figure 50 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »	66
Figure 51 : La hauteur pour Q50 des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements	67
Figure 52 : Hydrogramme Q50, rhéologie « Très visqueuse »	67
Figure 53 : Q50 rhéologie « Très visqueuse », profil en travers en aval immédiat de la passerelle	68
Figure 54 : Vue de l'aval de la passerelle, zone d'abaissement de la ligne de crête en rive gauche	68
Figure 55 : modélisation de l'emprise de la Q50 en rhéologie « Très Fluide » avec forçage d'une partie du volume dans le débordement rive gauche préalablement identifié avec la rhéologie « Très Visqueuse »	69
Figure 56 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »	73
Figure 57 : La hauteur pour Q100 des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements	74
Figure 58 : En haut à gauche « Très Visqueux », en haut à droite « Visqueux », en bas à gauche « Fluide », en bas à droite « Très fluide »	74
Figure 59 : Le pont de la RD modélisé avant obstruction et après (ouverture de 13m de long par 2.4m de haut)	75
Figure 60 : Ligne d'écoulement avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (bleu foncé) et avec obstruction partielle du pont (bleu clair)	76
Figure 61 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction partielle du pont (rose) .	77
Figure 62 : modélisation de l'ouverture restante du pont après obstruction quasi-totale de 80% (ouverture de 13m de long par 1m de haut).....	78
Figure 63 : Ligne d'écoulement avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (bleu foncé) et avec obstruction quasi-totale du pont (bleu clair)	78
Figure 64 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction quasi totale du pont (rose)	79
Figure 65 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 avec obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « Très Fluide » (marron), ou « extrêmement Fluide TTTF » (bleu).	80
Figure 66 : Modélisation de l'obstruction quasi-totale du pont de la SNCF avec une rhéologie « Très visqueuse » (bleu) et « extrêmement fluide TTTF » (marron)	81
Figure 67 : obstruction du chenal en position 1 (entre la PDD et le pont de la RD) et en position 2 (à l'aval immédiat de la PDD)	82

Figure 68 : Localisation des deux obstructions de chenal pour le scénario aggravant de la crue extrême	82
Figure 69 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue Q100 pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu).....	83
Figure 70 : Arbre des probabilités de la Q100 selon méthodologie INRAE & ONF-RTM Piton, Carladous & Tacnet – V2.2 – 2022	85
Figure 71 : Q100 obstruction à 30% du pont de la RD1006. Superposition des résultats bruts de modélisations (toutes rhéologies confondues), des cheminements préférentiels et des classes d'intensité retenues	86
Figure 72 : Q100 obstruction à 80% du pont de la RD1006 (quasi-totale). Superposition des résultats bruts de modélisations (toutes rhéologies confondues), des cheminements préférentiels et des classes d'intensité retenues	87
Figure 73 : Cartographie de l'intensité et emprise de la Q100 du sous scénario obstruction à 80% (quasi-totale), du pont SNCF	88
Figure 74 : Q100 obstruction à 80% du pont SNCF (quasi-totale). Superposition des résultats bruts de modélisations (toutes rhéologies confondues), des cheminements préférentiels et des classes d'intensité retenues	89
Figure 75 : Cartographie de l'intensité et emprise de la Q100 du sous scénario obstruction à 80% (quasi-totale), du pont SNCF	90
Figure 76 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »	92
Figure 77 : vue en plan des hauteurs et des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très Visqueuse », ...	93
Figure 78 : En haut à gauche « Visqueux », en haut à droite « Fluide », en bas à gauche « Très fluide »	93
Figure 79 : : La hauteur pour Qexceptionnelle des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements	94
Figure 80 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue exceptionnelle pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction quasi totale du pont (rose)	95
Figure 81 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue exceptionnelle pour une rhéologie « Très Fluide », avec obstruction quasi-totale du pont (marron)	96
Figure 82 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue exceptionnelle pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu).....	97
Figure 83 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »	102
Figure 84 : L'emprise et la hauteur de Qextrême des 4 rhéologies modélisées En haut à gauche « Très Visqueux », en haut à droite « Visqueux », en bas à gauche « Fluide », en bas à droite « Très fluide »	103
Figure 85 : La hauteur pour Qextrême des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements	104

Figure 86 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue extrême pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction quasi totale du pont (rose).....	105
Figure 87 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue extrême pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale du pont (marron)	105
Figure 88 : obstruction du chenal en position 1 (entre la PDD et le pont de la RD) et en position 2 (à l'aval immédiat de la PDD)	106
Figure 89 : position des deux obstructions de chenal pour le scénario aggravant de la crue extrême	106
Figure 90 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue extrême pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu).....	107
Figure 91 : vue en plan des débordements (hauteurs) modélisés avec un hydrogramme de crue extrême avec obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « très Visqueuse » (rose), obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF » (violet) et obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu) obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF ». En rouge le cône de déjection géologique identifié dans l'étude RTM 2016 sur la base de la carte géologique du BRGM.	108
Figure 92 : Emprise de la crue extrême.....	109
Figure 93 : modélisation brute d la crue exceptionnelle (noir) et cartographie a dire d'expert de la crue extrême avec 3 niveaux d'intensité.	112
Figure 94 : géométrie de la plage de dépôt à rentrer dans le modèle.....	116
Figure 95 : ouvrage de fermeture de la plage de dépôt du Saint Antoine, VR3D	116
Figure 96 : Etat du chenal et du cône de déjection post crue 2014, P. Freydier pour INRAE	118
Figure 97 : Comparaison des hydrogrammes d'entrée et de sortie avec l'outil MCB pour une PDD de 23 000 m ³	119
Figure 98 : simulation du volume stocké par la plage de dépôt amont s'il était installé une barre horizontale à 3m de haut par rapport au fond du lit	121
Figure 99 : Comparaison des hydrogrammes d'entrée et de sortie avec l'outil MCB pour une PDD de 23 000 m ³ suivie d'une PDD de 25 000 m ³	121
Figure 100 : Principe de la modélisation après aménagement et résultat de la modélisation hec-ras 2D de la lave torrentielle centennale visqueuse, après les aménagements sus-cités, et après avoir simulé l'hydrogramme par le modèle MCB ONF-INRAE présentés au §7.1.	123
Figure 101 : tables des lignes d'écoulements calculées après les aménagements sus-cités.....	123
Figure 102 : profils en travers au droit des ouvrages des lignes d'écoulements Q100 calculées après les aménagements sus-cités.....	124
Figure 103 : profils en travers au droit de la digue située entre la passerelle et le pont de la RD	124
Figure 104 : profils en travers à l'aval de la passerelle	124
Figure 105 : profil en long des lignes d'écoulements Q100 calculées après les aménagements sus-cités	125

1 CONTEXTE ET OBJECTIF

1.1 Objectifs de l'étude hydraulique

Les objectifs de la présente étude sont de présenter les hypothèses, étapes de validation et résultats de la modélisation, y compris :

- La ligne d'écoulement dans le lit mineur et sous les ouvrages de franchissement,
- Les points de débordement,
- L'emprise, la hauteur et la vitesse d'écoulement sur la zone à enjeux.

1.2 Présentation du bassin versant et de la zone d'étude

Le Saint Antoine présente un bassin versant de forte pente, avec un sommet à 3080m, une confluence avec l'Arc à 1067m. et une pente moyenne de 30%.

La tête de bassin versant est érodée dans des schistes, placage glaciaire et éboulis.

En aval de la plage de dépôt, le chenal coule sur un cône de déjection. Celui-ci est urbanisé en partie aval, notamment par une zone industrielle, il est aussi traversé par la RD10006 et la voie ferrée du Lyon Turin.



Figure 1 : Carte de bassins versant, 5,5 km² (source RTM 2016, Google Earth)

Donnée / paramètre		Valeur	Unité
A	Surface du bassin versant	5,47	km ²
P	Périmètre	14,8	km
ZmaxBV	Altitude max du bassin versant	3080	m NGF
ZminBV	Altitude min du bassin versant	1067	m NGF
ZmoyBV	Altitude moyenne du bassin versant	2074	m NGF
H5%	Altitude pour laquelle 5 % des points sont au-dessus	2864	m
H50%	Altitude médiane	2323	m
H95%	Altitude pour laquelle 95 % des points sont au-dessus	1395	m
L	Longueur de plus long chemin hydraulique (planimétrie)	6,12	km
ZmaxCE	Altitude max du cours d'eau	2719	m NGF
ZminCE	Altitude min du cours d'eau	1067	m NGF
Δ	Dénivelée totale du cours d'eau	1652	m

i	Pente moyenne du cours d'eau	30	%
D	Dénivelée	1495	m
Ds	Dénivelée spécifique	531	m
Ig	Indice global de pente	0,227	m/m
Kg	Coefficient de Gravelius ou de compacité	1,79	-

Figure 2 : Caractéristique topographique du bassin versant (source RM 2016)

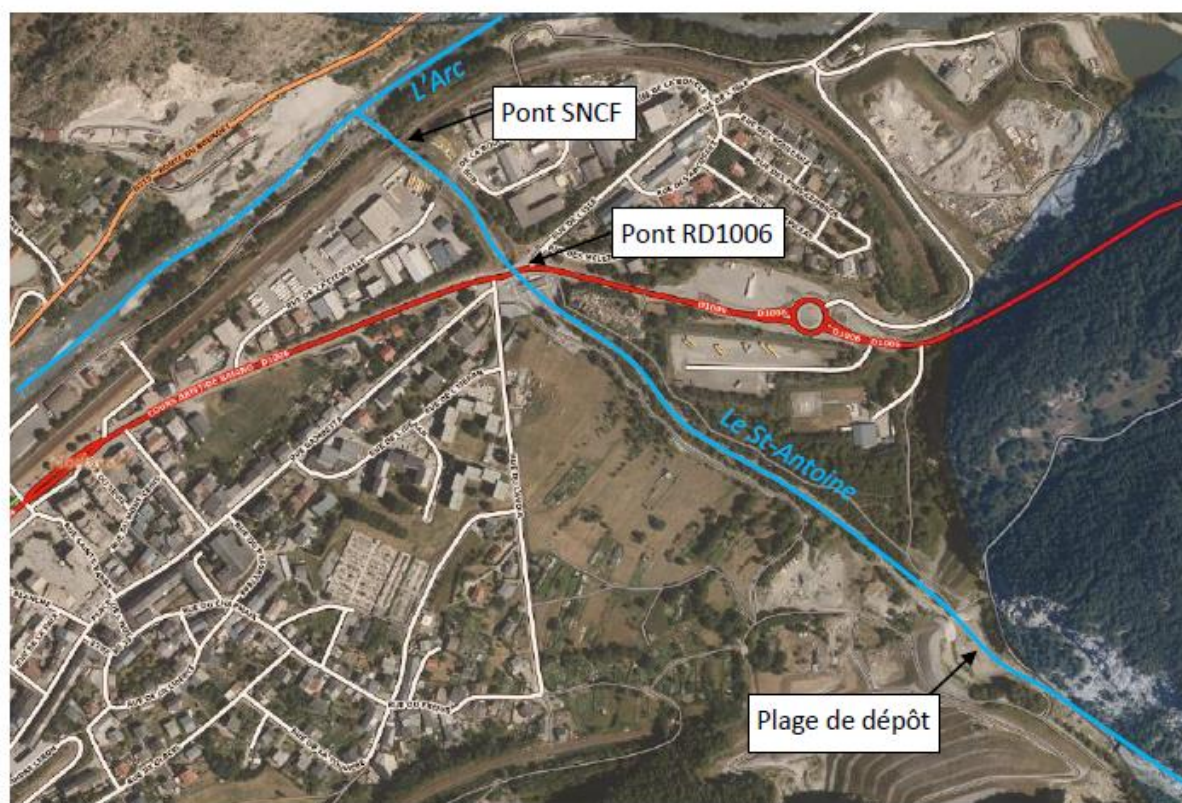


Figure 3 : Localisation des ouvrages le long du St-Antoine dans la traversée de Modane (source SPM)

1.3 Aléas rencontrés qui font l'objet de la demande d'aménagement

1.3.1 Laves torrentielles

Le torrent du Saint-Antoine est un torrent qui a occasionné d'importants dégâts par le phénomène de lave torrentielle sur son cône de déjection au cours du XIX^{ème} siècle.

La lave torrentielle de 1987 :

Une lave torrentielle de l'ordre de la lave centennale, d'un volume estimé entre 60 000 et 80 000 m³ a provoqué obstruction du pont de la RD1006 (qui a été refait en 2023/2024) et le pont de la zone industrielle. Les débordements ont été généralisés (la route et les voies ferrées sont coupées. Les débordements atteignent 16 bâtiments et 75 garages) . Il n'y avait pas de plage de dépôt. Les dégâts ont été estimés à 7,62 millions d'euros, dont 2,22 millions pour les 2 jours de coupure de la voie SNCF et les réparations (dossier DIG/étude d'impact). Cette crue est la plus forte connue sur le Saint-Antoine.



Figure 4 : Vue sur le cône de déjection du Saint-Antoine et le lit aval après la crue de 1987 (RTM)

La crue de 2014 :

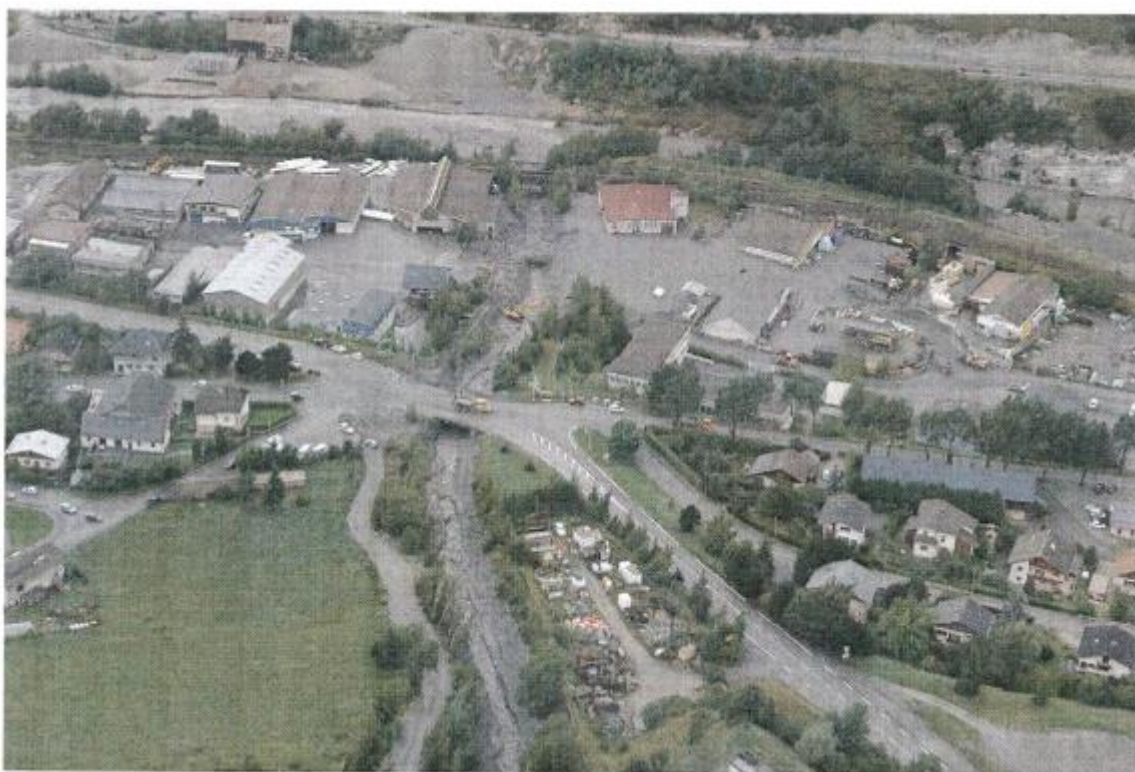
Après la crue de 1987, une plage de dépôt de l'ordre de 17 000 m³ a été construite en 1991.

En 2014, une lave torrentielle de l'ordre de la trentennale à cinquantennale avec un volume estimé autour de 50 000 m³ a provoqué l'obstruction du pont de la RD1006 et le pont de la zone industrielle.

La plage de dépôt s'est remplie de matériaux et a déversée.

Les débordements sont moins étalés qu'en 1987, mais tout de même économiquement très importants (rambardes du pont de la RD 1006 arrachées, coupure de l'eau potable et de la sécurité incendie pour le quartier, conduite arrachée sous le pont de la RD1006, coupure de réseau d'eaux usées et rejet dans l'Arc durant quelques jours, pont de la ZA en aval de la RD obstrué, 13 bâtiments industriels et une habitation engravés en aval du pont de la ZA (par 2 m à 0.5 m de lave), façades métalliques arrachées, vingt bus déplacés, voie ferrée engravée avant le pont SNCF).

Le fond du lit de l'Arc a été réhaussé d'environ 3 m au droit de la confluence.



La crue de 2023 :

Après la crue de 2014, des travaux ont été engagés en 2017 pour porter la capacité de la plage de dépôt à 23 000 m³ et rehaussé les crêtes.

Plus récemment, les travaux de reconstruction du pont de la RD1006, achevés à l'automne 2023, ont permis d'augmenter le gabarit de l'ouvrage et le petit pont cadre de la zone industrielle a été enlevé et remplacé par une passerelle piétonne.

Le 13 août 2023 un orage localisé a déclenché une lave torrentielle dans le Saint Antoine, qui n'a pas débordée.

Elle a par contre eu pour conséquence un engravement à la confluence (8000m³), sous le pont de la RD1006 (2m de haut environ 6000 m³) et dans la plage de dépôt (9000 m³) (REX SPM).

La plage de dépôt n'a pas été bloquée, la lave est visiblement très fluide d'après les photos des dépôts, sans présence de gros blocs. Malgré le fait qu'elle ne se soit pas bloquée, la lave a quand même déposé

8 000 m³ de matériaux probablement parce que la pente de la plage de dépôt est faible et a entraîné une divagation. La plage de dépôt n'était pas aménagée par un chenal de guidage fusible.



Figure 3 : Plage de dépôt, le 14/08/2023



Figure 4 : Plage de dépôt, le 14/08/2023



Figure 5 plage de dépôt à la suite de la crue de 2023 (RETEX SPM)

Les traces de boue attestent que les écoulements ont atteint l'arase de la protection en enrochements sous les ponts. Des projections ont atteint la poutre inférieure du pont SNCF.

1.3.2 Erosion

Depuis 2014, il est constaté de l'érosion sur les berges du Saint Antoine, comme en témoigne cette petite anse d'érosion en amont du pont.



Figure 6 : Anse d'érosion en amont du pont de la RD1006, avril 2024

L'érosion constatée est logique étant donné la pente des berges proches de la verticale et la présence de très gros blocs.

De plus le curage de la plage de dépôt en 2014 a été important. La pente résultante fut beaucoup plus faible que la pente d'équilibre du torrent, conduisant à des dépôts préférentiels et diminuant la continuité sédimentaire normale du torrent.

Les anses d'érosion sont cependant d'amplitude faible, les enjeux ne sont pas menacés, et la situation tendra à redevenir comme avant 2014 suite aux ajustements de pente qui ont suivi l'aménagement de la plage de dépôt en 2017. De plus, des anses d'érosion font parties des évolutions morphologiques normales et attendues d'un torrent aussi actif avec des berges sans protection.

Une EDD des digues est en cours d'instruction sur la zone.

Afin d'être le plus transparent possible au transport solide, la pente de la plage de dépôt du projet tend vers la pente d'équilibre du torrent, soit 9%. Cette configuration s'appuie sur les travaux et le retour d'expérience de l'INRAE RTM sur les torrents du Manival et du Claret (Piton et al 2018¹). Ils montrent que pour qu'une plage de dépôts soit transparente au transport solide, et pour éviter les phénomènes d'érosion à l'aval, sa pente doit s'approcher raisonnablement de la pente d'équilibre du torrent.

Il sera proposé de créer un chenal préférentiel dans la plage de dépôt, afin de privilégier la continuité sédimentaire des petits événements et limiter ce type d'érosions.

Du génie végétal fusible pourrait aussi être proposé sur les berges dans la mesure du possible.

¹ Direct field observations of massive bedload and debris-flow depositions in open check dams, Guillaume Piton1,*, Firmin Fontaine, Hervé Bellot, Frédéric Liébault, Coraline Bel, Alain Recking, Thérèse Hugerot2, River Flow 2018

1.4 Profil en long

1.4.1 Saint Antoine

La Figure 7 présente le profil en long du Saint Antoine de la plage de dépôt à la confluence avec l'Arc et la comparaison de 2021 et 2024 et la Figure 8 le profil en long de 2024 sur le cône de déjection.

On remarque que :

- Globalement, la pente est très régulière et de l'ordre de 9.4 % à 10.4 %.
- Il n'y a pas d'évolution majeure sur le profil en long entre 2021 et 2024. En revanche, la plage de dépôt s'est partiellement remplie entre ces deux dates. Il y a tout de même une légère incision et réduction de pente en amont du pont de la RD en 2024.
- Le profil est plutôt régulier, il est marqué d'une perturbation nommée « gros bloc » qui se situe au PGHM et qui correspond à une niche d'arrachement en rive droite qui a fait tomber des gros blocs (Figure 9). On note aussi la présence de canalisations apparentes bleues et rouges sur l'orthophoto, qui témoigne peut-être d'un ancien passage de canalisation protégé ou plus probablement de déchets de chantier.
- Une zone de dépression entre « gros bloc » et la passerelle. En faisant rejoindre les zones de pente plutôt à l'équilibre, cette zone de dépression fait apparaître une pente du secteur à 9.4 % (violet).
- Dans la zone proche du pont de la RD la pente diminue à 4.6% sur 40m puis 6.2% sur 50 m, ce qui favorise les dépôts sous le pont. Cela peut être dû aux travaux de construction du pont, et à l'élargissement du lit, qui favorise les dépôts et la réduction de pente (Figure 20).

Cette analyse est similaire à celle d'ETRM (2018), puisque le profil en long présentait aussi une pente globale similaire (9.4%), une dépression, et un replat au niveau du pont de la RD.

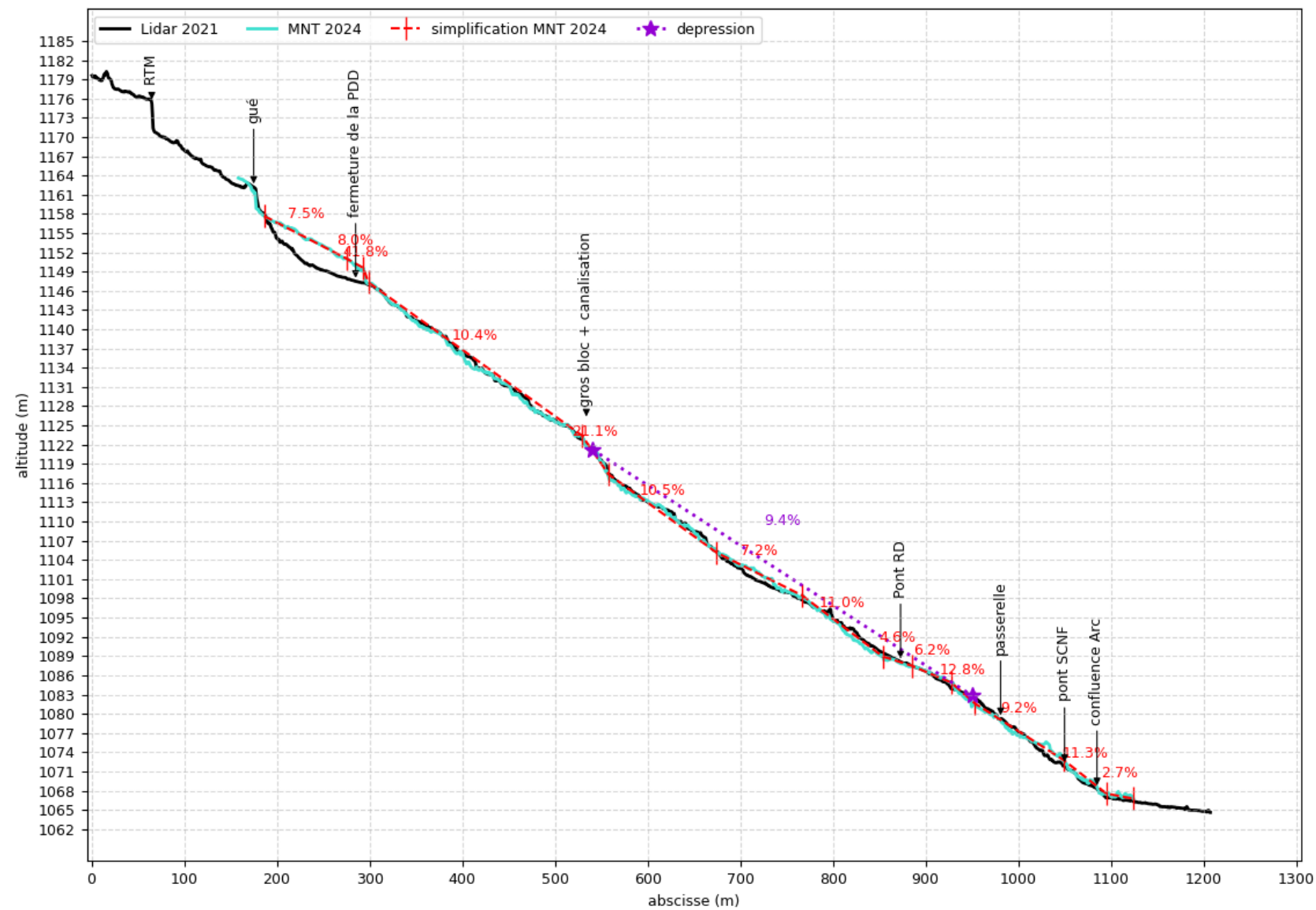


Figure 7 : Profil en long du Saint Antoine, Lidar2021, MNT 2024 et simplification

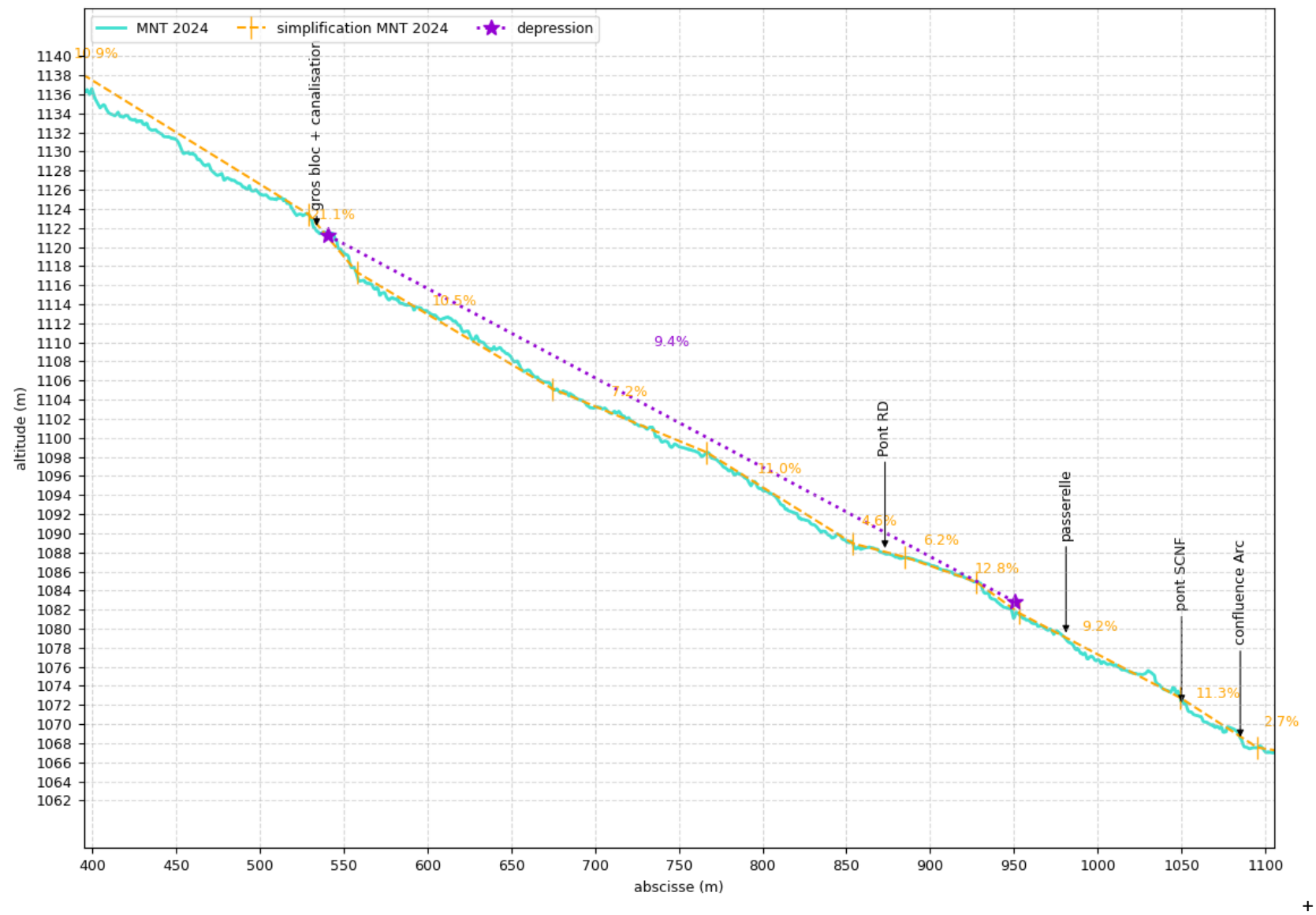


Figure 8 : profil en long du Saint Antoine sur son côté de déjection, MNT2024 et sa simplification



Figure 9 : zone de « gros bloc », anse d'érosion visible en rive droite et restes d'une canalisation traversante

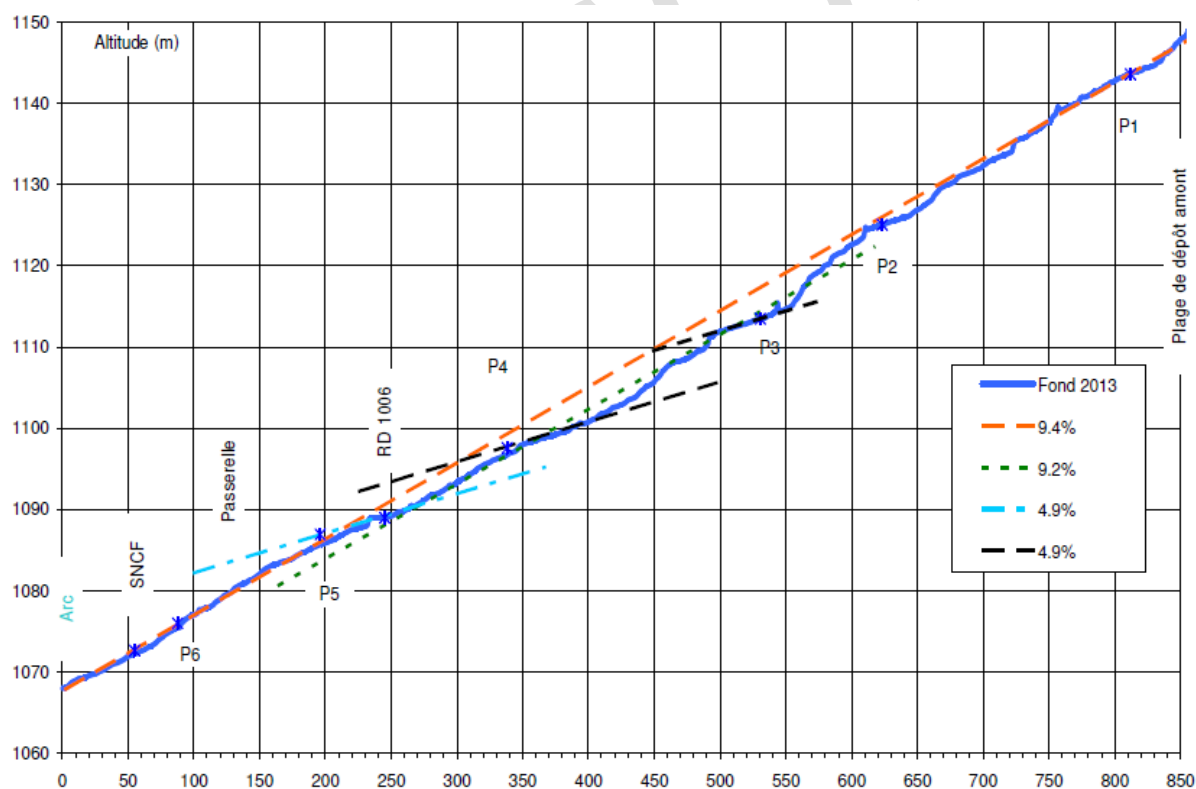


Figure 10 : Extrait d'ETRM 2018. Profil en long du Saint Antoine, Lidar 2014

1.5 Présentation des ouvrages

1.5.1 Plage de dépôt

1.5.1.1 Historique

Une plage de dépôt a été construite 800m en amont de la confluence suite à la crue de 1987 qui avait été particulièrement dévastatrice notamment parce que les blocs s'étaient propagés jusque dans le chenal avant et avaient provoqué des débordements.

Elle avait une capacité de 17 000 m³ pour une pente de dépôt de 4% (RTM2016). L'ouvrage présentait une largeur de 5m (et des IIPN horizontaux qui ont été arrachés par la crue en 2014).

Lors de la crue en 2014 elle avait permis de retenir beaucoup de gros blocs et avait montré son efficacité puisqu'elle s'était remplie complètement (Figure 11).

L'arrêt des blocs a certainement été l'élément le plus important pour éviter les débordements dans le chenal central et sous le pont de la RD qui n'a que très peu débordé.



Figure 11 : plage de dépôt suite à la crue de 2014 source ONF-RTM et ETRM 2018

La plage de dépôt a été reconstruite suite à la crue de 2014, étant donné son sous dimensionnement par rapport au volume de crue, son absence de déversoir efficace (une partie de la lave est passée sur la digue) et des fruits latéraux trop faibles du remblai. Elle a été dimensionnée pour un volume de stockage de 23 000 m³ à la pente de dépôt de 4%.

Après reconstruction, le fond du lit est à 1148 mNGF et la largeur de l'ouvrage de fermeture, entre les deux plaques béton de 4.8 m (DOE recollement Guintoli).

Suite aux mesures de VR3D 2024, l'ouvrage de fermeture présente bien une largeur de 4.8 m au sommet des plaques béton mais 4.55 m au pied et un fond de lit à 1149.62 à la date du levé, soit 1.6m au-dessus du niveau du fond.



Figure 12 : Plage de dépôt, avril 2024

1.5.1.2 Capacité actuelle

La figure suivante présente la courbe hauteur volume de la plage de dépôt actuelle (juillet 2024) réalisée en 3D sous Autocad, par projection d'une pente de dépôt à partir de l'altitude des dépôts potentiels à la fermeture.

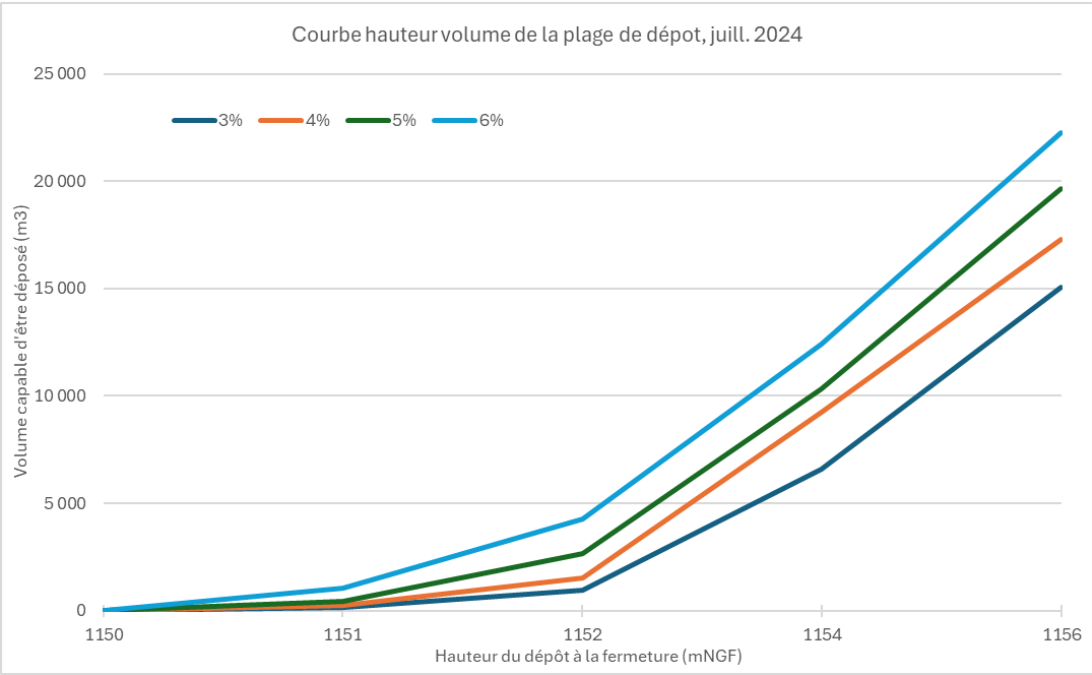


Figure 13 : Courbe hauteur volume pour plusieurs pentes de dépôt possible

Tableau 1 Relation hauteur volume pour plusieurs pentes de dépôt possible

Pente	3%	4%	5%	6%
Hauteur dépôt (mNGF)	Volume (m³)			
1150	8	10	13	22
1151	147	229	425	1066
1152	960	1544	2680	4279
1154	6607	9245	10315	12421
1156	15063	17283	19677	22258

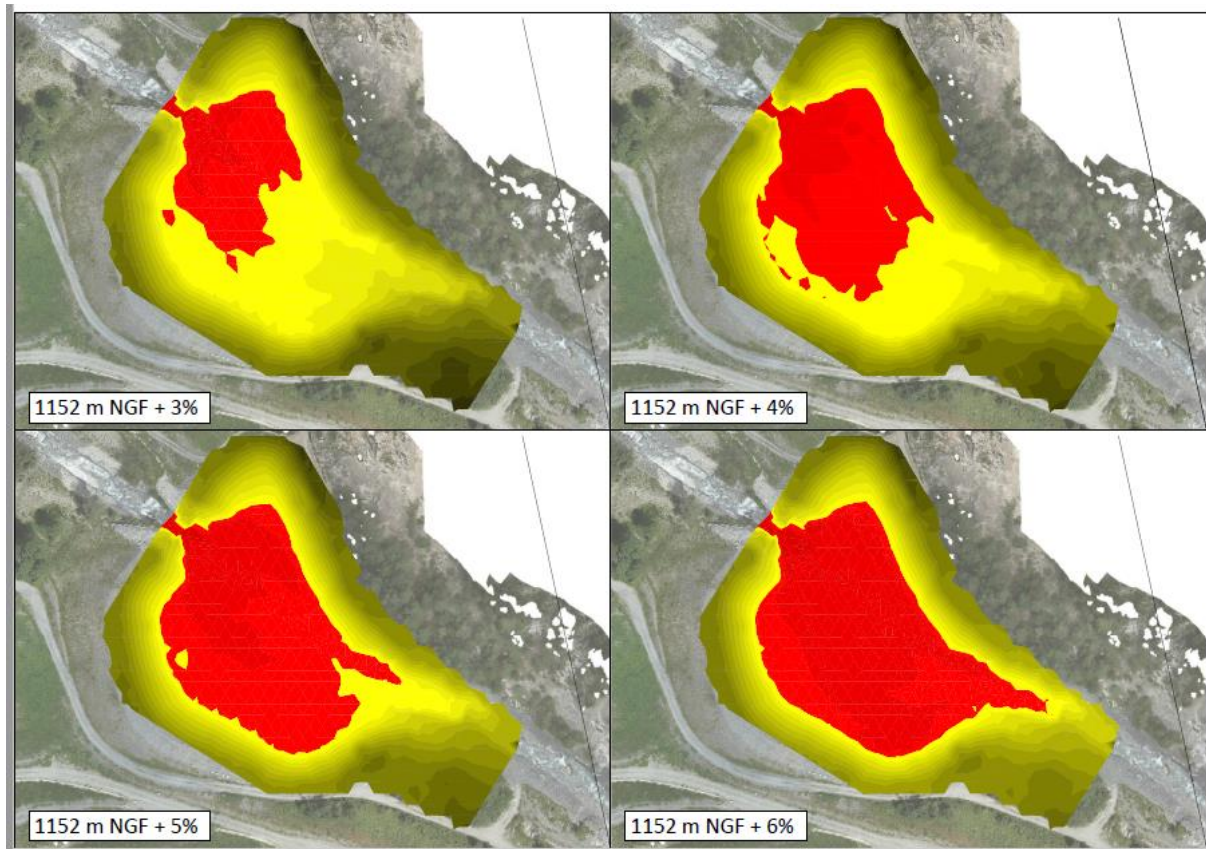


Figure 14 : Illustration de la méthodologie du calcul de la courbe hauteur volume

On remarque qu'à 4% (la pente de dépôt théorique), la plage de dépôt permet de stocker 17 000 m³. Ce volume est inférieur au 23 000m³ théorique.

La comparaison des niveaux de dépôt dans la plage au cours du temps permet de l'expliquer.

La figure suivante présente une coupe longitudinale de la plage de dépôts sur le lidar 2021 (IGN) et le MNT 2024 levé par Drone (VR3D). On remarque un dépôt relativement important entre 2021 et 2024, probablement lié à la crue d'août 2023 et aux événements de charriage courants.

Les pentes de 4% et 5% sont projetées théoriquement sur le graphique à partir de l'altitude 1156 mNGF, comme la situation post crue de 2014. On remarque que le volume sous le profil longitudinal est environ deux fois inférieur en 2024 qu'en 2021.

La courbe hauteur volume pour la pente de 4 % (Figure 16) montre bien une réduction du volume de dépôt possible de plus du double pour les petits volumes et de 20% pour les forts.

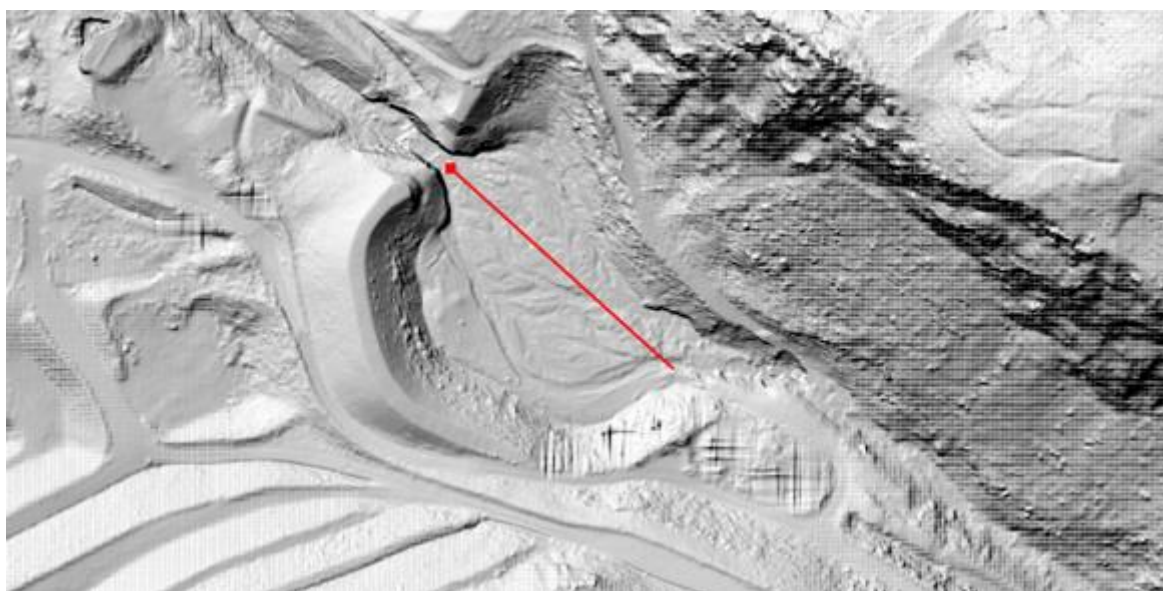
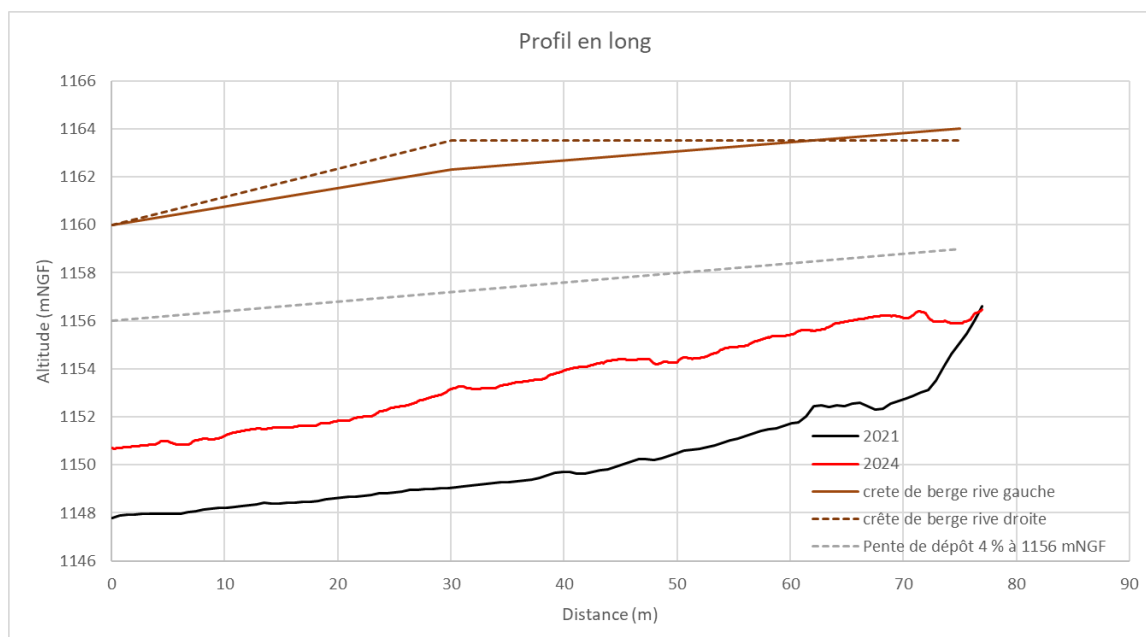


Figure 15 : Profil en long de la plage de dépôt et projection sur le Lidar de 2021 et le MNT de 2024

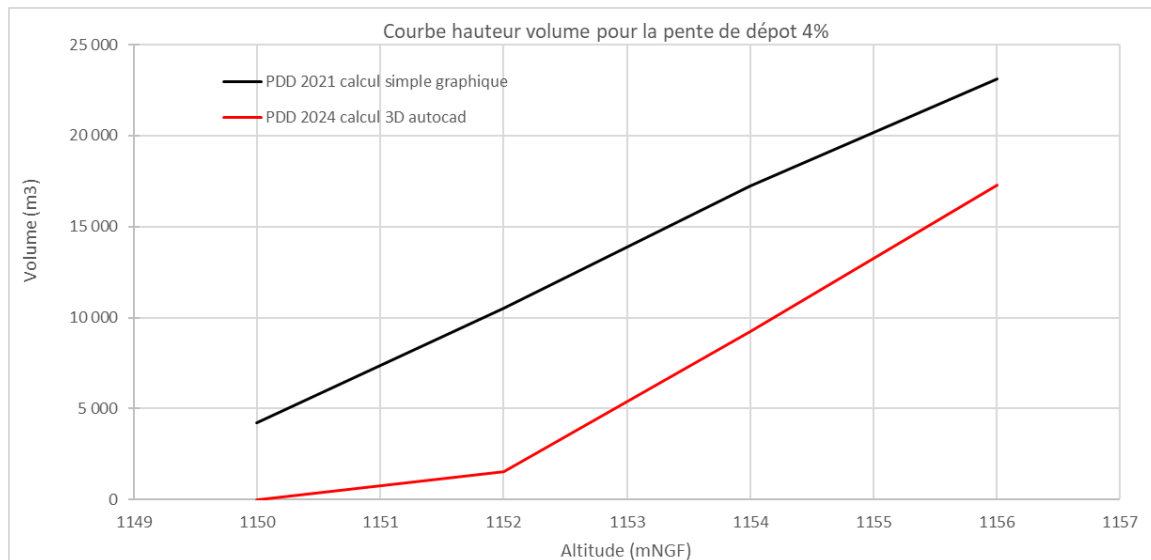


Figure 16 : comparaison des courbes hauteur-volume pour la plage de dépôt en 2021 et 2024, pour la pente de dépôt de 4%

Au bilan, étant donné que la pente de dépôt a été estimée autour de 4% (RTM216), la capacité de la plage de dépôt est bien de 23 000 m³ théoriquement (analyse du lidar 2021), mais elle n'est que de 17 000 m³ actuellement (analyse du MNT de juillet 2024).

Cette analyse montre aussi que l'ordre de grandeur des dépôts qui peuvent être occasionnés par une crue courante comme celle de 2023, ou par des épisodes de charriage classiques qui se déposent dans l'élargissement de la plage, est de l'ordre de 6 000 m³.

Comme on peut le constater même un court intervalle de temps peut faire baisser la capacité de façon non négligeable.

1.5.2 Pont de la RD1006

Le pont de la RD1006 présentait en 2014 une ouverture de 8.3 m pour un tirant d'air de 4.2 m, soit une section de 35 m² (RTM2016). A 40 m en amont du pont la section hydraulique était de 40 m² et la pente au droit de la zone de 8 % (mesures de terrain).



Figure 17 : Pont de la RD1006 après la crue de 2014

Le pont a été entièrement refait et terminé début 2024. La hauteur de la sous poutre amont varie de 1092.8 (rive gauche) à 1093.6 mNGF (rive droite).

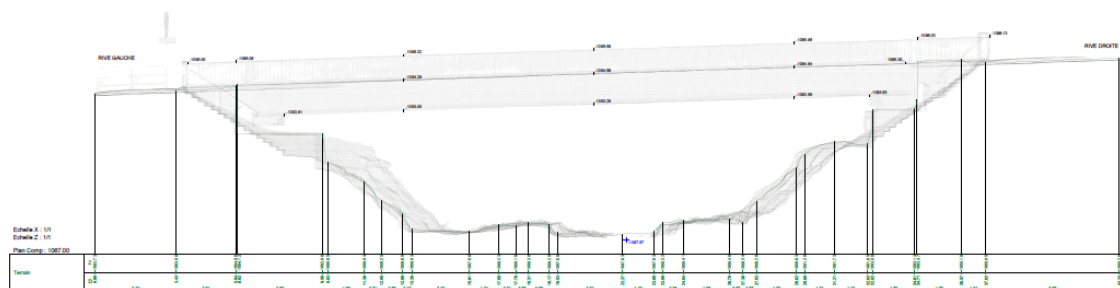
Il présente, à partir de 2024, un tirant d'air compris entre 5.5 et 6.6 m selon le niveau du fond et une ouverture entre deux culées de 22 m, pour une surface hydraulique de 85 m².

Le fond du lit au droit pont sur 100 ml présente une zone de pente homogène de 6.3%.

Alors qu'auparavant le pont présentait une réduction de section hydraulique, La zone du pont présente maintenant un élargissement de section hydraulique, ce qui explique les dépôts et la diminution de pente.

La section hydraulique 40m en amont du pont fait 32 m², soit conforme à l'estimation du RTM en 2014 elle n'a a priori pas évolué.

AMONT

*Figure 18 : Pont de la RD 1006 avril 2024*

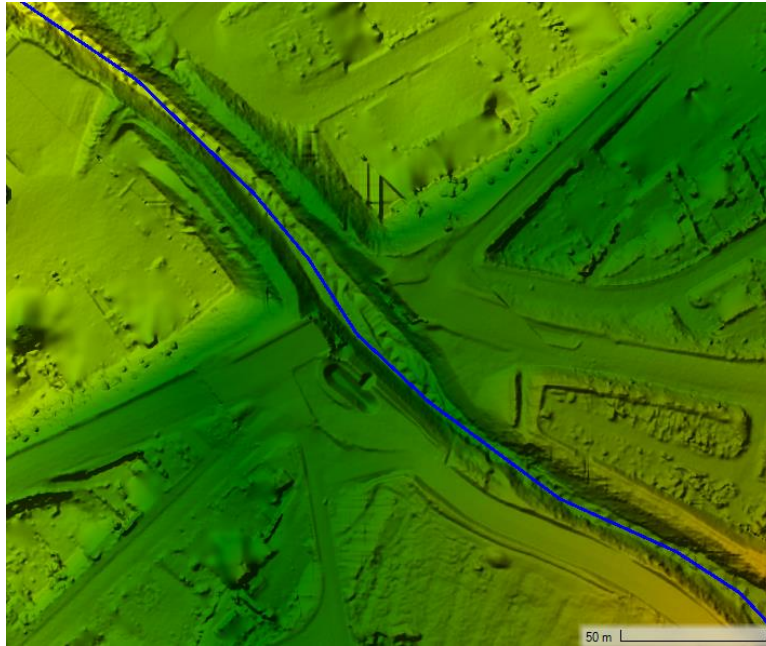


Figure 19 : MNT 2024 au droit du pont, vue en plan



Figure 20 : Orthophoto au droit du pont de la RD (VR3D)

1.5.3 Passerelle de la zone artisanale

Le pont cadre de 3m de haut par 5m de large, totalement bloqué en 2014 a été détruit et remplacé par une passerelle très haute et sans empiètement dans le lit.

Elle présente une ouverture de 14m et un tirant d'air de 6.1m (VR3D 2024).



1.5.4 Pont SNCF

Il présente une ouverture de 19.9 m et un tirant d'air de 4.4 m en face amont (5.4m en face aval).

AMONT

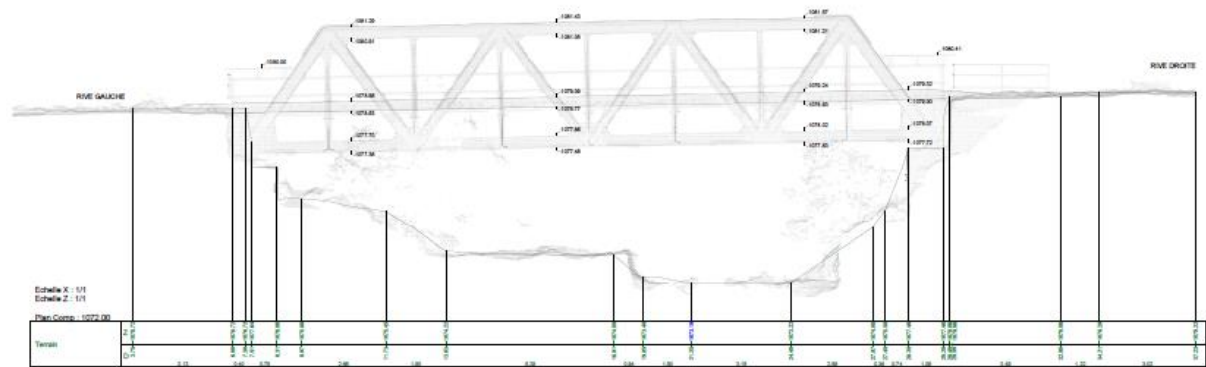


Figure 22 Pont SNCF, avril 2024

2 RAPPEL DE LA METHODOLOGIE

2.1 Logiciel HEC-RAS

Les modèles ont été construits à l'aide du logiciel HEC-RAS 6.2, qui offre une gamme complète d'outils et de fonctionnalités pour réaliser la modélisation hydraulique à surface libre dans diverses situations. En hydraulique à surface libre, il est mondialement reconnu et utilisé pour le calcul des emprises, hauteurs et vitesses des cours d'eau et de leur débordement.

Le logiciel HEC-RAS utilise la méthode des différences finies pour résoudre les équations de Saint-Venant qui décrivent l'écoulement à surface libre dans le lit mineur et sur la plaine inondable. Il prend en compte des paramètres tels que la topographie, les caractéristiques du lit du cours d'eau, les ouvrages hydrauliques et les conditions d'écoulement imposées.

En 2020, les ingénieurs ont ajouté un module qui permet de prendre en compte la rhéologie non-newtonienne. Plusieurs lois rhéologiques sont implémentées dans HEC-RAS. La loi qui nous intéresse pour répondre à cette étude et la loi viscoplastique de Herschel-Bulkley. En effet, cette loi permet de reproduire le comportement rhéologique des laves torrentielles boueuses dans les Alpes françaises (thèse et publications de Coussot²).

2.2 Caractéristiques des modèles hydrauliques

2.2.1 Géométrie du modèle

Le tableau suivant montre le nombre de profils en travers et les ouvrages modélisés.

Tableau 2 : Répartition des profils en travers et des ouvrages hydrauliques dans les modèles 1D

Modèle 2D	Maille	Ouvrages de franchissement
Saint Antoine	10 m	3

Le maillage est composé de cellules suffisamment petites pour s'adapter à la topographie du cours d'eau et de la zone, mais suffisamment grande pour permettre la stabilité du modèle. La taille de 10m a été validée en ce sens après plusieurs essais.

2.2.2 Condition aux limites

Les conditions amont sont les hydrogrammes calculés dans les études hydrologiques préalables.

La condition limite aval du modèle est classique, c'est la hauteur d'eau normale.

2.2.3 Coefficient de Manning

La rugosité du fond du lit mineur est prise en compte par la loi de Manning., mais ce paramètre joue un rôle mineur dans le cas d la modélisation de lave torrentielle.

Dans le modèle 2D, les valeurs retenues sur la plaine inondables sont les suivantes :

Tableau 3 : Coefficients de Manning pour le modèle 2D

Occupation du sol	Coefficient de Manning n (s/m ^{1/3}) – Ks (1/n)
Zone urbaine route et parking	0.02 (50)
Zone agricole, terrain herbeux	0.025 (40)
Habitat dispersé	0.025 (40)
Lit mineur, berge et zone chahutée	0.04 (25)
Forêt	0.1 (10)

² P. Coussot. Rhéologie des boues et laves torrentielles. Thèse de Doctorat, 1992 ; P.Coussot, 1994, Steady laminar flow of concentrated mud suspension in open channel, J. Hydraul. Res, 32, 535-559

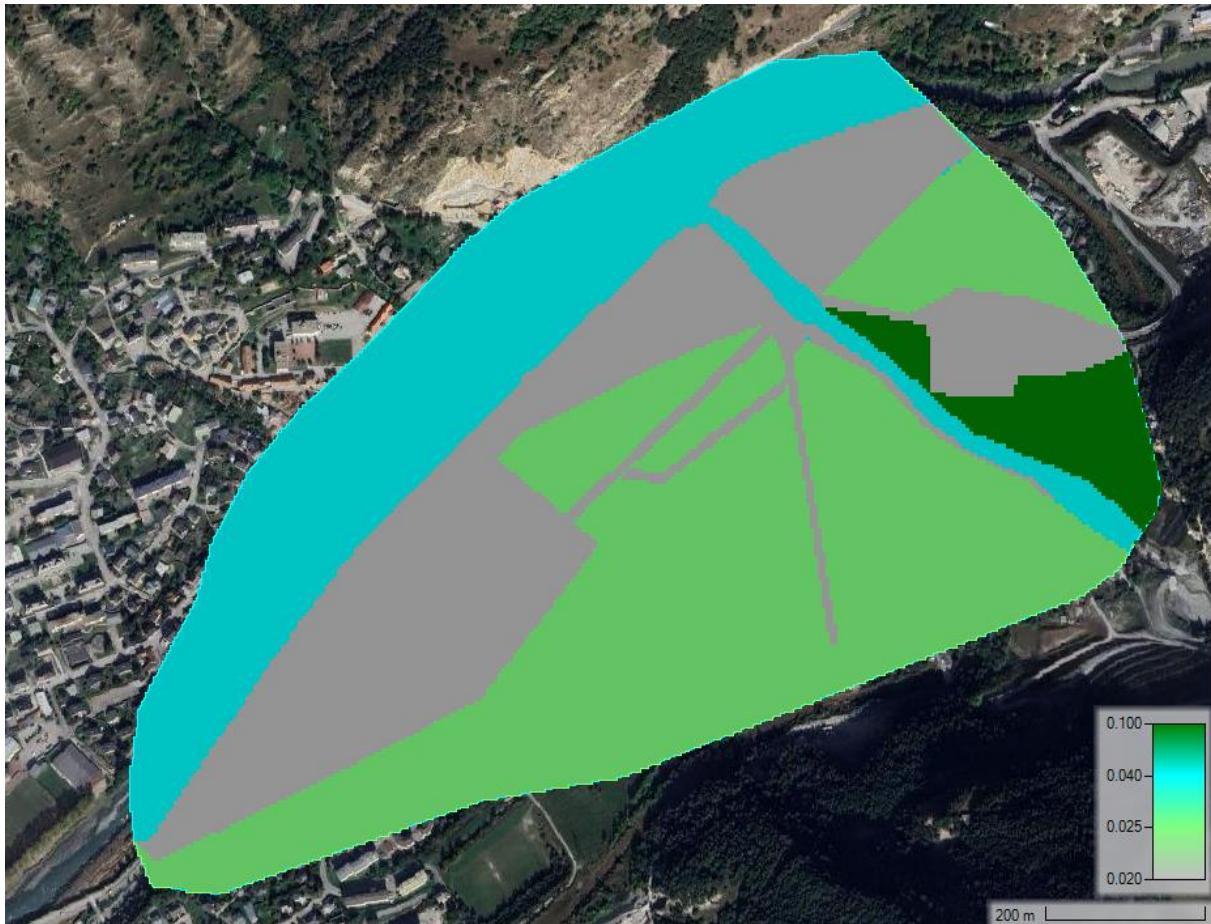


Figure 23 : répartition des coefficients de Manning sur la zone modélisée

2.3 Construction du modèle hydraulique

2.3.1 Zone d'étude

Le modèle hydraulique s'étend sur un linéaire d'environ 700 m, de la PDD amont jusqu'à la confluence avec l'Arc et inclus le lit de l'Arc sur l'ensemble du cône de déjection (1000 m environ).

Les données topographiques utilisées pour construire la géométrie du modèle sont :

- Le MNT au pas de 50 cm issus des données de l'IGN de la campagne LIDAR Haute Définition de 2021 pour l'ensemble des zones potentiellement inondables (lit majeur)
- Le MNT issus des mesures du géomètre VR3D pour le lit mineur et les berges et l'emprise du projet d'aménagement (1 point tous les 50 cm, les lignes de rupture, une précision verticale centimétrique).

Tous les ouvrages de franchissement ont été intégrés au modèle. Leurs dimensions ont été mesurées par le cabinet de géomètre VR3D.

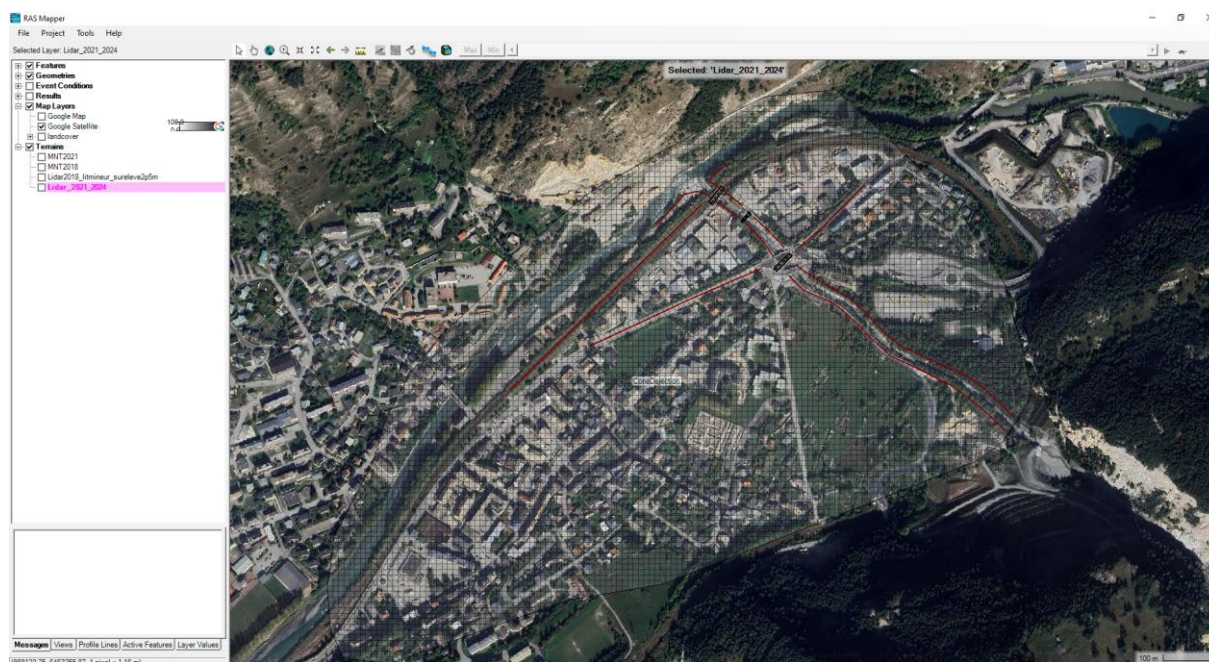


Figure 24 : Aperçu des fenêtres de commande principale dans l'interface HEC-RAS 2D avec fond de plan google satellite (module RAS-MAPPER)

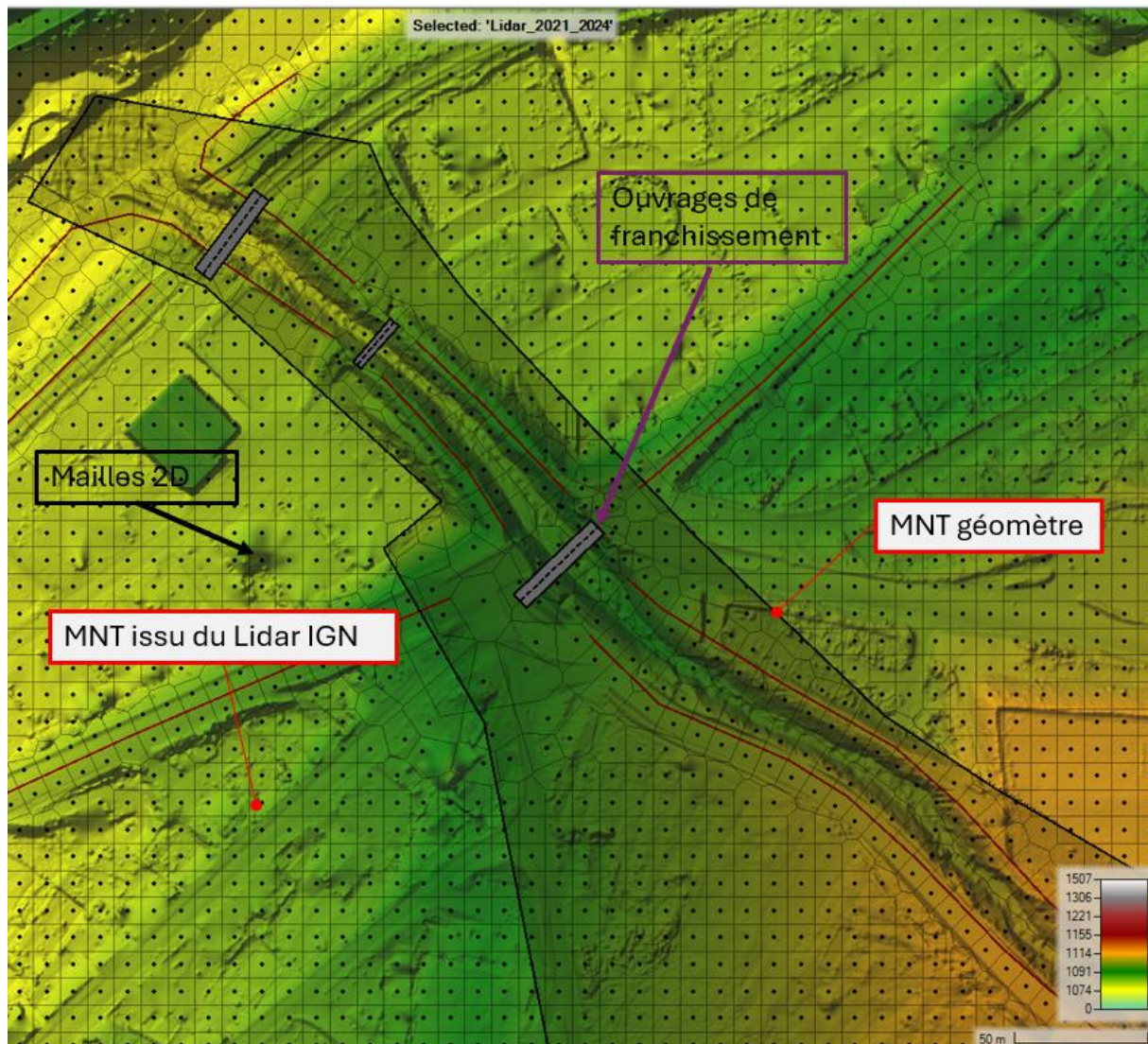


Figure 25 : vue en plan du modèle centrée sur la zone d'étude

2.4 Modèle rhéologique

La loi rhéologique de Herschel-Bulkley a été confirmée par différents auteurs comme étant représentative du comportement d'une lave torrentielle boueuse (Coussot 1992, Ancey, 2001). L'INRAE a d'ailleurs développé en 1995 un modèle qui utilise la loi de Herschel-Bulkley avec l'équation de fermeture de Coussot² pour modéliser les laves torrentielles boueuses (non disponible directement pour l'ingénieur).

Or, les laves torrentielles du Saint-Antoine présentent un comportement typiquement boueux, conféré par la matrice fine qui est constituée principalement d'argile. C'est donc la loi viscoplastique de Herschel-Bulkley qui sera utilisée dans cette étude.

Le modèle HEC-RAS 2D non-newtonien a été vérifié et validé par les développeurs du modèle avec des expériences en modèle physique de grande dimension et sur des cas de terrain³.

Ce modèle utilise les équations Saint-Venant et ajoute comme loi de résistance, la loi rhéologique de Herschel-Bulkley, qui s'exprime comme suit :

$$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n$$

$$\text{Si } \tau \leq \tau_c \text{ alors } \dot{\gamma} = 0$$

Où τ est la contrainte cisaillement [Pa], $\dot{\gamma}$ est la vitesse de cisaillement [s^{-1}], K le coefficient de viscosité du modèle de Herschel-Bulkley ou consistance [$Pa.s^n$], et n l'indice d'écoulement [-].

Nous effectuerons un calage du modèle sur les événements documentés de 2014 et 1987, dont les emprises seront fournies par le maître d'ouvrage. Dans la mesure du possible le modèle sera calé sur l'emprise et/ou sur la hauteur. Pour caler le modèle sur la crue de 2014, la géométrie du pont antérieur à 2014, si elle est fournie par le maître d'ouvrage, sera utilisée. Dans la mesure du possible et si l'analyse topographique montre que cela est possible, un seul Lidar sera utilisé (2021).

Nous effectuerons des tests de sensibilités sur les paramètres rhéologiques et le volume (ainsi que sur le débit de pointe si cela est pertinent).

Les paramètres rhéologiques sont difficiles à déterminer, puisque d'une part ils sont très difficilement mesurables (beaucoup de biais), et les coulées peuvent présenter une rhéologie très différente dans l'espace et dans le temps. Par exemple, Coussot² a mesuré sur une même lave torrentielle des contraintes seuils variants entre 300 et 3000 Pa, notamment lié à la concentration volumique. La meilleure méthode consiste donc à tester une gamme enveloppe de paramètres rhéologiques plausibles.

Les travaux de Coussot² sur des prélèvements de laves torrentielles et leur analyse rhéométrique, montrent :

- Le paramètre n converge vers 1/3.
- La masse volumique de la lave ρ varie entre 2000 et 2300 kg/m³.
- La contrainte seuil τ_c peut varier entre 500 et 10 000 Pa. L'analyse de la bibliographie et des photographies nous permet de réduire cet intervalle.
- Le paramètre K/τ_c varie entre 0.1 et 0.5 et converge autour de 0.3.
- Le paramètre τ_c / ρ : varie entre 0,4-0,5 pour des laves très fluides et 3-4 pour des laves très visqueuses. Il est autour de 1 pour des laves de fluidité moyenne.

Les effets de la rhéologie des laves sur les conditions d'étalement sont les suivants : les laves fluides (τ_c faible) auront tendance à s'étaler plus loin, mais atteindront des hauteurs maximales inférieures à des laves plus visqueuses.

3 CARACTERISTIQUES DES CRUES

3.1 Volume de lave et débits de pointe

Le volume de lave des différentes occurrences a été estimé par le RTM en 2009 (rapport de Peteuil) par comparaison d'approches géomorphologiques, hydrologiques régionales et issues de formules de

³ Sanchez, Alejandro ; Gibson, Stanford ; Ackerman, Cameron ; Floyd, Ian, 1D and 2D Debris Flow Modeling with HEC-RAS

la littérature. Le volume de lave des deux crues historiques a été estimé par des experts par suite des visites de terrain. Il est estimé de 57 000 m³ (entre 40 000 et 60 000) pour la crue de 2014 et à 80 000 m³ (entre 55 000 et 80 000) pour la crue de 1987.

L'analyse des hydrogramme a été initié par une approche hydraulique par Meunier (1991). L'estimation des débits a ensuite été affinée par le RTM en 2009 (rapport de Peteuil) avec l'approche empirique de Mizuyama et l'approche à dire d'expert de l'hydrogramme triangulaire. Les débits affinés ont été confirmé par l'EBR de du RTM en 2016 et l'étude ETRM en 2018.

Le tableau suivant en résumé les conclusions :

Scénario	Volume (m ³)	Débit maximum (m ³ /s)
Fréquent	35 000	75
Assez rare	55 000	100
Rare	80 000	150
Exceptionnel	120 000	200
Maximum probable	170 000	300

3.2 Hydrogrammes

Les hydrogrammes sont nécessaires comme donnée d'entrée dans la modélisation. Ils représentant la répartition du volume précédemment estimé dans le temps.

La forme des hydrogramme de type lave torrentielle est très peu documentée. L'exploitation d'un signal géophone sur le torrent du Claret (73) montre un hydrogramme avec un pic de débit se produisant au tout début de l'événement de crue, assimilé à un triangle rectangle (mémoire de recherche Leborgne 2022).

L'hydrogramme triangle rectangle est aussi utilisé par le RTM (2009 2016) pour estimer le volume de crue des laves torrentielles. Dans ETRM 2018, les laves torrentielles présentent un fonctionnement par bouffée, et chaque bouffée prend la forme d'un hydrogramme en triangle rectangle. Après avoir testé des hydrogramme rectangle avec une pointe qui dure l'essentiel de l'hydrogramme, ETRM valide finalement une pointe qui se produit au début sur une durée courte suivi d'une décroissance ce qui confirme l'utilisation opérationnel du triangle rectangle.

L'analyse de de la crue de 1987 montre une durée totale d'environ 30min (RTM 2016) et le RTM précise utilise une durée de base de 15minutes.

Connaissant le débit de pointe, le volume, la durée de l'évènement (entre 15min pour la partie intense et 30min au total) ainsi que la forme caractéristique de l'hydrogramme d'une lave (triangle rectangle avec un pointe très rapprochée du début de le crue), les hydrogrammes de crues sont estimés ci-dessous :

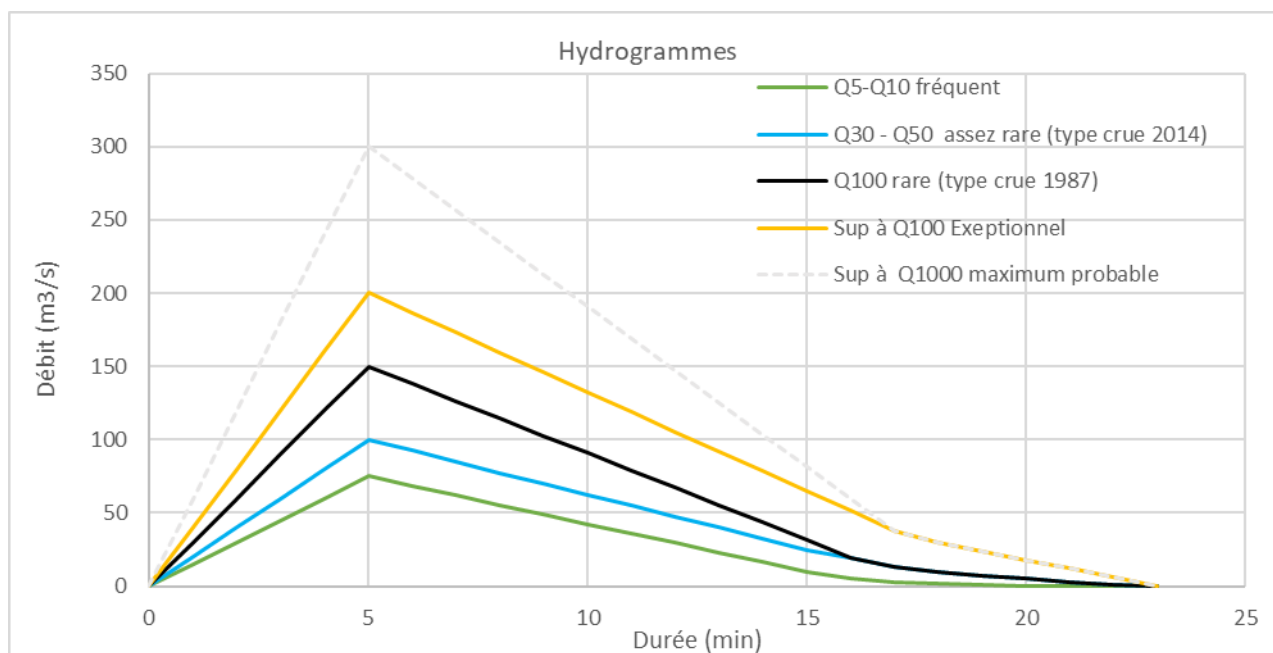


Figure 26 : Hydrogrammes estimés pour les différentes occurrences de crue

Pour la crue de 2014 il n'a pas été estimé de réduction de l'hydrogramme lié à l'interception de la plage de dépôt, c'est donc l'hydrogramme assez rare qui sera utilisé.

Pour la crue de 1987 c'est l'hydrogramme rare qui est utilisé.

3.3 Rhéologie

3.3.1 Loi de comportement de Herschel Bulkley

Contrainte seuil (τ_c)

ETRM 2018 a analysé finement les débordements de la crue de 1987 et 2014 et a calculé les contraintes seuil nécessaires pour expliquer ces débordements.

Il en déduit une contrainte seuil entre 1200 et 2000 et un majorant à 2650 Pa.

Le tableau suivant est issu de son analyse et présente les 3 rhéologies possibles sur le Saint Antoine, qui vont de la lave la plus fluide probable à la plus visqueuse probable.

Type de lave	τ_c	K	τ_c/ρ
Fluide	1265	380	0.55
Plutôt visqueuse	1955	587	0.85
Visqueuse	2645	794	1.15

La lave « la plus visqueuse » est considérée comme improbable, du fait que c'est la contrainte qu'il faudrait pour déborder en aval immédiat de la plage de dépôt. Cependant il n'est pas exclu qu'une partie de la lave et durant un bref instant présente ce type de contrainte. En revanche une telle viscosité sur l'ensemble du corps de lave durant toute la durée de l'événement est supposée de période de retour supérieure à 100 ans d'après l'étude (ETRM 2018).

Suite à l'évènement de 1987 le RTM (Peteuil 2009) a évalué une gamme de contrainte seuil plausibles en fonction de la distance de propagation, des lobes latéraux et de hauteurs des dépôts. Il a utilisé la relation suivante

$$h_c = \frac{\tau_c}{\rho g \sin \theta}$$

Avec h la hauteur du dépôt et θ la pente du terrain naturel sur laquelle s'est arrêté la lave.

Ainsi la contrainte seuil est estimée entre 860 et 2320 Pa ce qui est cohérent avec l'analyse d'ETRM. Il propose une gamme de contrainte plus faible, témoignant de la fluidité qui a permis des fortes distances de propagation en 1987. Cependant ces calculs ont été effectués sur la base des observations des débordements latéraux, un peu plus fluides que le corps de la lave car écrêtés des plus gros blocs.

Le RTM 2014 estime que les paramètres rhéologiques de la crue de 2014 sont similaires à ceux de 1987 et ne remettent pas en question les analyses de 2009.

Consistance (K) :

Les travaux de Coussot (1992) sur des prélèvements de laves torrentielles et leur analyse rhéométrique, montrent que le paramètre K/τ_c varie entre 0.1 et 0.5 et converge autour de 0.3.

Indice d'écoulement (n) :

Les travaux de Coussot (1992) montrent que le paramètre n converge vers 0.33 et il a adapté ses formules d'écoulement à cette valeur.

3.3.2 Concentration volumique et masse volumique

En général la concentration volumique varie entre 50% (très fluide charriage hyperconcentré) et 80% (pâteux).

Le logiciel hec-ras calcul la masse volumique de cette façon :

$$\rho_{lave} = C_v \rho_{solide} + (1 - C_v) \rho_{eau}$$

Avec :

C_v : concentration volumique des matériaux solides [%]

ρ_{lave} : masse volumique de la lave torrentielle [kg/m³]

ρ_{solide} : masse volumique des matériaux solides [kg/m³] (valeur globale de 2 650 kg/m³)

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau [kg/m³]

La masse volumique est comprise entre 1900 et 2500 kg. Dans cette étude elle est prise à 2000 kg/m³ ce qui est généralement le cas dans les études de lave torrentielle et nous montrons dans l'analyse de sensibilité que la gamme de variation classique n'a pas d'influence sur les résultats.

Le paramètre τ_c / ρ : varie entre 0.25 et 4 et le plus souvent entre 0.5 et 2 (Chambon et Laigle, 2013⁴). Il est autour de 0,4-0,5 pour des laves très fluides et 3-4 pour des laves très visqueuses. Il est autour de 1 pour des laves de fluidité moyenne.

⁴ Torrent et rivière de montagne édition QUAE 2013, chapitre Chambon et Laigle

Dans cette étude, le couple (C_v , ρ_{lave}) est choisi à (60%, 2000 kg/m³), ce qui correspond aux valeurs classiques des études de lave torrentielles.

3.3.3 Bilan des paramètres rhéologiques

Le tableau suivant présente les paramètres rhéologiques testés dans cette étude, conformément à l'ensemble de la bibliographie sur les laves torrentielles et des études spécifiques au Saint Antoine.

Type	τ_c	K	n	$\frac{\tau_c}{\rho}$	$\frac{K}{\tau_c}$	ρ
Très fluide	860	260	0.33	0.4	0.3	2000
Fluide	1260	380	0.33	0.6	0.3	2000
Visqueuse	2000	590	0.33	1	0.3	2000
Très visqueuse	2650	794	0.33	1.3	0.3	2000

Dans la modélisation, les paramètres K et τ_c ne sont pas explorés indépendamment. En effet, la consistance augmente avec le caractère visqueux de la lave et donc avec la contrainte seuil. Ce sont des couples (K, τ_c) qui sont testés.

Trois jeux de paramètres aux extrêmes de ce qui est proposé dans la bibliographie ont aussi été testés dans le calage du modèle et l'analyse de sensibilité :

Type	τ_c	K	n	$\frac{\tau_c}{\rho}$	$\frac{K}{\tau_c}$	ρ
Extrêmement fluide (TTfluide)	500	150	0.33	0.25	0.3	2000
Extrêmement fluide (TTTfluide)	200	60	0.33	0.1	0.3	2000
Extrêmement visqueux (TT visqueux)	4000	1000	0.33	0.55	0.25	2000

4 SENSIBILITE ET VALIDITE DU MODELE HYDRAULIQUE

4.1 Comparaison par rapport aux formules de Coussot (Calculs ponctuels à base rhéologique)

Nous suivrons la méthodologie détaillée dans l'ouvrage « Torrents et rivières de montagne » de l'INRAE, laquelle a été développée pour l'ingénieur⁵.

La loi de comportement de Herschel-Bulkley s'écrit en cisaillement simple de la façon suivante :

$$\text{Si } \tau \geq \tau_c \text{ alors } \tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n$$

$$\text{Si } \tau \leq \tau_c \text{ alors } \dot{\gamma} = 0$$

Où τ est la contrainte cisaillement [Pa], $\dot{\gamma}$ est la vitesse de cisaillement [s^{-1}], K le coefficient de viscosité du modèle de Herschel-Bulkley ou consistance [$Pa.s^n$], et n l'indice d'écoulement [-].

La relation Hauteur-Débit en fut déduite par Coussot² dans le cas où l'indice d'écoulement n peut être choisi à 1/3 (le cas des laves torrentielles boueuses).

$$U = \left(\frac{\tau_c}{K}\right)^3 h \left[\frac{1}{A} + \left(\frac{\rho g R_h \sin(\alpha)}{\tau_c} - 1 \right) \right]^{\frac{10}{3}}$$

Avec U la vitesse moyenne, h l'épaisseur de l'écoulement, R_h le rayon hydraulique, α l'angle de la pente et A un coefficient correcteur empirique lié à la géométrie de chenal, calculé par la suite :

Pour un canal rectangulaire de largeur L :

$$A = 1,93 - 0,43 \cdot \text{atan} \left(\left(\frac{10h}{L} \right)^{20} \right) \quad (1)$$

Pour un canal trapézoïdal de base B et de fruit 1 :

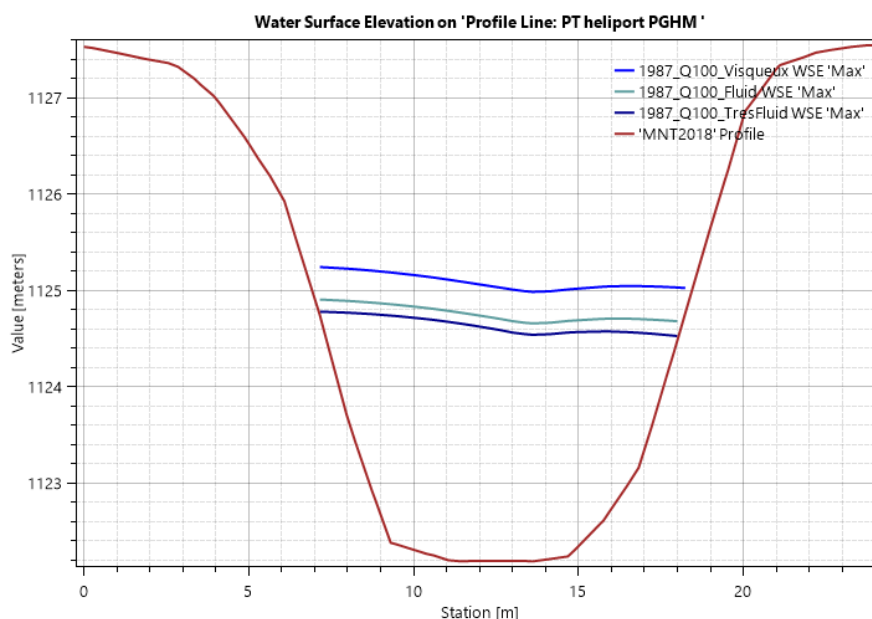
$$A = 1,93 - 0,6 \cdot \text{atan} \left(\left(\frac{0,4h}{B} \right)^{20} \right) \quad (2)$$

Ces formules permettent de calculer l'épaisseur de l'écoulement à partir d'une estimation du débit (et vice-versa).

Le tableau suivant compare la hauteur d'écoulement au niveau de la section du pont de la RD (loin des débordements) entre le modèle Hec-Ras 2D et les formules de Coussot qui se basent aussi sur le modèle de Herschel Bulkley.

La pente locale est entre 11.5% et 12% et la section choisie loin de toutes perturbations est le chenal amont au pont de la RD1006, au niveau du PGHM.

⁵ Torrents et rivières de montagne. Dynamique et aménagements, Editions QUAE, 2013



Rhéologie	Très Fluide	Fluide	Visqueux	Très Fluide	Fluide	Visqueux
Débits de pointe (m3/s)	100	100	100	150	150	150
Hauteur en calcul 1D en régime permanent (m)	1.2	1.6	3.2	1.2	1.7	3.4
Hauteur du modèle Hec-Ras 2D (m)	2	2.2	2.5	2.4	2.5	2.8
Ecart en %	67	38	-22	100	47	-18

On constate que l'écart n'est pas constant, pas dans le même sens, et dépend de la rhéologie et du débit. La résolution du terme de frottement n'est certainement pas le même dans le logiciel Hec-Ras que la formule de Coussot.

Pour les rhéologies « Très fluide » et « Fluide » le modèle 2D sur estime le niveau d'écoulement, par rapport au modèle 1D, ce qui va dans le sens de la sécurité vis-à-vis du débordement. Cela montre que pour reproduire un écoulement « Très fluide » de l'ordre de 1.2 m de haut, comme calculé par le modèle 1D, il sera nécessaire d'ajouter au modèle 2D une rhéologie encore plus fluide.

Pour la rhéologie « Visqueuse » le modèle 2D sous-estime le niveau d'écoulement par rapport au modèle 1D, dans une fourchette acceptable pour ce type d'écoulement, et c'est ce qui nous pousse à choisir une rhéologie « Très visqueuse » plutôt que « Visqueuse » afin de prendre une marge de sécurité lors des dimensionnements et des analyses de débordement.

Ces différences montrent que la gamme de paramètres rhéologiques utilisés dans le modèle doit être plus étendue que les paramètres mesurés sur le terrain.

4.2 Sensibilité des paramètres

L'étude de sensibilité consiste à faire varier certains paramètres de façon à identifier ceux qui ont une influence majeure sur le résultat et qu'il est primordiale de bien encadrer.

L'analyse est faite dans ce paragraphe avec le Lidar 2018, et les ouvrages de franchissement avec des sections hydrauliques au niveau de ce qu'elles étaient en 2014.

Les paramètres suivants sont testés (débit de pointe et volume, rhéologie) :

Nom	Geometrie des ouvrages	Lidar	Strickler lit mineur - zone artisanale	Tauc (Pa)	K (Pa.s^n)	n	Cv (%)	Débit de pointe (m3/s)	Hydrogramme	Volume (m3)
Cv1	2014	2018	25-50	1260	380	0.33	50	100	Q50	57 000
Cv2	2014	2018	25-50	1260	380	0.33	60	100	Q50	57 000
Cv3	2014	2018	25-50	1260	380	0.33	70	100	Q50	57 000
									Q50	57 000
Rheo1	2014	2018	25-50	500	150	0.33	60	100	Q50	57 000
Rheo2	2014	2018	25-50	4000	1200	0.33	60	100	Q50	57 000
									Q50	57 000
Qp1	2014	2018	25-50	1260	380	0.33	60	100	Q50	57 000
Qp2	2014	2018	25-50	1260	380	0.33	60	150	Q100	81 000
Qp3	2014	2018	25-50	1260	380	0.33	60	150		104 000
K1	2014	2018	20 - 50	1260	380	0.33	60	100	Q50	57 000
K2	2014	2018	25 - 50	1260	380	0.33	60	100	Q50	57 000
K3	2014	2018	35 - 35	1260	380	0.33	60	100	Q50	57 000

- La figure suivante présente l'étalement d'une crue type Q50 avec 3 coefficients de Strickler différente pour le lit mineur (20, 25 et 35). Dans la simulation avec un coefficient de Strickler de 35, il est aussi simulé un coefficient de Strickler de 25 dans la zone artisanale (à la place de 50) afin de vérifier si l'étalement de la lave dans cette zone est modifié par ce paramètre.

On constate que les résultats sont très similaires. Les hauteurs d'écoulement se superposent à 10cm près et l'étalement de la lave dans la zone artisanale est similaire. Le coefficient de Manning ne joue aucun rôle dans le cas de simulation de lave torrentielle, ce qui est intuitif puisque la loi de frottement dépend de la rhéologie de la lave dans ce cas.

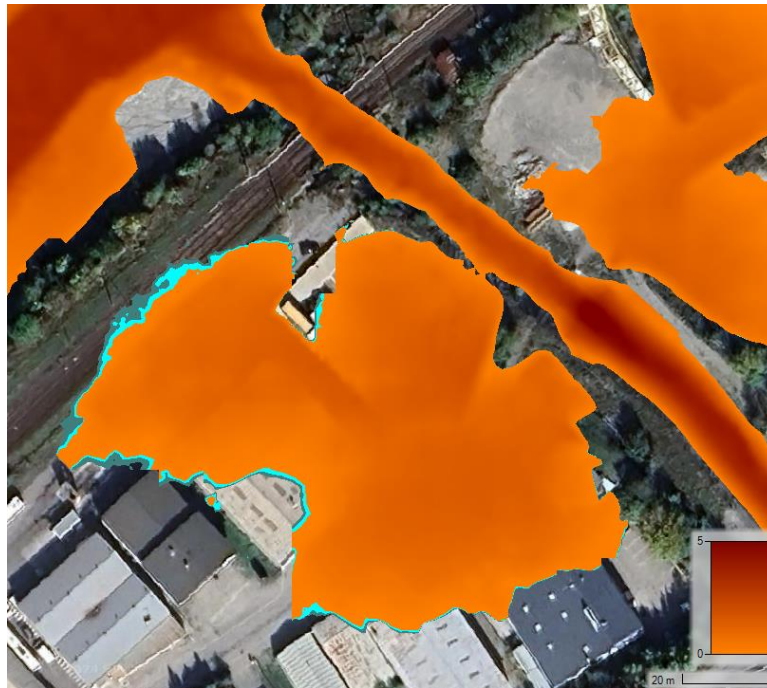


Figure 27 : Modélisation de la sensibilité du coefficient de Strickler, K1 K2 et K3

- La figure suivante présente l'étalement d'une crue avec un débit de pointe $100 \text{ m}^3/\text{s}$, une rhéologie « Fluide » avec une concentration volumique faible (50% Cv1), classique (60% Cv2) et forte (70% Cv3). On constate que les emprises (et les hauteurs d'écoulement) sont quasi identiques. Ce n'est donc pas un critère déterminant pour la suite, et la concentration volumique classique à 60% est conservée.

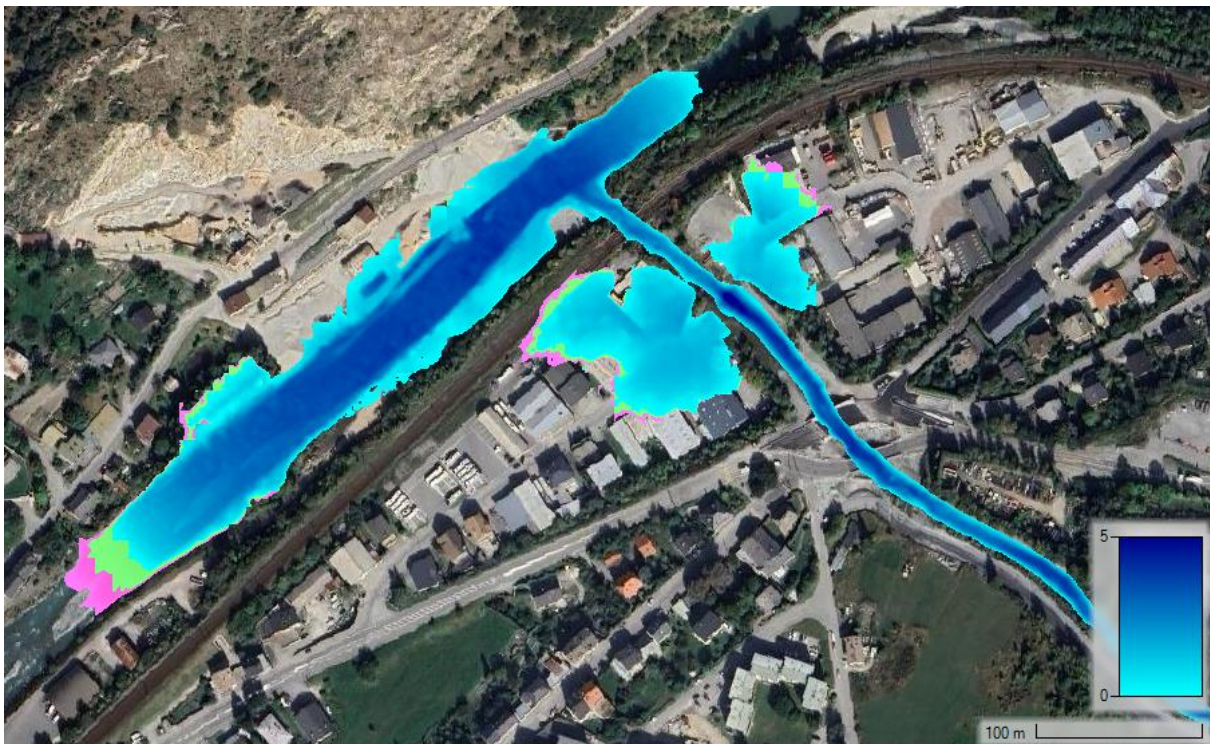


Figure 28 : l'étalement d'une crue type Q50, une rhéologie « Fluide » avec une concentration volumique faible (Cv1 bleu), classique (Cv2 vert) et forte (Cv3 rose).

- La figure suivante présente l'étalement d'une crue avec un débit de pointe $100 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une rhéologie « Extrêmement fluide » de contrainte seuil 500 Pa et consistance 150 Pa.s^n et « Extrêmement visqueuse » de contrainte seuil 4000 Pa et consistance 1000 Pa.s^n .

On constate des différences majeures dans le résultat de ces deux simulations. En effet la hauteur d'écoulement dans le lit mineur est environ 2 m supérieur pour la lave la plus visqueuse, ce qui entraîne des débordements en amont du pont de la RD, que l'on ne constate pas du tout pour la lave la plus fluide. En revanche pour la lave la plus fluide les débordements de la zone artisanale se propage et s'étalent plus loin.

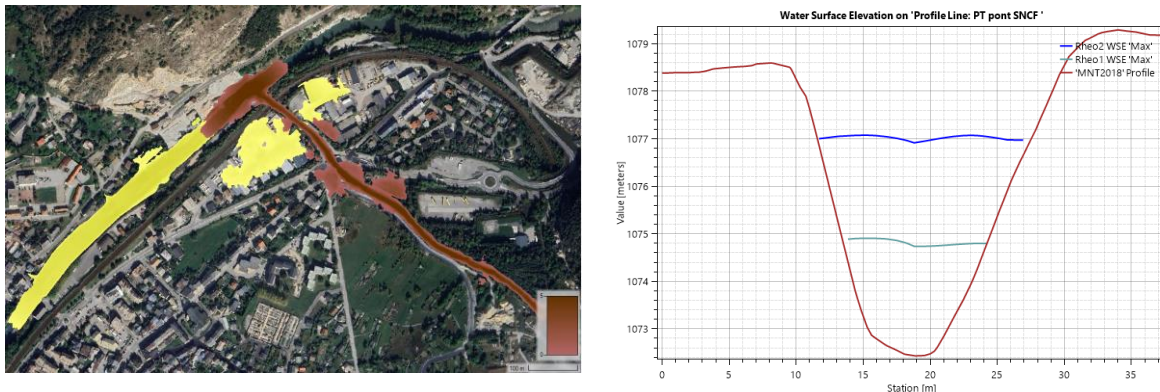


Figure 29 : l'étalement d'une crue type Q50, avec une rhéologie avec une rhéologie « Extrêmement fluide » (jaune) et « Extrêmement visqueuse » (marron) et profil en travers de l'ouvrage sncf (côte sous poutre 1077.5 m)

- La figure suivante présente l'étalement d'une crue avec une rhéologie « Fluide » pour un débit de pointe de 100 et $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dans le lit mineur la hauteur d'écoulement du débit de pointe le plus fort n'est que de 20 cm à 40 cm plus haut. Le débit de pointe n'a pas un effet prépondérant sur les hauteurs puisqu'il faut une augmentation de 50% du débit de pointe pour augmenter la ligne d'écoulement de 20 cm à 40 cm .

En revanche le volume des hydrogrammes a un impact sur l'emprise des zones de débordement. L'hydrogramme présentant le plus gros volume a une zone d'étalement plus grande. Le volume présente une sensibilité plus importante que le débit de pointe.

Les volumes de crue sont déterminés avec assez de fiabilité étant donné l'analyse de terrain des crues de 2014 et 1987. Il conviendra de déterminer avec précision le volume et l'écrêtement provoquer par les plages de dépôts des AVP de ce projet car ce seront des facteurs importants pour les résultats.

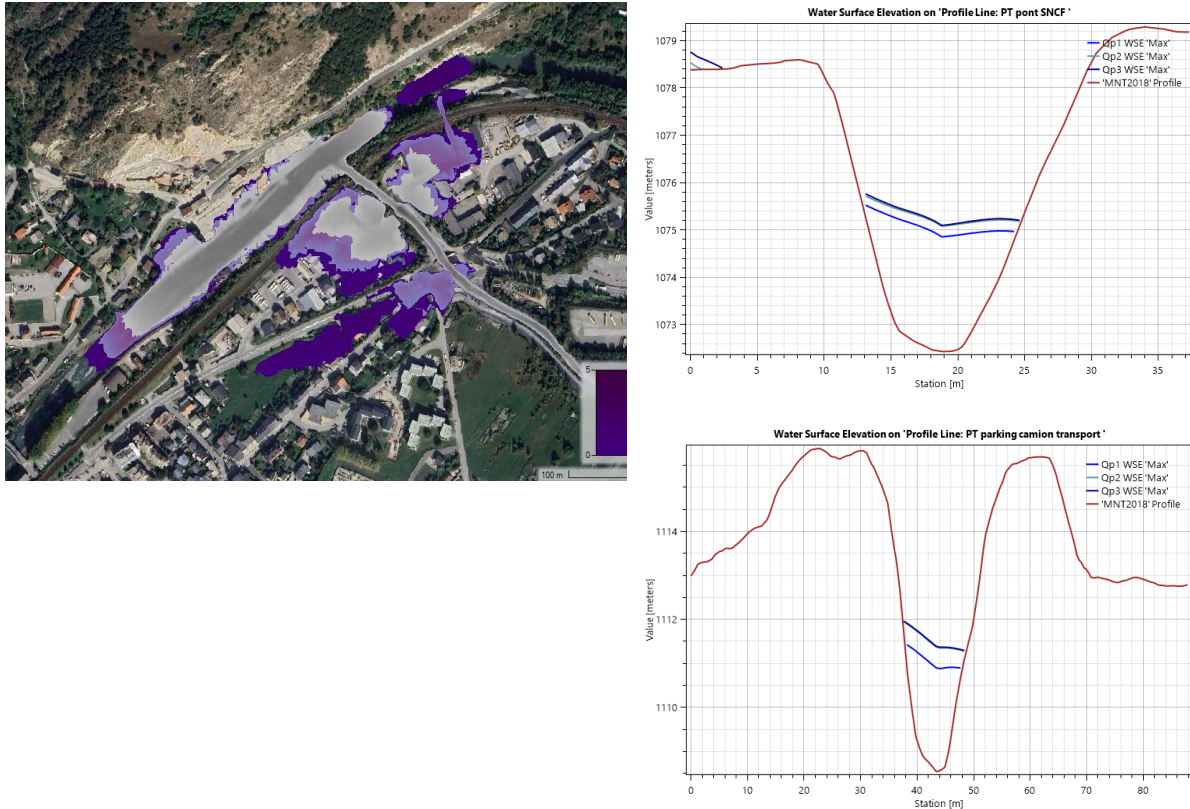


Figure 30 : l'étalement d'une crue type Q50, avec une rhéologie « Fluide » pour un débit de pointe de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (type Q50 gris) et $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (type Q100 violet) et pour un pic de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ mais avec un palier de plusieurs minutes au pic générant un volume majoré de 20% un plus gros volume. Profil en travers au niveau du pont SNCF et en amont de la RD.

5 CALAGE DU MODELE HYDRAULIQUE

Nous disposons de la documentation de deux crues historiques (1987 et 2014) qui nous permet de caler les paramètres du modèle sur plusieurs indicateurs (niveaux, zone de débordement, emprise, hauteur).

Plusieurs jeux de paramètres rhéologiques sont testés parmi les paramètres possibles calculés rappelés au §3.3.

5.1 MNT

Nous ne disposons pas de MNT précédent la crue de 2014, nous avons donc utilisé le MNT de 2018, auquel nous avons ajouté les ouvrages avec leur sections hydrauliques mesurés sur le terrain par le RTM en visite post crue (RTM INRAE 2014).

De cette façon, les verrous hydrauliques sont similaires à ce qu'ils étaient en 1987 et 2014 puisque ce sont les ouvrages qui constituaient les sections hydrauliques les plus faibles. A noter qu'avec ce MNT de 2018 que les sections hydrauliques sont bonnes, la distance relative entre le fond du lit et la sous poutre du tablier est correcte mais les altitudes absolues ne sont pas connues. De plus si une incision du lit s'est produite, elle n'est pas représentée non plus.

Les sections des ouvrages de franchissement sont les suivantes :

Crue de 2014 :

- Pont de la RD 8.3m de portée et 4.2 m de haut
- Pont cadre de la zone artisanale 5m de portée par 3m de haut
- Pont SNCF : la mesure n'a pas été faite mais ce pont n'est pas limitant, sa section a donc été tirée de la mesure de VR3D 2024

Crue de 1987 :

- Pont de la RD : il n'y a pas de mention de sa section mais non plus de sa reconstruction plus large entre 1987 et 2014. Sa section est donc choisie identique.
- Pont de la zone artisanale : le pont cadre a été reconstruit à l'identique entre 1987 et 2014 (RTM2016).

5.2 Hydrogrammes

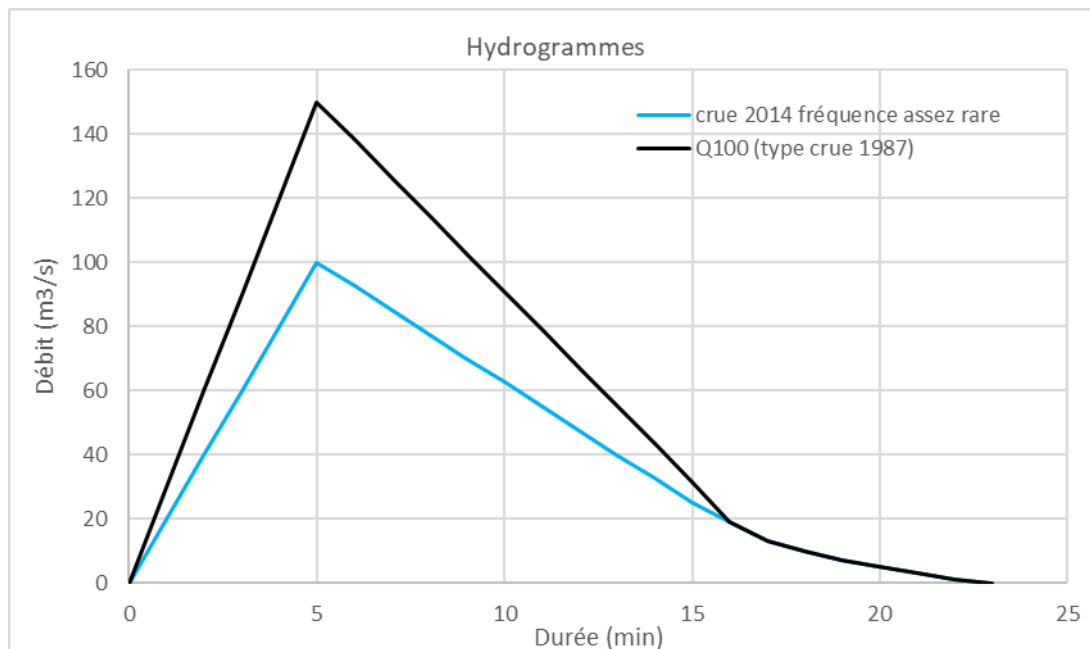


Figure 31 : Hydrogrammes estimés pour la crue de 2014 et la crue Q100 (type 1987)

5.3 Emprise des crues historiques

La figure suivante présente l'emprise mesurée sur le terrain à la suite des crues de 1987 et 2014.

Les dégâts et la dynamique de crue ont été répertoriés dans RTM 2016 et ETRM 2018.

Pour la crue de 1987 on constate :

- Un débordement en rive droite à l'amont du cône de déjection qui s'est arrêtée à mi pente, les volumes alimentant cette langue étant modérés
- Un débordement généralisé au niveau des 2 ponts routiers
- Les 2 ponts se sont bloqués en crue et ont généré un débordement

Pour la crue de 2014 on constate :

- La plage de dépôt a bien fonctionné, l'ouvrage de fermeture est obstrué par les blocs, le volume total stocké est de l'ordre de 16 000 m³.
- L'écoulement est passé par-dessus le pont de la RD, mais il ne s'est pas bloqué, probablement parce que les blocs ont été piégés dans la plage de dépôts. L'écoulement qui est passé par-dessus le pont s'est produit en rive gauche et a coulé le long de la route.
- Aucun débordement constaté en amont du pont de la RD
- La pont de la zone artisanale s'est boqué et a provoqué un débordement, rive droite et majoritairement rive gauche.
- La lave est passé largement sous le pont de la voie ferrée



Figure 32 : Emprise des débordements des crues de 1987 (jaune) et 2014 (orange) reproduite d'après RTM 2016 et Lombardi 2018 (EDD)

5.4 Crue de 2014

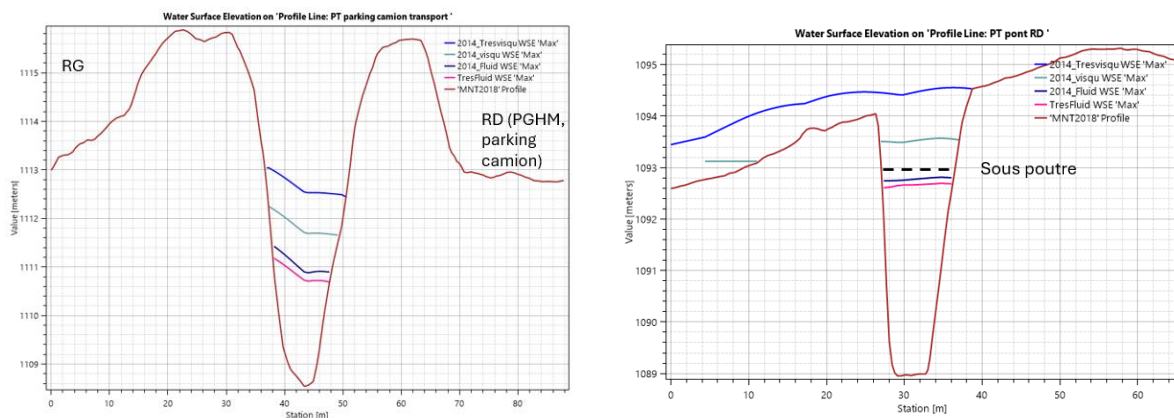
La figure suivante présente les emprises des 4 jeux de paramètres testés : Très fluide, fluide, Visqueux et très visqueux.

- Aucun des 4 jeu de paramètres ne produit de débordement en amont du pont de la RD, bien que la lave très visqueuse arrive au niveau du terrain naturel en rive droite.
- La lave Visqueuse et Très visqueuse reproduisent une mise ne charge du pont de la RD et un début de débordement en rive gauche. Le modèle ne permet pas de reproduire l'étalement le long de la route, probablement car en situation réelle la fluidité de la lave est plus importante dans le débordement que dans le corps, et le modèle ne peut pas reproduire des inhomogénéités de paramètres rhéologiques.

- Les 4 rhéologies permettent de mettre en charge le pont cadre et des débordements rive gauche et droite au niveau de la zone artisanale
- Les 4 rhéologies permettent une marge de plus d'un mètre sous le pont de la SNCF.



Figure 33 Emprise des écoulements pour 4 jeux de paramètres rhéologiques testés : très fluide, fluide, visqueux et très visqueux. Pour le cas très fluide, les positions des 4 profils en travers exploités ci-dessous ainsi que l'emprise de la crue de 2014 sont indiqués.



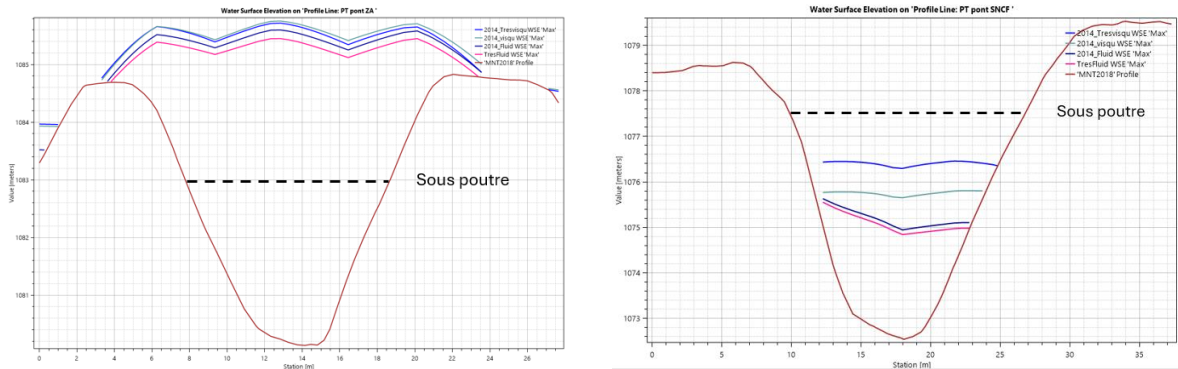


Figure 34 : 4 jeux de paramètres testés sur les 4 profils en travers tracés sur la figure précédente. De gauche à droite et de bas en haut : le parking amont du pont de la RD, le pont de la RD, l'epont cadre de la zone artisanale, le pont de la sncf.

La hauteur de la lave est visible sur la visite de terrain d'août 2014 :

- Au droit de la maison rive gauche la hauteur de dépôt est autour de 1,8m (Figure 35)
- Au niveau du hangar d'autocar, la hauteur de dépôt est entre 1m et 1.8m (Figure 36)



Figure 35 : crue de 2014, 1m80 de dépôt au droit de la maison rive gauche



Figure 36 : crue de 2014 entre 1m80 et 1m de dépôt dans l'entrepôt d'autocar rive gauche

Les Figure 37 et Figure 38 montrent la hauteur simulée pour deux rhéologies, « Très fluide » et « Très visqueuse ».

La rhéologie « tres visqueuse » permet d'obtenir des hauteurs de dépôt autour de 1m80 contre la maison mais ne permet pas l'étalement contre le hangar.

La rhéologie « tres fluide » permet d'obtenir des hauteurs de dépôt entre 50cm et 80cm contre le hangar des bus.

Ces deux simulations sont satisfaisantes vis-à-vis de l'estimation des hauteurs de dépôt.

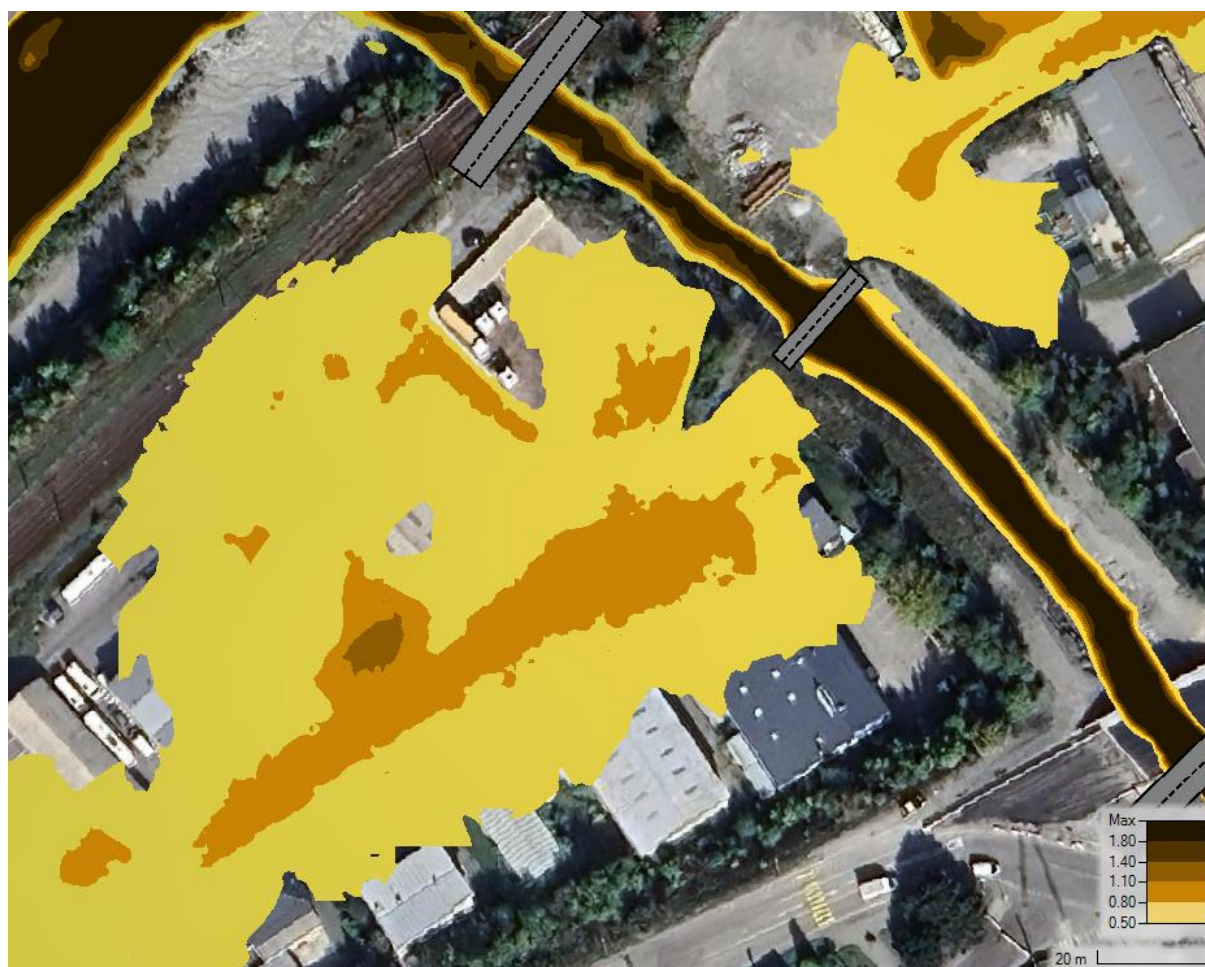


Figure 37 : hauteur de lave modélisée pour l'hydrogramme de la crue de 2014 et la rhéologie « très fluide »



Figure 38 : hauteur de lave modélisée pour l'hydrogramme de la crue de 2014 et la rhéologie « très visqueuse »

5.5 Crue de 1987

La figure suivante présente les emprises des 4 jeux de paramètres testés : Très fluide, fluide, visqueux et très visqueux.

- Le jeu de paramètres « Très visqueux » produit un débordement rive droite en amont du pont de la RD mais plus en aval du débordement de 1987. Le débordement en aval immédiat du PGHM n'est pas reproduit mais il est possible que le MNT ne soit pas représentatif de la hauteur de berge de 1987. D'après ETRM, il semblerait que le lit en 1987 était nettement moins profond qu'actuellement – comme le montre la photo ci-dessous. De plus, la présence de gros blocs qui obstruent le lit n'est pas représenté dans le modèle.

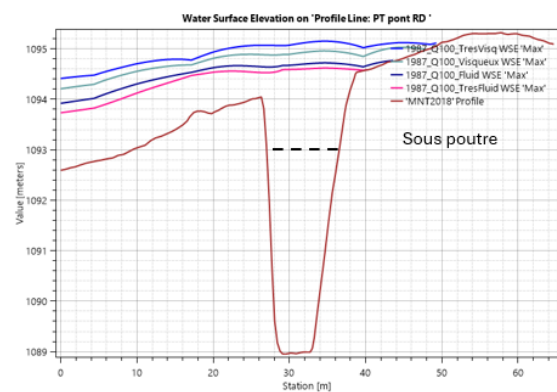
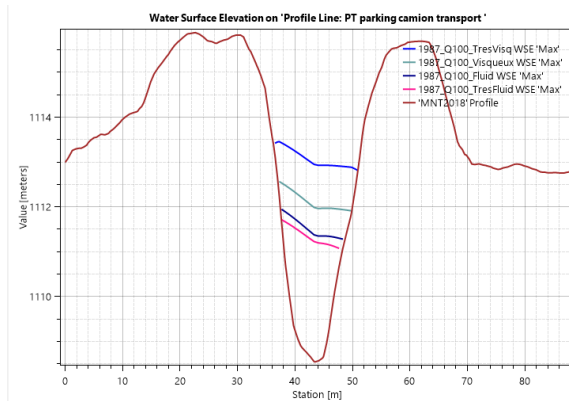


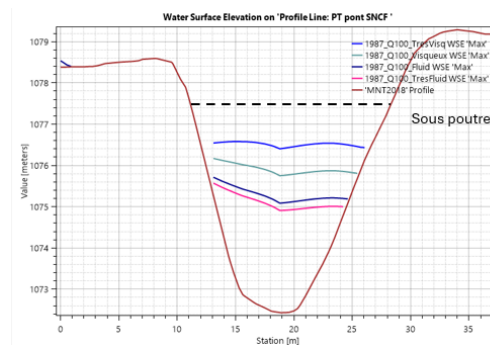
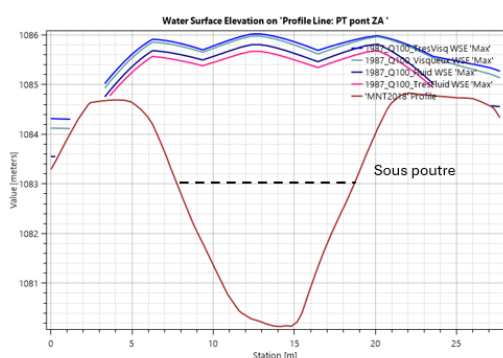
Figure 39 : crue de 1987 en amont du pont de la RD, langue de débordement en direction du parking de camion, en aval immédiat du PGHM

- Les 4 rhéologies reproduisent une mise ne charge du pont de la RD et des débordements en rive gauche et droite. Le modèle « Très fluide » permet de reproduire l’amorce de l’étalement le long de la route, mais pas jusqu’à bout de l’emprise réelle, probablement car en situation réelle la fluidité de la lave est plus importante dans le débordement que dans le corps, et le modèle ne peut pas reproduire des inhomogénéités de paramètres rhéologiques.
- Les 4 rhéologies permettent de mettre en charge le pont cadre et des débordements rive gauche et droite au niveau de la zone artisanale
- Les 4 rhéologies permettent une marge de plus d’un mètre sous le pont de la SNCF.



Figure 40 : Emprise des écoulements pour 4 jeux de paramètres rhéologiques testés. De gauche à droite et de bas en haut : très fluide, fluide, visqueux et très visqueux. Pour le cas très fluide, les positions des 4 profils en travers exploités ci-dessous ainsi que l'emprise de la crue de 1987 sont indiqués.





Afin de reproduire le débordement de 1987 en aval immédiat du PGHM, il a été testé une rhéologie plus visqueuse, au delà des estimations possible d'après ETRM ($\tau_c=4000$ Pa, $K=1000$ Pa.sⁿ).

L'emprise et le profil en travers au niveau de la zone de débordement sont présentés ci-dessous :

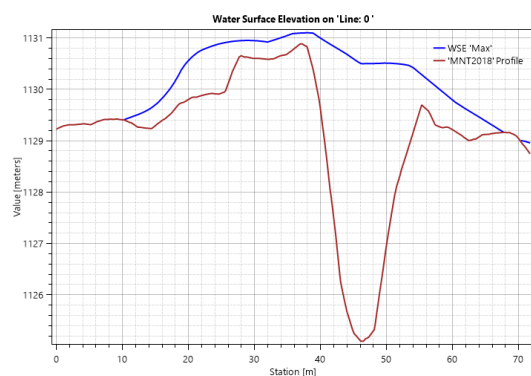
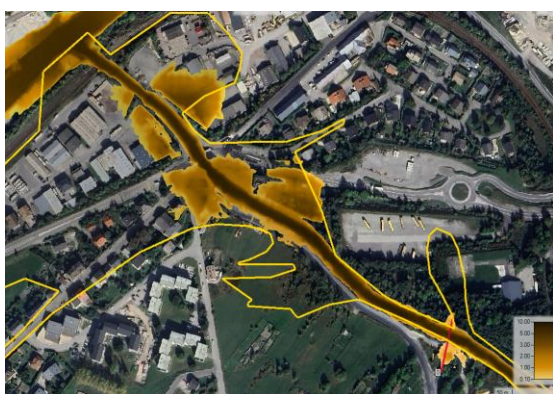


Figure 41 : Emprise d'un écoulement avec l'hydrogramme type crue de 1987, avec une rhéologie « Très très visqueuse » à 4000 Pa. Profil en travers tracé en rouge sur la vue en plan et présenté avec le niveau d'écoulement.

Ce test arrive à reproduire l'amorce du débordement au niveau du parking de camion en rive droite (bien qu'il n'arrive pas à la propager jusqu'au parking).

Cependant, la contrainte seuil de 4000 Pa est trop pessimiste d'après ETRM puisqu'elle provoquerait un débordement par-dessus le pont de la voie ferrée, ce qui ne s'est pas produit.

Afin de reproduire le débordement de 1987 en aval immédiat du PGHM, il a été testé avec les rhéologies probables de rehausser le fond de lit de 2.5m, soit 4m de revanche depuis le haut de berge rive droite au niveau du débordement de 1987.

L'emprise et le profil en travers au niveau de la zone de débordement sont présentés ci-dessous :

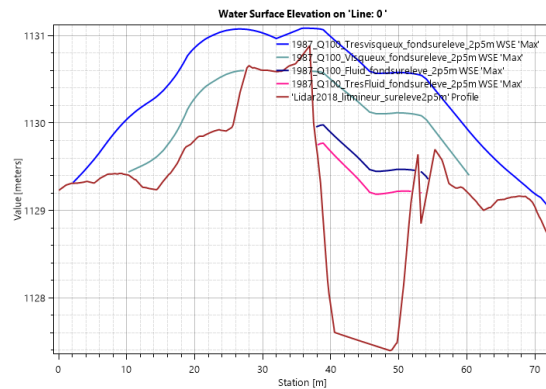
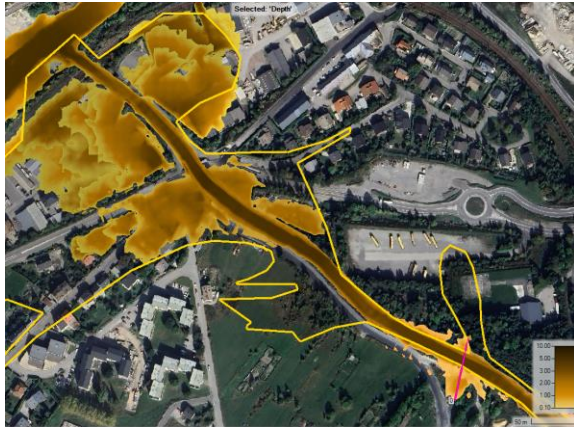


Figure 42 : Emprise d'un écoulement type crue de 1987, avec les 4 jeu de rhéologie et sur un fond de lit relevé de 2.5m. Profil en travers tracé en rouge sur la vue en plan et présenté avec les niveaux d'écoulement.

Les rhéologie « Très visqueuse » et « Visqueuse » conduisent à des débordements certains à ce niveau.

Les niveaux d'écoulement des rhéologies « Fluide » et « Très fluide » arrivent au niveau du terrain naturel, le débordement n'a donc pas lieu sauf blocage de gros bloc dans le lit.

Ce qui est plus probable pour expliquer le débordement en aval immédiat du PGHM c'est le blocage du lit par des blocs ou un lit en 1987 environ 2.5m au-dessus du lit utilisé pour la modélisation (Lidar 2018).

5.6 Etalement maximal

Afin de reproduire l'étalement et la propagation de slaves, nous testons dans ce § la rhéologie de la gamme la plus fluide observé pour des laves torrentielles dans les Alpes soit 500 Pa (Chambon Laigle 2013 d'après Cousot 1996), avec $K=150$ et $n=0.33$.

Cette rhéologie, malgré de plus faibles hauteurs, permet de reproduire la mise en charge du pont cadre de la zone artisanale et permet d'expliquer la propagation de la lave sur le cône de déjection telle qu'observée sur le terrain.

Pour la crue de 1987 on note toutefois que le modèle ne permet pas de propager les écoulements dans les langues les plus étroites contre la voie ferrée ni sur la route D1006.

En testant une rhéologie de contrainte seuil 200 Pa, encore plus fluide, inférieure aux valeurs classiques rencontrées (500 Pa), on peut reproduire l'étalement observé en 1987 (Figure 45).



Figure 43 : Emprise de la crue de 2014 resimulée avec la rhéologie de 500 Pa « Extrêmement fluide TTF »

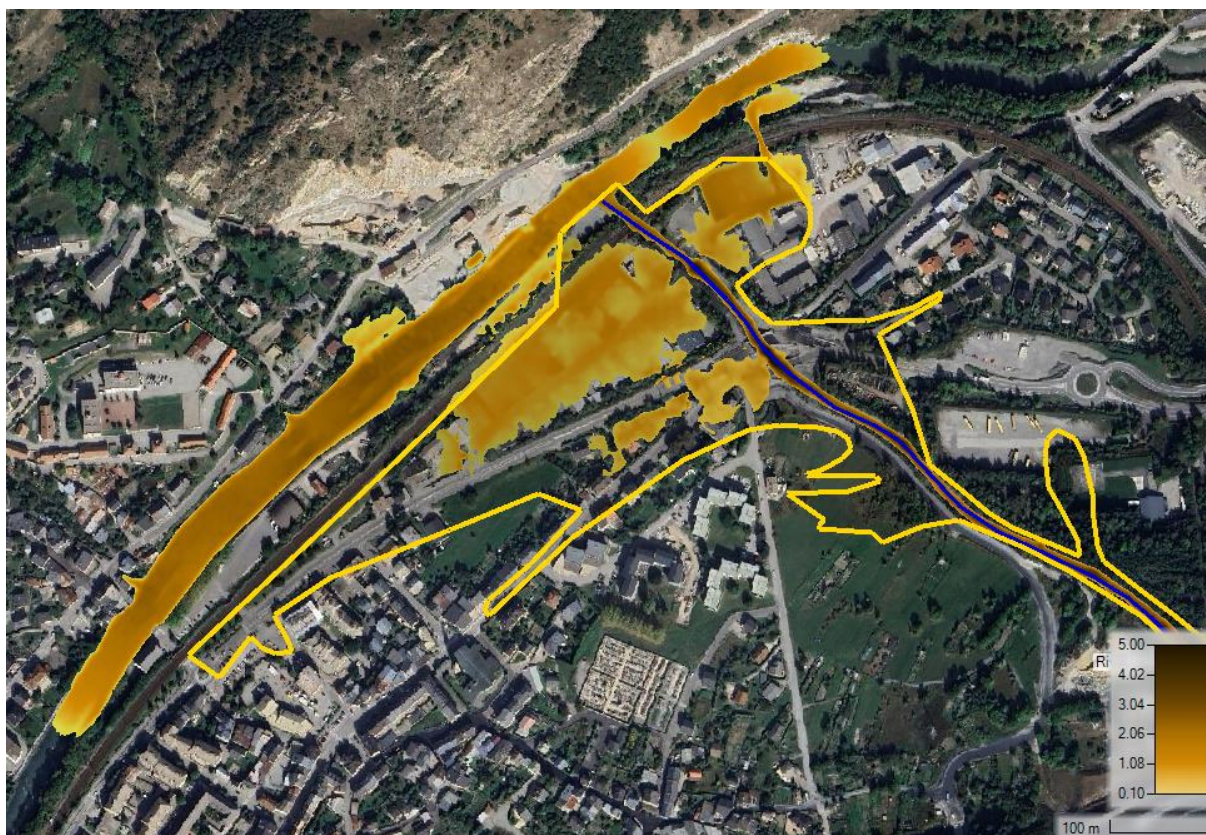


Figure 44 : Emprise de la crue de 1987 resimulée avec la rhéologie de 500 Pa « Extrêmement fluide TTF »

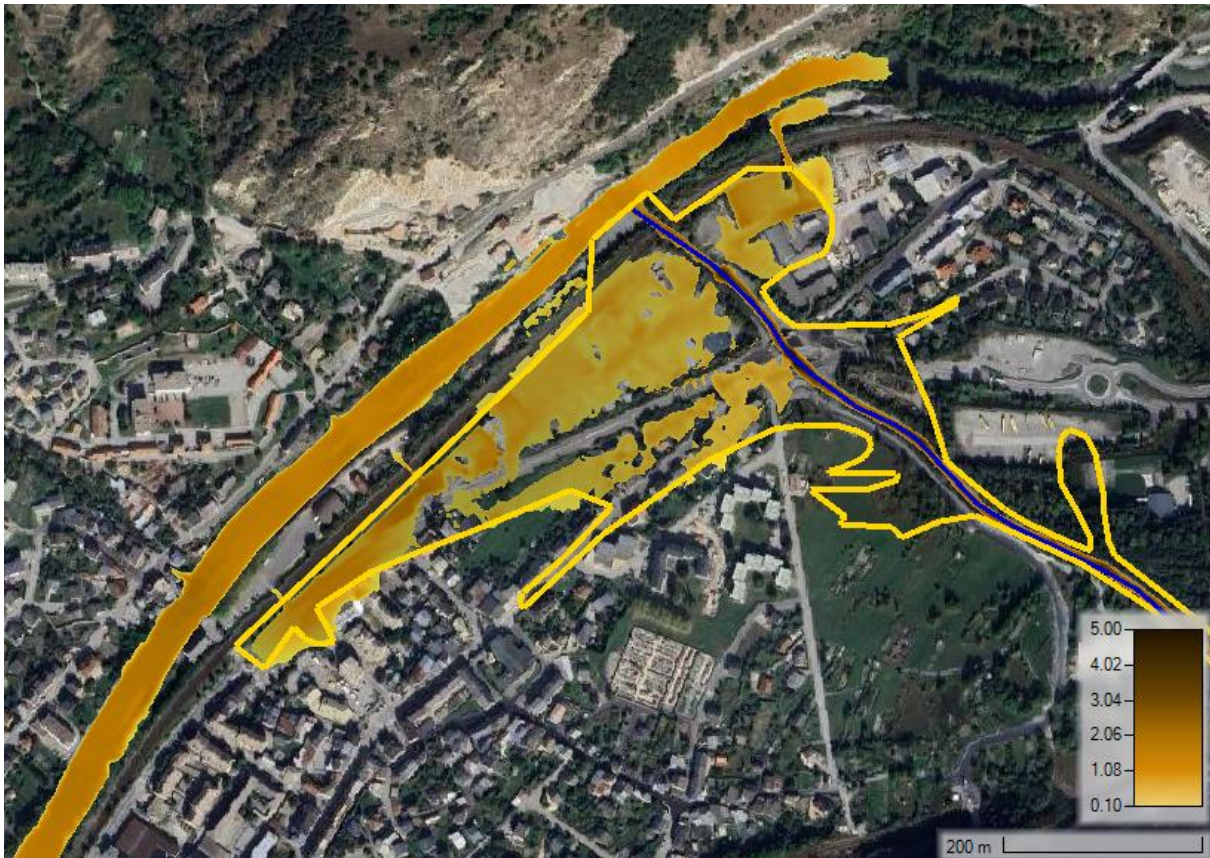


Figure 45 Emprise de la crue de 1987 resimulée avec la rhéologie de 200 Pa « Extrêmement fluide TTTF »

5.7 Validation sur la crue de 2023

En 2023 une crue est passée sans incidence en affleurant la sous poutre du pont provisoire.

Le volume de la crue n'a pas été estimé mais la crue a déposé 9000 m³ de matériaux dans la plage de dépôt et 8000 m³ et 6000 m³ (soit 2m) sous le pont. Soit au minimum 23 000 m³. Des photos des laisses de crue suggèrent qu'elle a rempli l'essentiel de la section hydraulique du chenal.

Le RETEX de la crue par le SPM montre que le niveau d'écoulement se situe au niveau de l'arase des enrochements du pont de la RD1006.

On peut assimiler cette crue à une crue d'occurrence autour de 10 ans.

La modélisation de la crue Q10 au droit du pont de la RD1006 montre que la simulation « Très visqueuse » reproduit correctement la hauteur d'écoulement puisqu'elle se situe au niveau de l'arase des enrochements. Cela conforte le fait de prendre cette rhéologie comme rhéologie dimensionnante.

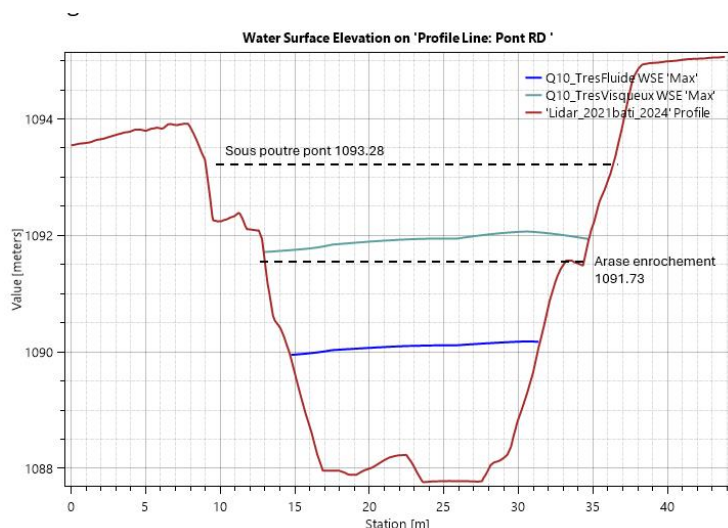


Figure 7 : Amont du nouveau pont de la RD1006 le 14/08/2023

Figure 46 : modélisation de la Q10 au droit du pont de la RD1006 et photo du SPM du pont juste après le passage de la crue de 2023

5.8 Bilan

Dans les deux crues étudiées, les rhéologies « Très Fluide » et « Fluide », malgré leur plus faible hauteur d'écoulement permettent d'expliquer le fonctionnement des ouvrages de franchissement en crue et permettent de simuler un étalement plus important et plus réaliste.

Les rhéologies « Visqueuse » à « Très visqueuse » permettent d'expliquer les points de débordement au niveau du pont de la RD.

Pour le débordement aval au PGHM, il est plus raisonnable de penser que c'est le fond du lit qui était plus haut, combiné à une rhéologie « Visqueuse » ou « Fluide » mais avec le blocage de gros blocs plutôt qu'une rhéologie extrêmement visqueuse sur le fond de lit actuel.

Il est donc proposé pour la suite de

- Localiser les points de débordements avec une rhéologie « Très Visqueuse », laquelle est dimensionnante.
- En cas de débordement, prolonger les zones d'étalement à dire d'expert en fonction de l'étude des pentes et des crues historiques. L'emprise maximale des zones de débordement pourra être déterminée ou complétée par la simulation avec la rhéologie « Extrêmement fluide TTTF » de 200 Pa, laquelle est en dehors des rhéologies classiquement rencontrées mais permet d'objectiver l'estimation de l'emprise maximale, puisqu'elle est correctement calée sur la crue de 1987.
- Pour les hauteurs d'écoulement, la simulation « Très visqueuse » permet d'obtenir les bonnes hauteurs dans le chenal, mais pas l'étalement maximal. La simulation « Très fluide » permet d'obtenir les bonnes hauteurs dans les dépôts loin du lit mineur.

Il pourrait être étonnant de devoir diminuer la contrainte seuil à 200 Pa pour reproduire l'étalement observé en 1987 alors que les analyses expertes ont montré que la contrainte seuil minimale devrait être autour de 800 Pa sur le Saint Antoine (RTM 2009, ETRM2018).

C'est pourquoi la phase de calage de comparaison avec les événements historiques est importante.

Le modèle 2D n'utilise pas les mêmes méthodes de calcul que les calculs 1D de Coussot. Le modèle 2D a tendance à avoir des hauteurs d'écoulement plus importante dans le chenal et des étalements moins importants dans la zone de débordement, à contrainte seuil égale.

Il n'est donc pas aberrant de devoir diminuer la contrainte seuil du modèle 2D pour caler le modèle aux événements passés.

De plus, dans la réalité, la lave torrentielle n'a pas la même contrainte seuil dans le chenal, à cause de la présence des blocs qui lui confère une viscosité apparente plus importante que dans les zones de débordements ou les plus gros blocs ont été écrêtés.

6 RESULTATS DES MODELISATIONS

6.1 MNT

Le MNT utilisé dans le lit mineur, les berges et le terrain naturel de part et d'autre est la mesure par Drone de VR3D en juin 2024. La précision en altitude du MNT est centimétrique et il présente une densité de point au sol ultra haute résolution. Nous l'avons rééchantillonné tous les 50 cm pour avoir la même résolution que le Lidar 2021 haute résolution de l'IGN qui est utilisé pour l'ensemble du cône de déjection.

6.2 Prise en compte de sous-scénarios

La complexité des crues torrentielles implique en général de considérer un plus grand nombre de scénarios et de sous scénarios de crues ainsi que des incertitudes plus élevées que dans le domaine fluvial.

Dans le cas où les ouvrages hydrauliques jouent leur rôle, le sous scénario correspondant (fonctionnement nominal) permet la connaissance de la ligne d'eau de référence et l'identification des points de débordement en situation normale. Ce scénario peut éventuellement être le plus pénalisant sur certains enjeux.

Cependant, lorsque les ouvrages hydrauliques présents dans le chenal sont susceptibles d'influencer significativement l'écoulement, ils constituent l'émergence de sous-scénarios (obstruction d'un pont par exemple).

De plus, certains phénomènes naturels, comme le débordement éventuel du chenal lié à la présence d'un gros bloc constituent aussi l'émergence de sous scénarios.

Chaque sous scénario possède une probabilité conditionnelle attribuée en suivant les recommandations de la publication qui fait référence sur le sujet (Inrae 2022⁶), c'est-à-dire de manière relative aux autres sous-scénarios.

⁶ Piton, G., Carlados, S., Tacnet, J-M. 2022. *Caractérisation des sous-scénarios de crues et des probabilités conditionnelles associées - Application à la problématique des crues des cours d'eau torrentiels : approche et cas d'étude*. Rapport scientifique réalisé pour le compte du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). V2.2. 66 p. <https://hal.inrae.fr/hal-03985981>

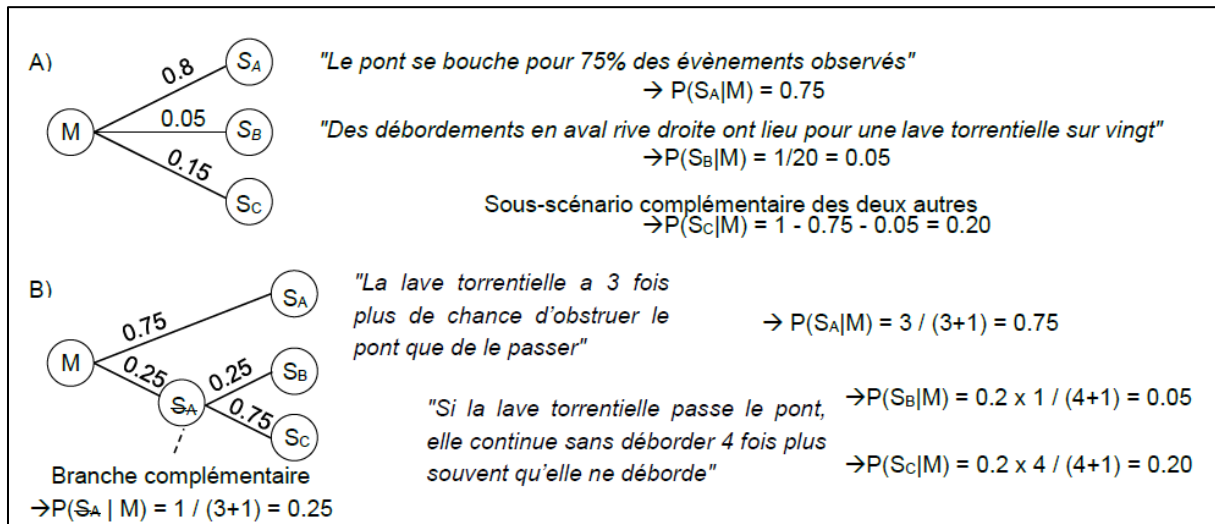


Figure 47 : schéma d'arbres de probabilités relatives de sous scénarios d'après INRAE 2022

6.3 Méthodologie pour établir la carte d'emprise et des intensités

La carte de modélisation brute retient l'emprise et la hauteur maximale de chaque rhéologie testée dans le sous scénario.

Afin d'établir la carte des bâti touchés par chaque sous scénarios, la modélisation brute est complétée par une analyse experte afin de cartographier l'ensemble de la zone atteignable par la crue.

L'emprise est les niveaux d'intensité de la cartographie finale retenue sont issus :

- du résultats des modélisation qui donnent accès à des hauteur de dépôts,
- de l'analyse experte de la zone (visites de terrain, analyse des crues historique de 2014 et 1987, REX...),
- de l'analyse experte du comportement de lave torrentielle (les débordement s'auto amplifient, l'écoulement s'autochenalise, hétérogénéité de la teneur en eau et des blocs et donc de la rhéologie etc...).

Pour chaque occurrence étudiée ci-dessous, la carte brute (zone d'emprise en noire) est systématiquement superposée à la carte finale (niveau de bleu) en cas de débordement, afin de faciliter la compréhension de la méthodologie.

6.4 Crue type Q10 (Fréquent)

6.4.1 Résultats bruts des modélisations

L'hydrogramme de la crue Q10 a été utilisé sans écrêtement par la plage de dépôt. Cependant il est considéré que les gros blocs sont stoppés par la plage et n'obstruent pas les ouvrages de franchissements ni le lit mineur.

La ligne d'eau suivante montre que la ligne d'écoulement pour Q10, même dans le cas dimensionnant du régime « Très visqueux » n'accroche pas les ouvrages de franchissement.

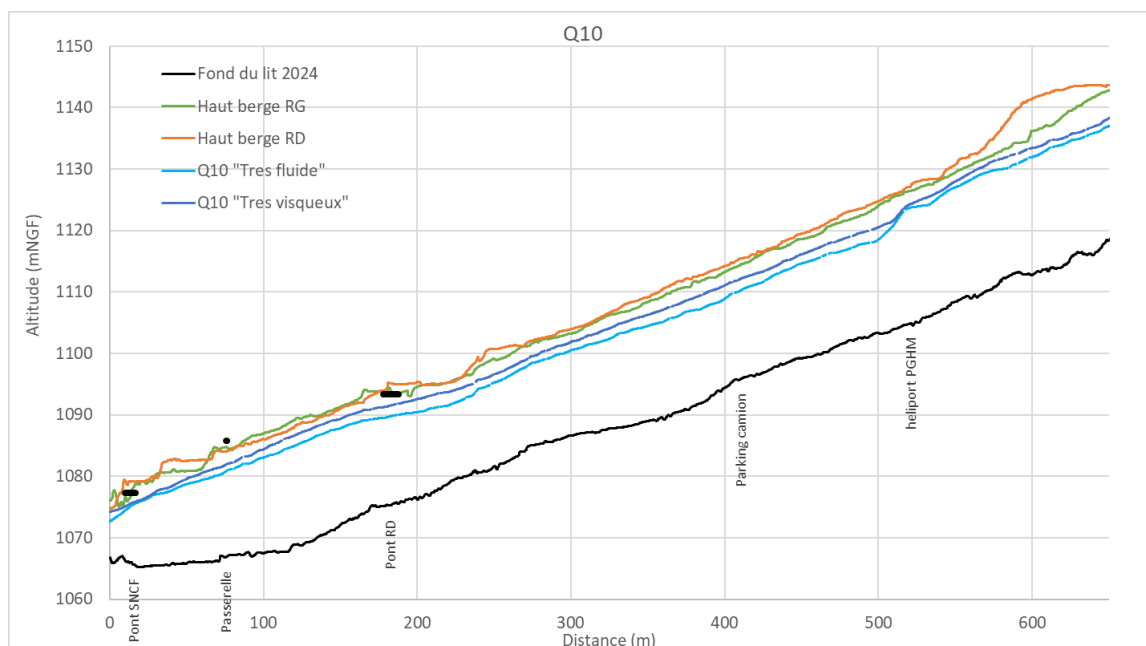


Figure 48 : Profil en long du fond du lit et des haut de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très fluide » et « Très visqueuse »

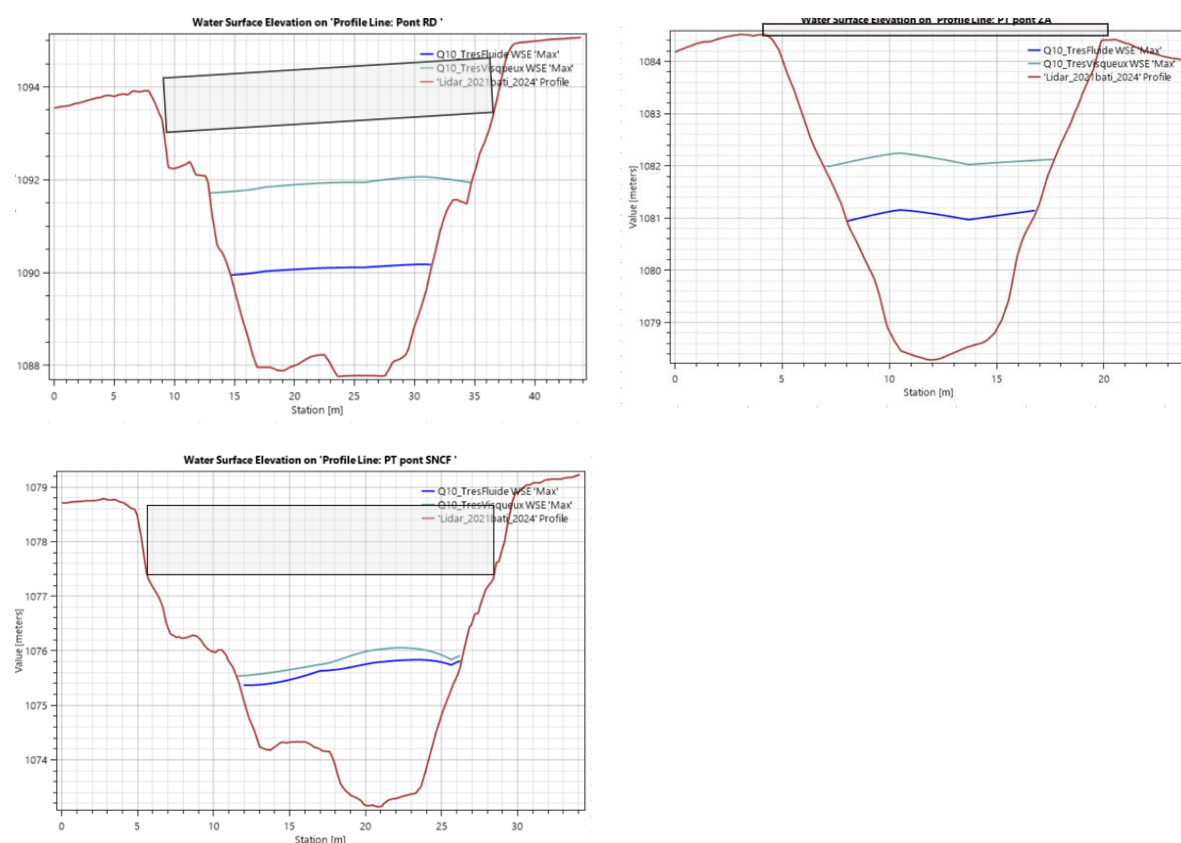


Figure 49 : La hauteur pour Q10 des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements

6.4.2 Scénarios aggravants

Le scénario d'une rhéologie la plus visqueuse est un cas pénalisant parmi l'ensemble des rhéologies possible, puisque c'est celui qui provoque les hauteurs les plus élevées.

Etant donné que l'écoulement de la lave de période de retour 10 ans, même dans le cas pénalisant de la rhéologie la plus visqueuse ne provoque pas de débordement, alors le cas d'un autre scénario aggravant n'est pas étudié et la rhéologie « Très visqueuse » est appliquée au scénario de base.

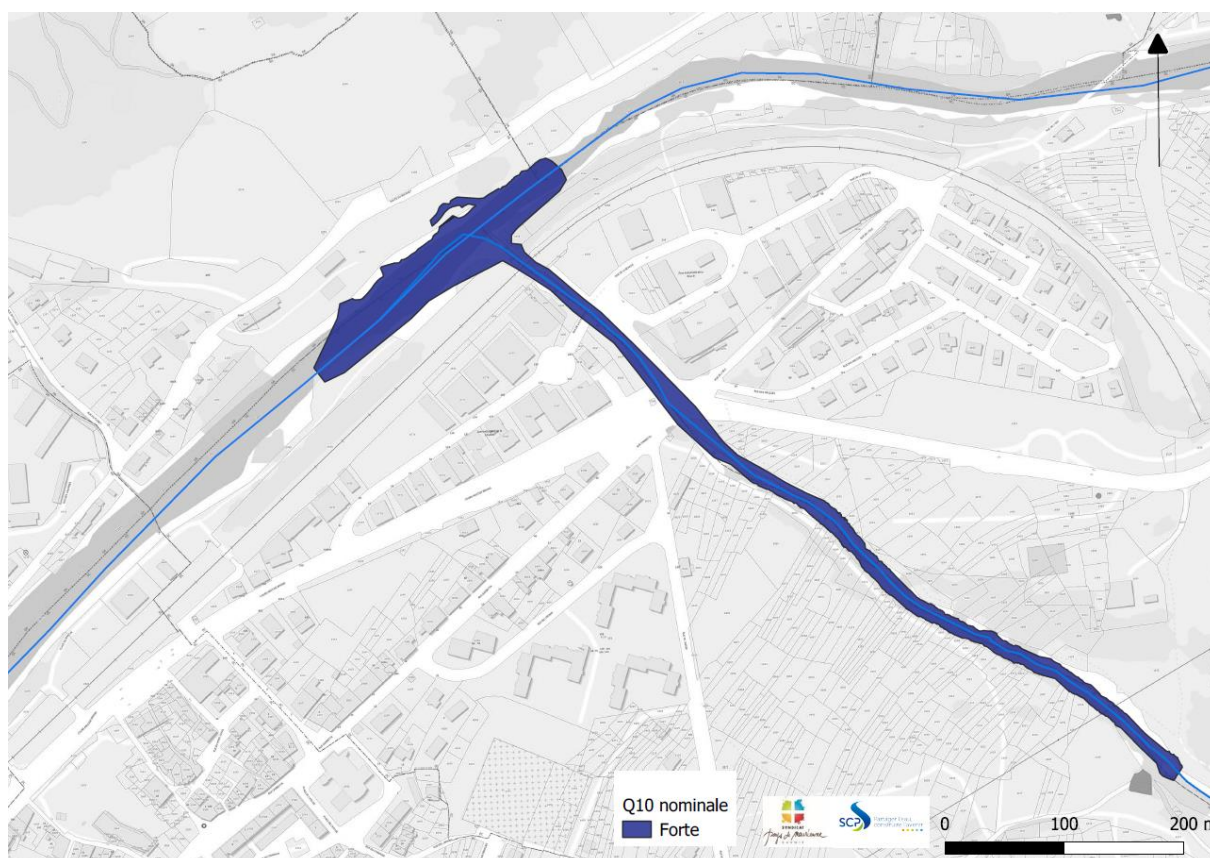
6.4.3 Dire d'expert

Etant donné que la crue de 2023 est passée sans aucun débordement, il est raisonnable de valider les résultats de modélisation ci-dessus, qui montrent aussi un passage de la Q10 sans débordement.

6.4.4 Cartographie finale

Carte des emprises et des intensités :

Néant, pas de débordement.



6.5 Crue type Q50 (assez rare)

6.5.1 Résultats bruts des modélisations

L'hydrogramme de la crue Q50 a été utilisé sans écrêtement par la plage de dépôt. Cependant il est considéré dans le scénario général que les gros blocs sont stoppés par la plage et n'obstruent pas les ouvrages de franchissements ni le lit mineur.

La ligne d'eau suivante montre que la ligne d'écoulement pour Q50, même dans le cas dimensionnant du régime « Très visqueux » n'accroche pas les ouvrages de franchissement.

Un débordement est constaté par-dessus le remblai rive gauche au niveau de la zone artisanale, uniquement pour cette rhéologie dimensionnante. Cela correspond à l'abaissement de la surélévation en rive gauche en aval immédiat de la passerelle.

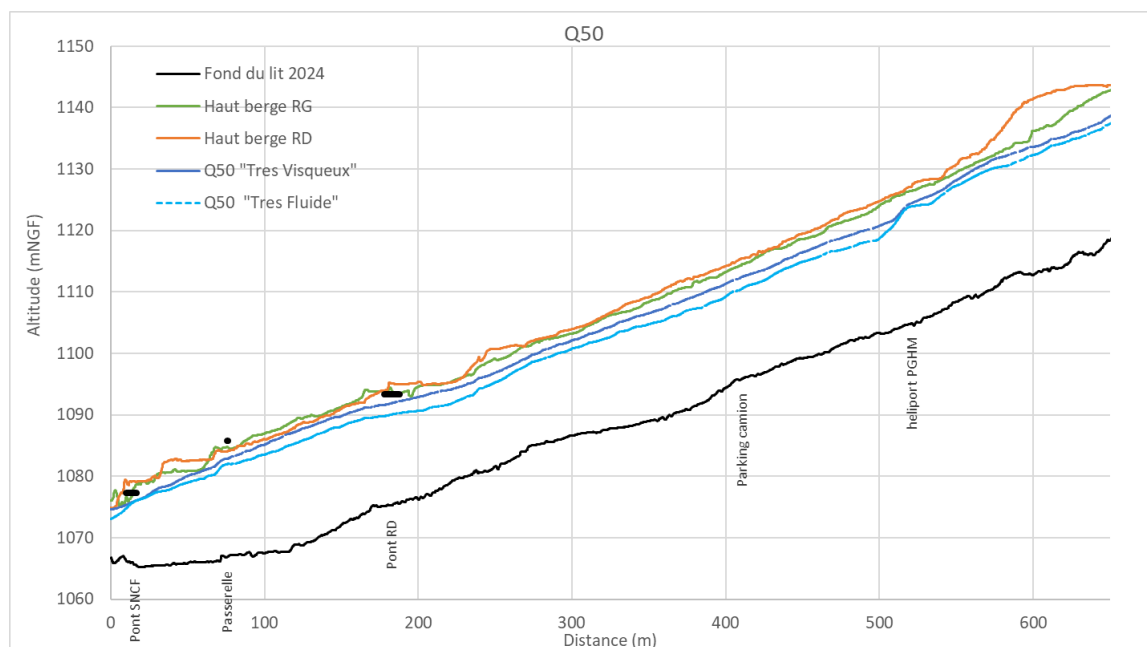
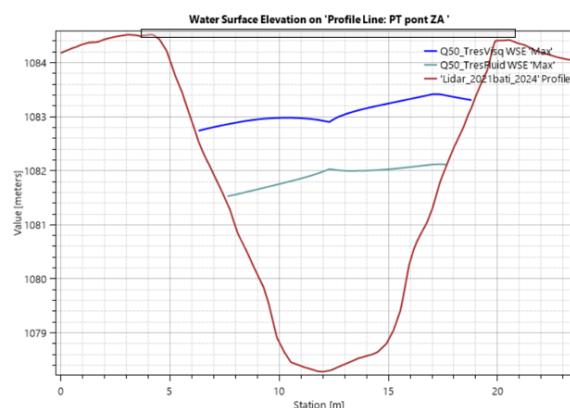
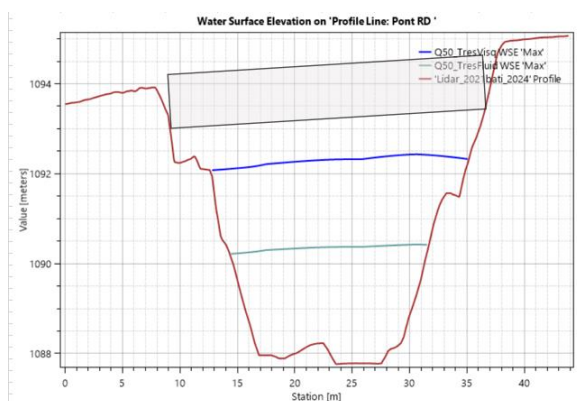


Figure 50 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »



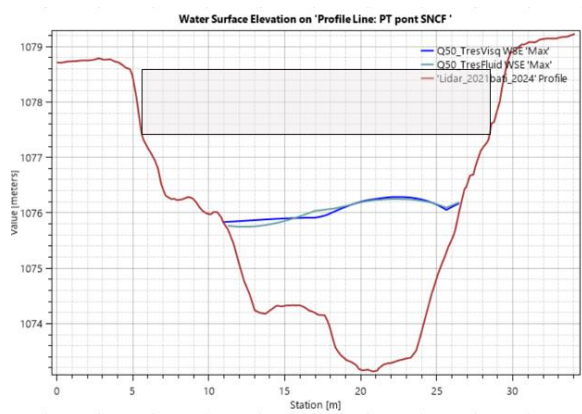


Figure 51 : La hauteur pour Q50 des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements

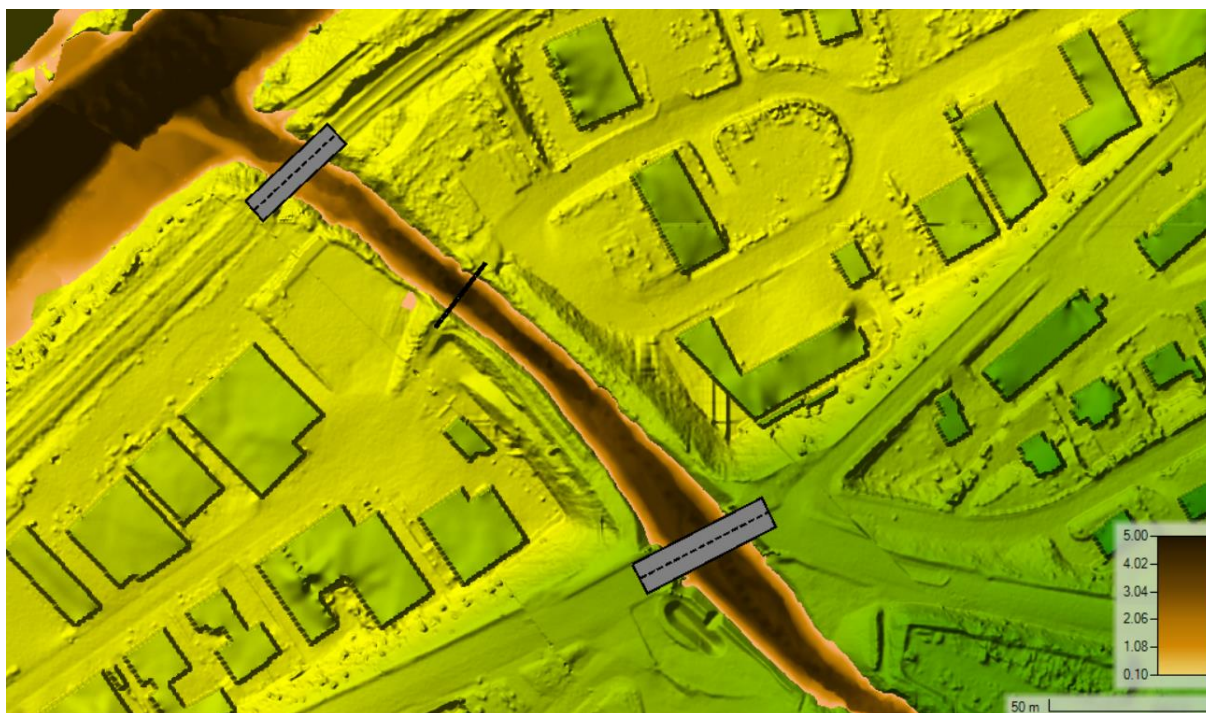


Figure 52 : Hydrogramme Q50, rhéologie « Très visqueuse »

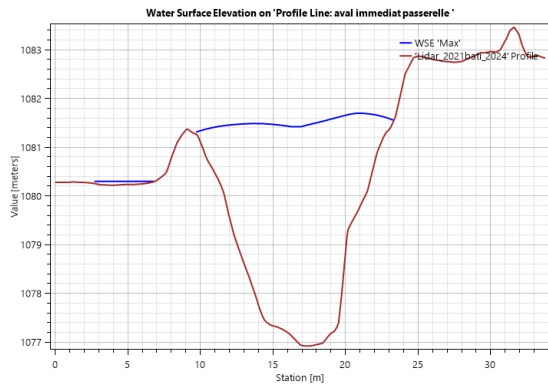


Figure 53 : Q50 rhéologie « Très visqueuse », profil en travers en aval immédiat de la passerelle



Figure 54 : Vue de l'aval de la passerelle, zone d'abaissement de la ligne de crête en rive gauche

6.5.2 Scénarios aggravants

L'hydrogramme Q50 étudié ici correspond à la crue de 2014 qui n'a pas mis en charge le pont de la RD. Etant donné la reconstruction du pont de la RD avec un portée et un tirant d'air plus important, le scénario aggravant de sa mise en charge n'est pas considéré.

Comme ni la crue de 2014 ni celle de 1987) n'a mis en charge le pont SNCF, le scénario de son obstruction n'est pas non plus étudié.

La passerelle offre maintenant un tirant d'air suffisant, le scénario de son obstruction n'est pas non plus étudié.

6.5.3 Dire d'expert

Etant donné que dans cet hydrogramme la plage de dépôt n'a pas été considérée, et que l'hydrogramme est donc déjà majorant, avec une rhéologie la plus visqueuse, il n'est pas fait d'hypothèse pénalisant supplémentaire.

Etant donné qu'un léger débordement est constaté dans la zone industrielle rive gauche, il est cartographié à dire d'expert.

Pour aider le dire d'expert, un appui avec de la modélisation « Très fluide » est réalisé. La modélisation en rhéologie « Extrêmement fluide TTTF » n'est pas réalisée car d'une part la hauteur est trop faible pour déborder, donc ce n'est pas possible et d'autre part elle est trop pénalisante alors que le débordement est faible.

En se modélisant l'écoulement avec la rhéologie « Très fluide » et en forçant une fraction du volume total à déborder (10%, soit 1000 m³), parce que cette rhéologie a une hauteur insuffisante pour déborder, on remarque que le parking rive gauche est directement touché par des hauteurs importantes (50 cm à plus d'1m) mais que la coulée ne se propage pas au-delà, même avec une rhéologie « Très fluide ».

La zone plate, voire en légère dépression, du parking protège les bâtis situés derrière en stockant et en ralentissant les débordements.

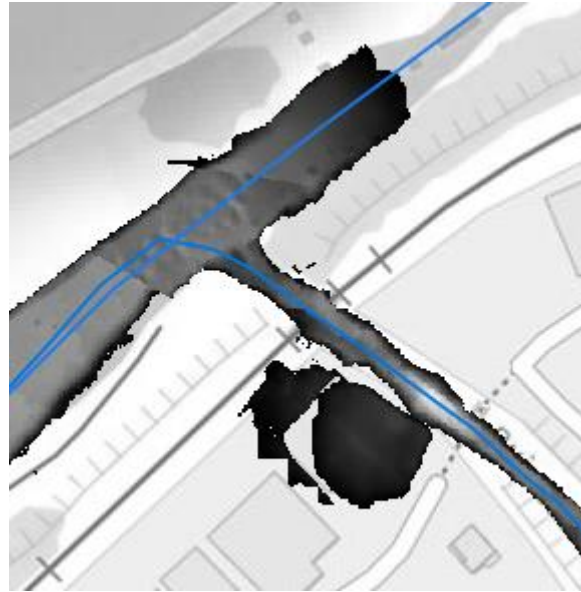
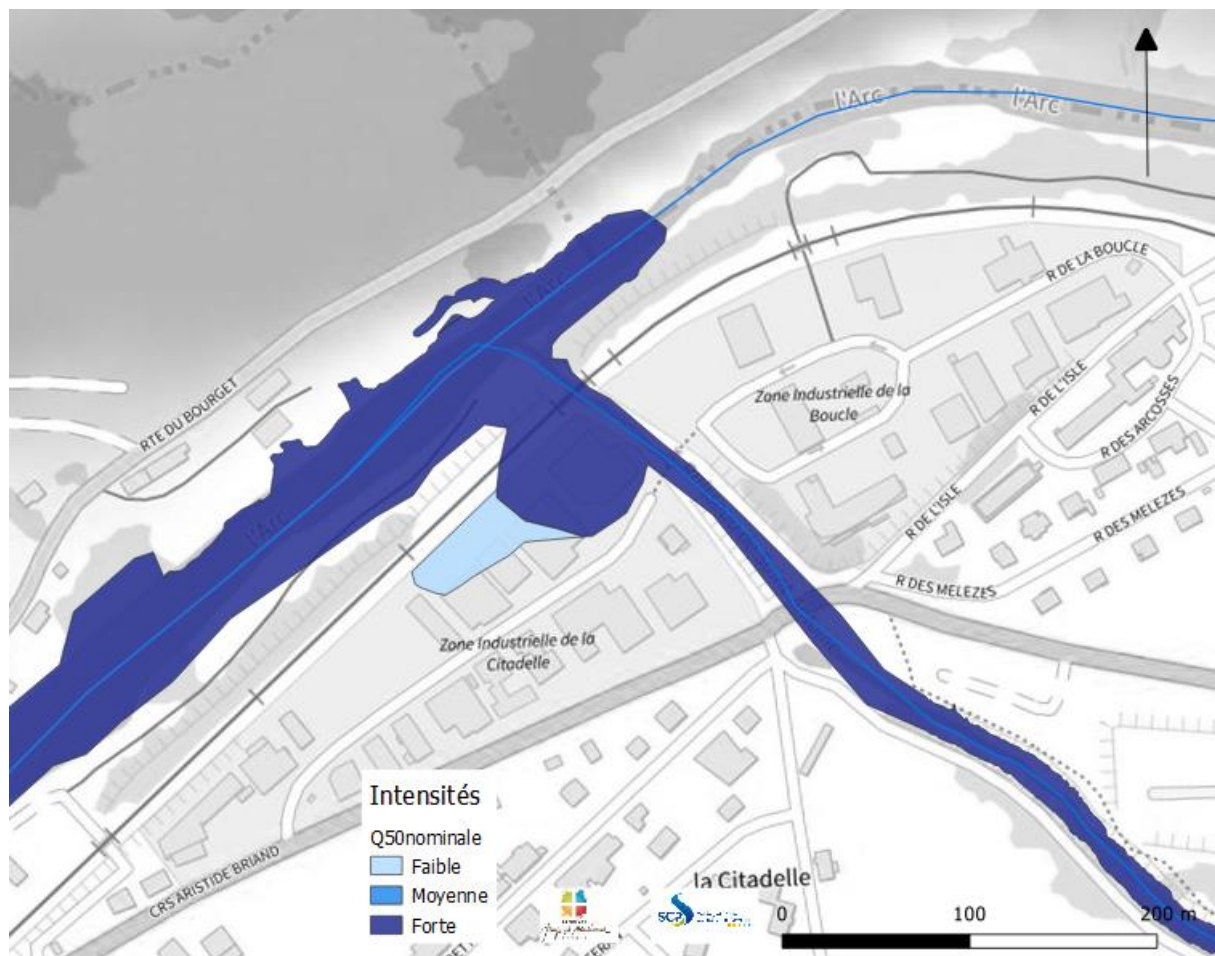


Figure 55 : modélisation de l'emprise de la Q50 en rhéologie « Très Fluide » avec forçage d'une partie du volume dans le débordement rive gauche préalablement identifié avec la rhéologie « Très Visqueuse »

La cartographie de la zone de débordement Q50 avec les niveaux d'intensités suivante est donc réalisée à dire d'expert avec appui de la modélisation.



6.5.1 Attribution de probabilités conditionnelles

Etant donné que le débordement a lieu uniquement en cas de rhéologie « Très Visqueuse », il est considéré qu'une rhéologie plus fluide (au maximum Visqueuse) puisse ne pas provoquer de débordement. Il est considéré qu'il y a autant de chance que l'une ou l'autre des rhéologies se produise.

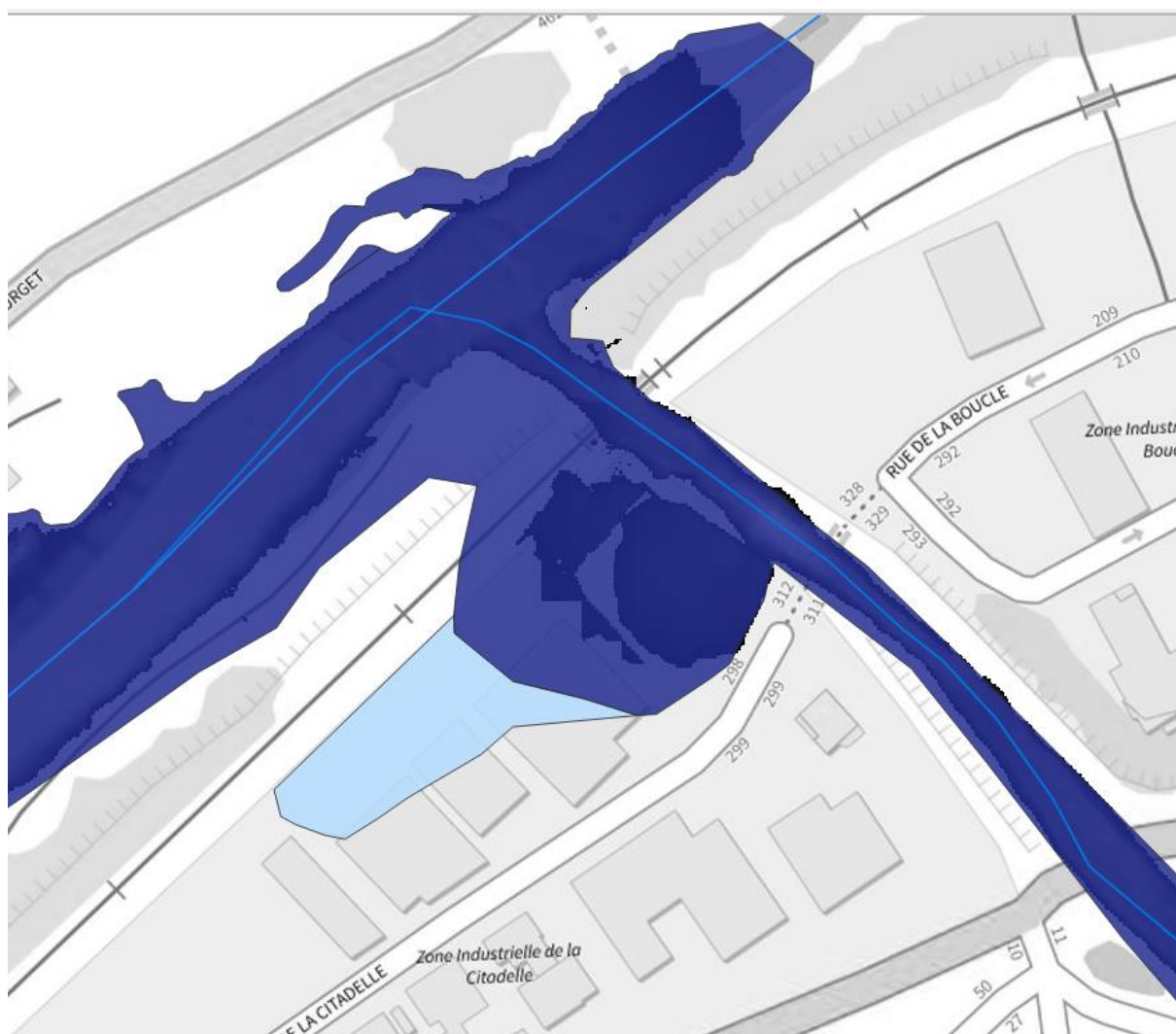
Le scénario nominal ne prend pas en compte l'écèlement du pic par la plage de dépôt.

Tableau 4 : Probabilités relatives quantitatives pour l'occurrence 100 ans

Sous Scénarios de la crue d'occurrence 100 ans	Probabilité relative (%)
Q50 nominal avec rhéologie « très visqueuse »	0.5
Q50 nominal avec rhéologie au maximum visqueuse	0.5
Q50_obstruction_partielle_pont	0
Q50_obstruction_quasi_totale_pont	0
Q50_obstruction_quasi_totale_pontSNCF	0
Q50_obstruction_partielle_chenal	0
Q50_obstruction_partielle_chenal_totalepont_totaleSNCF	0

6.5.2 Cartographie finale

Carte brute :



Carte des emprises et des niveaux d'intensité :



6.6 Crue type Q100 (rare)

6.6.1 Résultats bruts des modélisations

L'hydrogramme de la crue Q100 a été utilisé sans écrêtement par la plage de dépôt. Cependant il est considéré que les gros blocs sont stoppés par la plage et n'obstruent pas les ouvrages de franchissements ni le lit mineur.

Pour cette occurrence on constate des débordements pour la rhéologie « Très visqueuse ».

Les débordements sont localisés :

- En amont du pont de la RN1006 et en rive gauche uniquement, par le déversoir du petit bassin de rétention de bord de route, sans débordement en dehors du bassin.
- En aval immédiat du pont de la RN1006 et en rive gauche uniquement, par-dessus la digue.
- En aval immédiat de la passerelle et en rive gauche uniquement.

L'étude de la rhéologie « Visqueuse » confirme le débordement en zone artisanale, mais pas au pont de la RD.

Les rhéologies « Fluides » et inférieures ne provoquent aucun débordement.

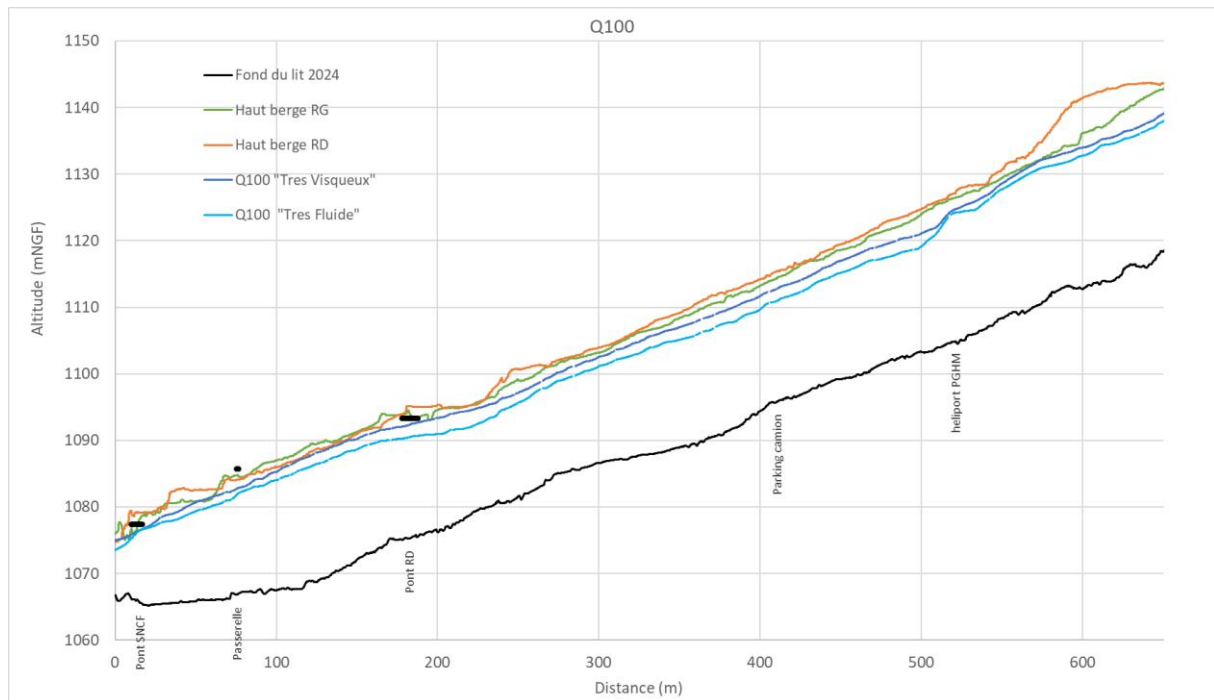


Figure 56 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »

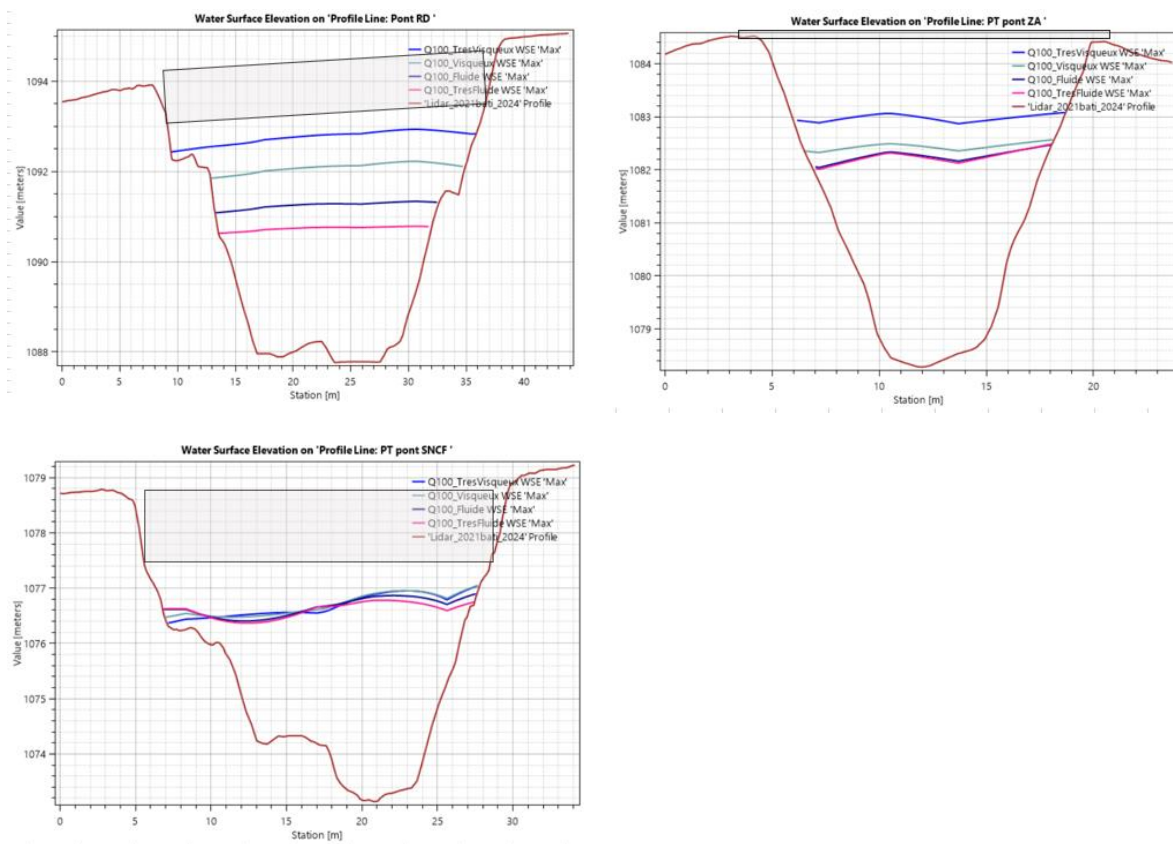


Figure 57 : La hauteur pour Q100 des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements

Notons que la ligne d'eau apparaît identique pour les 3 rhéologies au niveau du pont de la SNCF. Les deux explications suivantes conduisent à ce résultat :

- L'élargissement de la section au niveau du pont de la SNCF (17m) par rapport au chenal amont (environ 10m) conduit à une réduction de vitesse plus important sur la rhéologie fluide pour que la rhéologie visqueuse. Le ligne d'eau de la rhéologie augmente donc, rejoignant celle de des rhéologies plus visqueuses.
- Le logiciel hec-ras 2D génère souvent des pertes de charge au niveau des ouvrages dans le cas d'écoulement d'eau. Celle-ci est plus importante dans le cas de la rhéologie plus fluide, dont la ligne d'eau rejoint les rhéologies plus visqueuses. Cette perte de charge correspond à un phénomène réel au droit des ouvrages mais dans une proportion pas forcément exacte. Il n'est cependant pas possible de le vérifier. Cette explication est la plus probable car nous constatons que cette perte de charge est nettement diminuée en raffinant le maillage dans le rapport AVP. Dans ce chapitre, le maillage n'est pas spécialement raffiné à cet endroit et cette perte de charge va dans le sens de la sécurité.

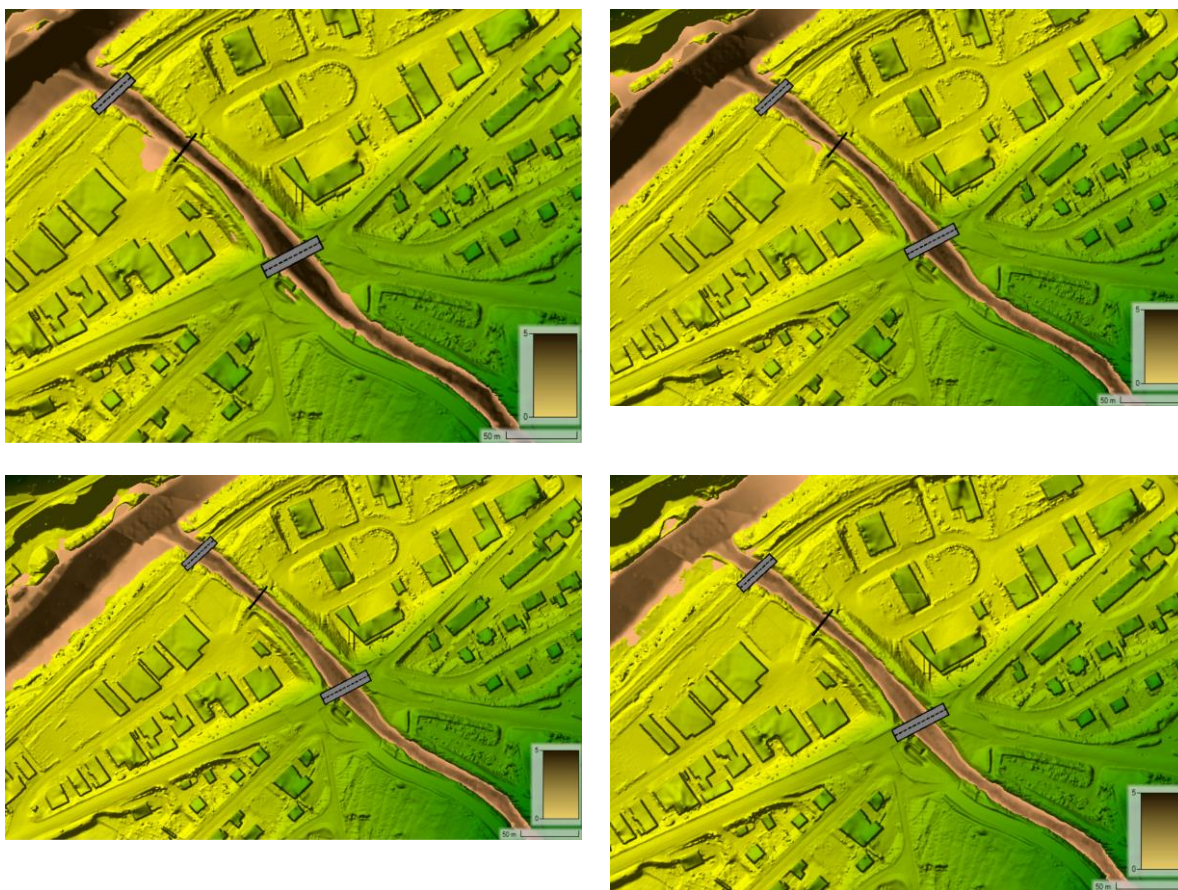


Figure 58 : En haut à gauche « Très Visqueux », en haut à droite « Visqueux », en bas à gauche « Fluide », en bas à droite « Très fluide »

6.6.2 Scénarios aggravants

6.6.2.1 Rhéologie « Très visqueuse »

Le scénario « Très visqueux » est un scénario aggravant, qui provoque des débordements en amont et aval immédiat du pont et qui est déjà inclus dans le scénario de base.

6.6.2.2 Obstruction partielle du Pont de la RD

Etant donné que la rhéologie « Très visqueuse » est très proche de la sous poutre du pont de la RD (40 cm de revanche) il est possible qu'un flottant s'accroche à la sous poutre et diminue la section hydraulique.

Dans la pratique, il est aussi possible que des premiers dépôts diminuent la section hydraulique avant l'arrivée de la bouffée principale. Ou que des gros blocs se déposent sur le replat du pont et diminuent le tirant d'air.

Pour ces 3 raisons, nous considérons ici le cas du scénario aggravant où le pont aurait une obstruction de 30%.

Pour ce faire, il est modélisé une ouverture carrée de section hydraulique de 31 m² (soit environ la section hydraulique avant le remplacement du pont) avec un coefficient de perte de charge de 0.7 en entrée.

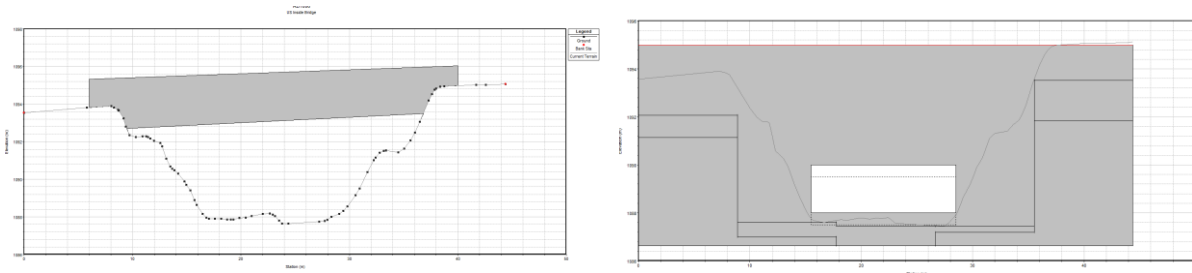


Figure 59 : Le pont de la RD modélisé avant obstruction et après (ouverture de 13m de long par 2.4m de haut)

La réduction de section de 80 m² à 30m² provoque un point de débordement en rive gauche en amont immédiat du pont.

La rhéologie « Visqueuse » est suffisamment fluide pour ne pas provoquer de débordement. Le pont passe en charge mais permet d'écouler tout le débit. Il n'y a donc pas d'étalement modélisé. Il est donc préférablement cartographié à dire d'expert.

L'absence de débordement pour la rhéologie « Visqueuse » qui comporte tout de même une contrainte seuil de 2000 Pa est rassurante sur la capacité du pont à évacuer l'essentiel du volume même partiellement obstrué.

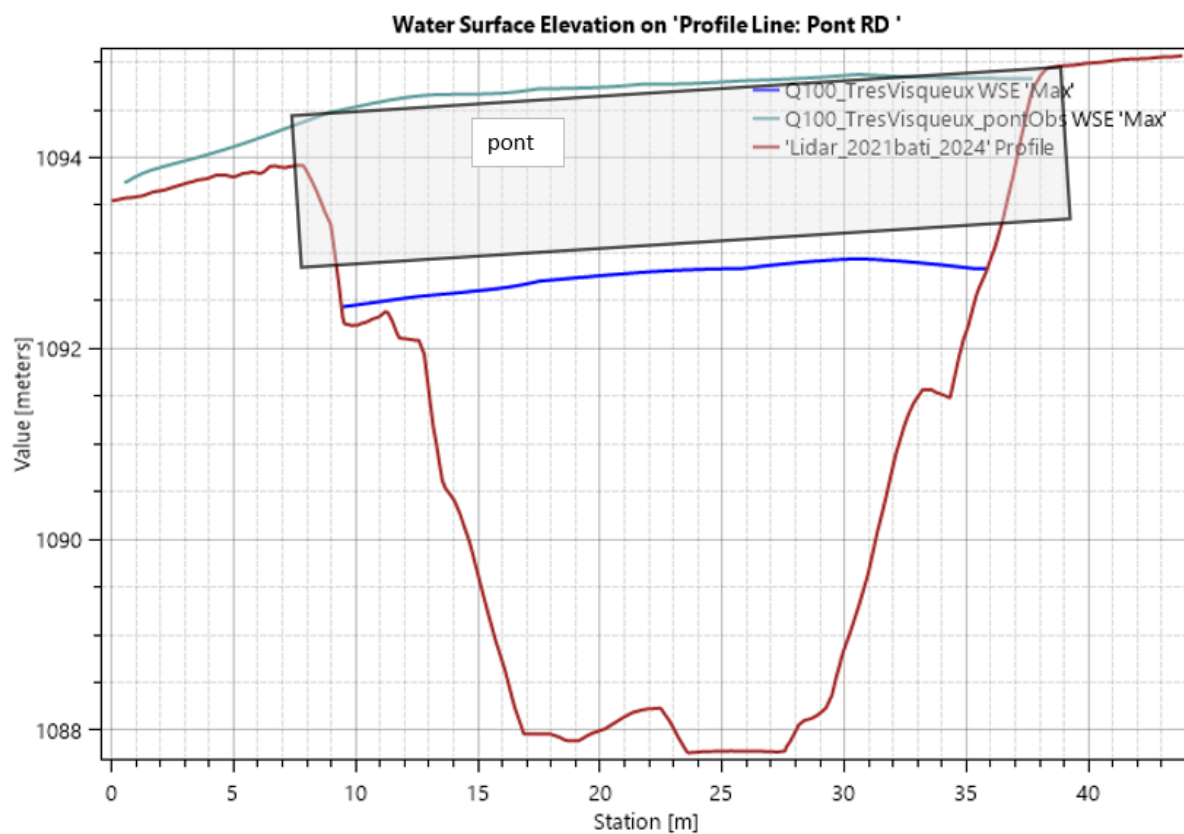


Figure 60 : Ligne d'écoulement avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (bleu foncé) et avec obstruction partielle du pont (bleu clair)



Figure 61 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction partielle du pont (rose)

6.6.2.3 Obstruction quasi totale du pont de la RD

Dans ce scénario, la plage de dépôt ne fonctionne pas, les gros blocs ne sont donc pas arrêtés et viennent obstruer quasi totalement le pont de la RD.

Dans ce scénario la section hydraulique restante est de 13 m², soit une réduction de 80%.

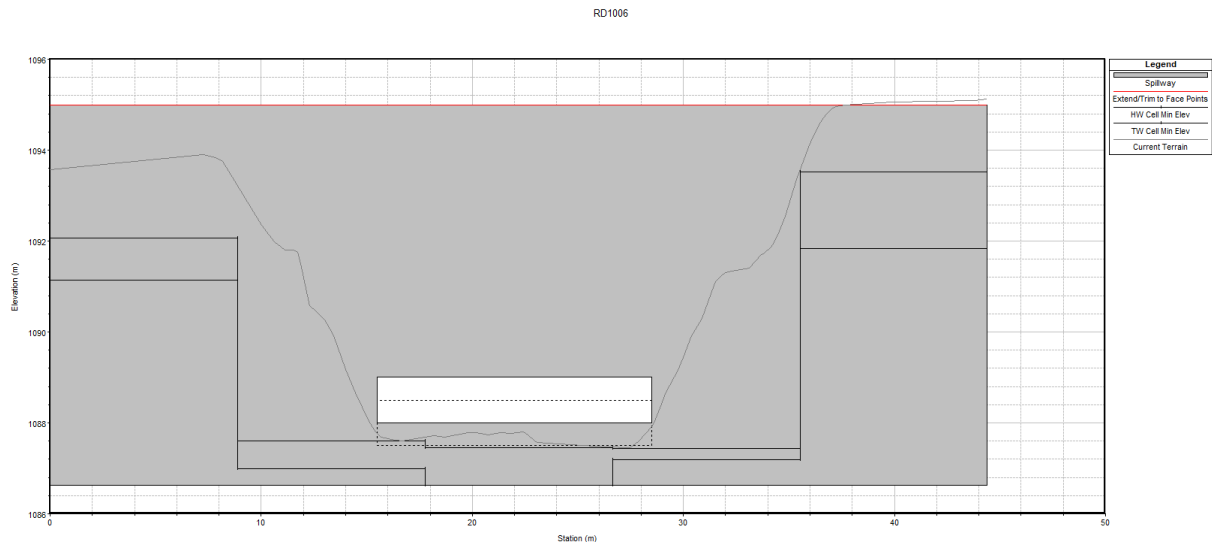


Figure 62 : modélisation de l'ouverture restante du pont après obstruction quasi-totale de 80% (ouverture de 13m de long par 1m de haut)

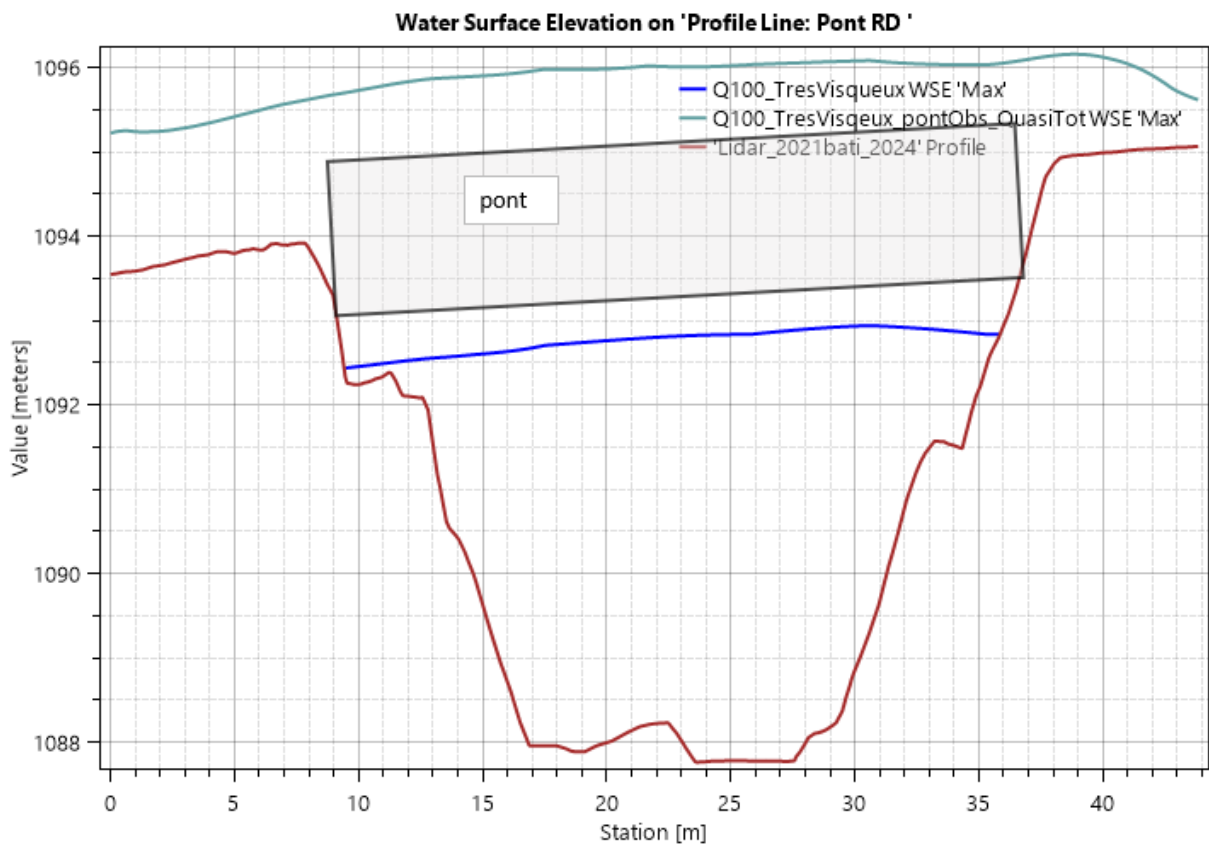


Figure 63 : Ligne d'écoulement avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (bleu foncé) et avec obstruction quasi-totale du pont (bleu clair)



Figure 64 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction quasi totale du pont (rose)

La réduction de section de 80 m² à 13m² provoque un point de débordement en amont immédiat du pont avec un étalement sur les deux rives.

Afin de bien prendre en compte l'étalement, c'est la rhéologie « Très fluide » à « Extrêmement fluide TTTF » qui est utilisée pour le modéliser (Figure 65). Les deux rhéologies sont représentatives d'un niveau d'intensité différent, la plus fluide étant plus étalée mais moins épaisse.

La simulation montre un étalement, en rive gauche de 450 ml à 760 ml.

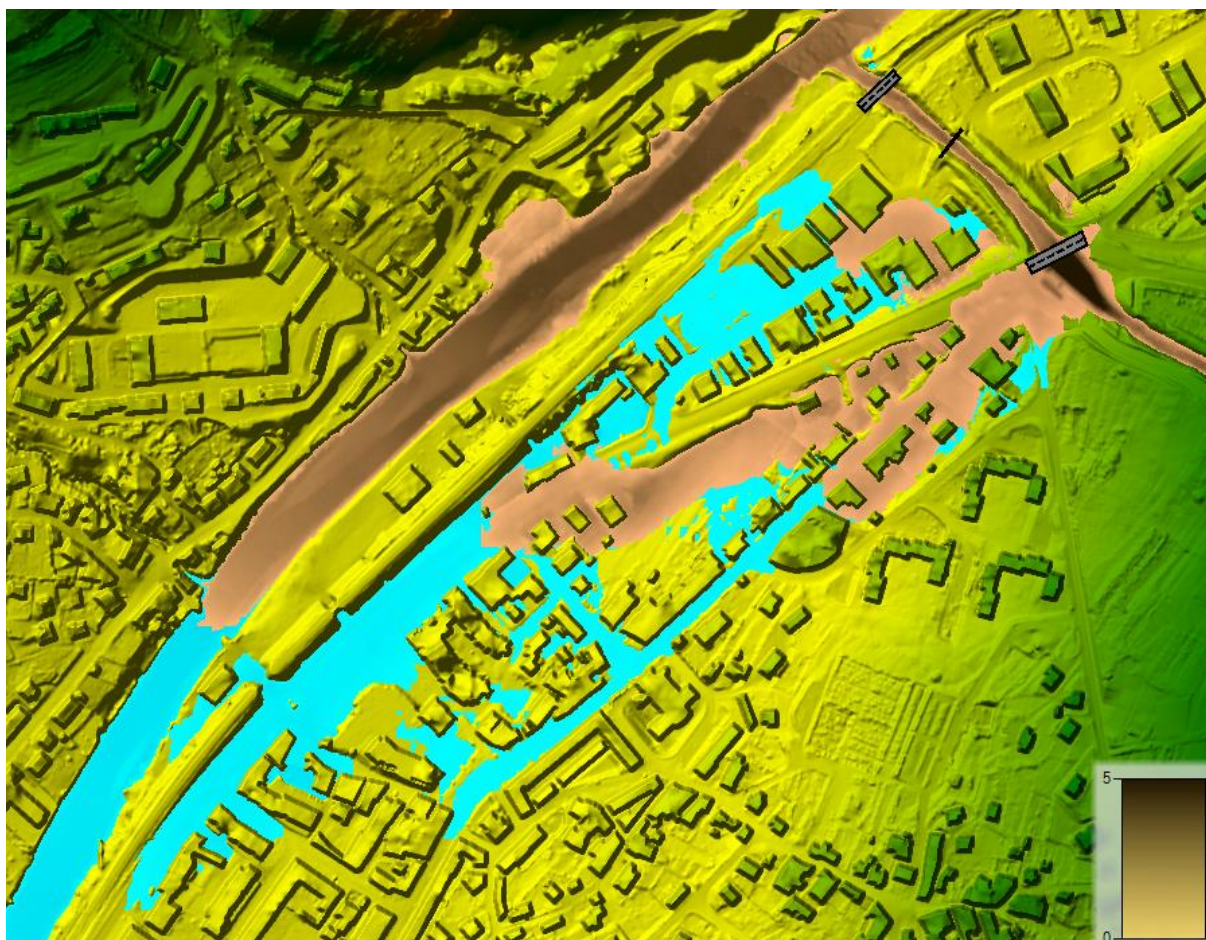


Figure 65 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 avec obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « Très Fluide » (marron), ou « extrêmement Fluide TTTF » (bleu).

6.6.2.1 Obstruction quasi totale du Pont de la SNCF

Dans ce scénario, la plage de dépôt ne fonctionne pas, les gros blocs ne sont donc pas arrêtés et viennent obstruer quasi totalement le pont de la SNCF.

Dans ce scénario la section hydraulique passe de 80 m^2 à 16 m^2 , soit une réduction de 80%. Pour rappel le niveau de la ligne de chemin de fer, soit le sommet du tablier du pont est de 1079 mNGF.

La modélisation en rhéologie « Très visqueuse » montre un point de débordement rive gauche qui remonte jusqu'à la passerelle et un léger débordement rive gauche en amont de la passerelle. Il n'y a pas de débordement rive droite.

La modélisation en rhéologie « Extrêmement fluide TTTF » (contrainte seuil de 200 Pa) montre un étalement jusqu'à 650 ml en rive gauche, sur le cours Aristide Briand jusqu'à la rue Paul-Bert (soit légèrement au-delà de l'emprise de 1987).

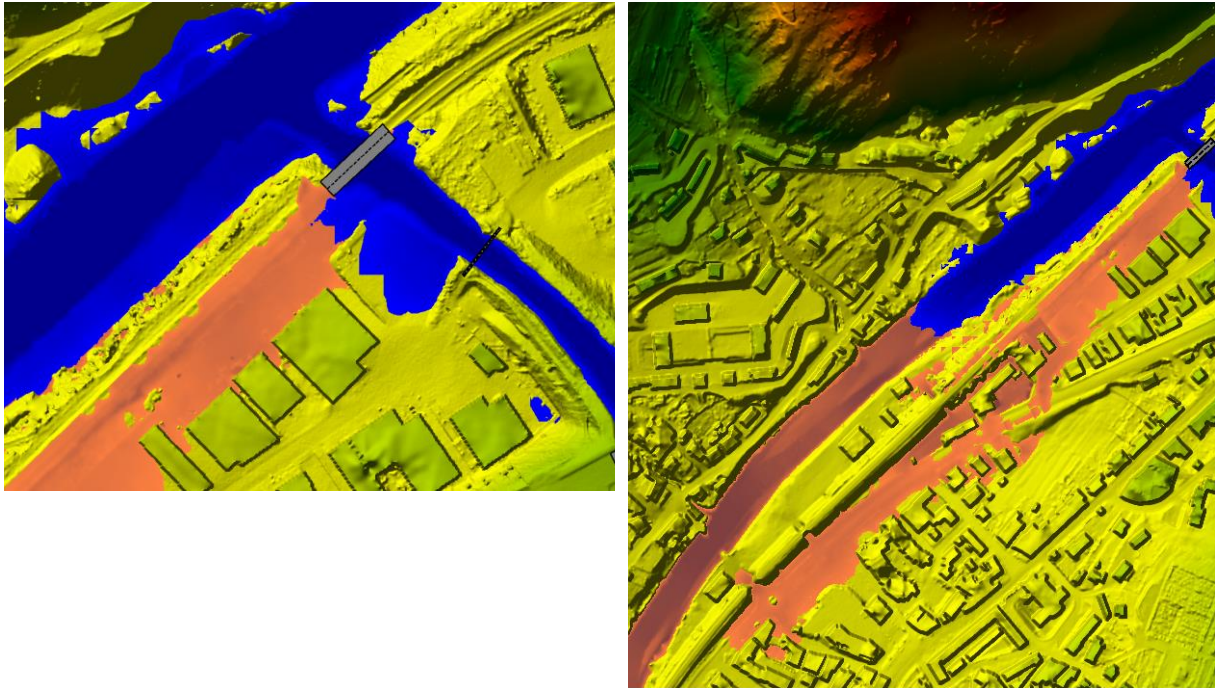


Figure 66 : Modélisation de l'obstruction quasi-totale du pont de la SNCF avec une rhéologie « Très visqueuse » (bleu) et « extrêmement fluide TTTF » (marron)

6.6.2.1 Obstruction partielle du chenal entre la plage de dépôt et le pont de la RD

Dans le cas où la plage de dépôt ne permet pas de retenir les gros blocs, ou que des blocs de berge tombent dans le lit, et que ces derniers entravent l'écoulement au niveau du chenal entre le pont de la RD et la plage de dépôt, alors des débordements en amont du cône de déjection pourraient se produire.

Cette hypothèse est équivalente en termes de conséquence, à faire les hypothèses suivantes

- d'une obstruction par un ou des blocs qui viennent de la plage de dépôt ou des berges,
- d'un engravement dans le lit,
- ou l'hypothèse que la contrainte seuil est très forte (une valeur quasi impossible d'après le calage d'ETRM 2018 sur les crues historiques) et qu'après les premiers débordements liés à cette forte viscosité, une bouffée plus fluide déborde.

Pour cela deux positions de blocage sont modélisées, une en aval immédiat de la plage de dépôt, l'autre entre la plage de dépôt et le pont de la RD.

Ces blocages ont été modélisés en entravant le fond du lit et en laissant libre la partie haute. Les obstructions modélisées sont de l'ordre de 60%.

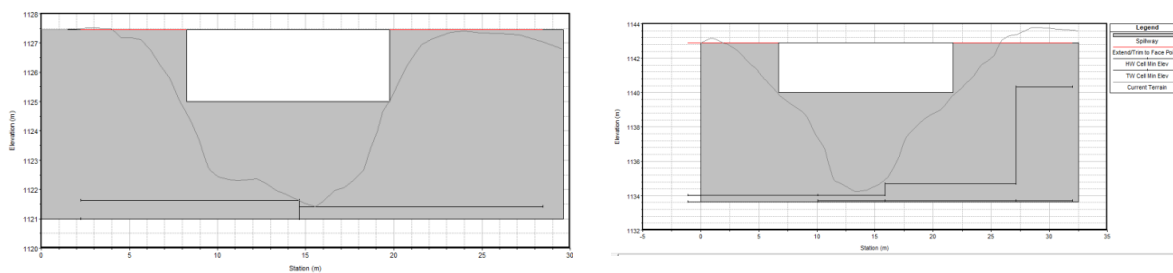


Figure 67 : obstruction du chenal en position 1 (entre la PDD et le pont de la RD) et en position 2 (à l'aval immédiat de la PDD)



Figure 68 : Localisation des deux obstructions de chenal pour le scénario aggravant de la crue extrême

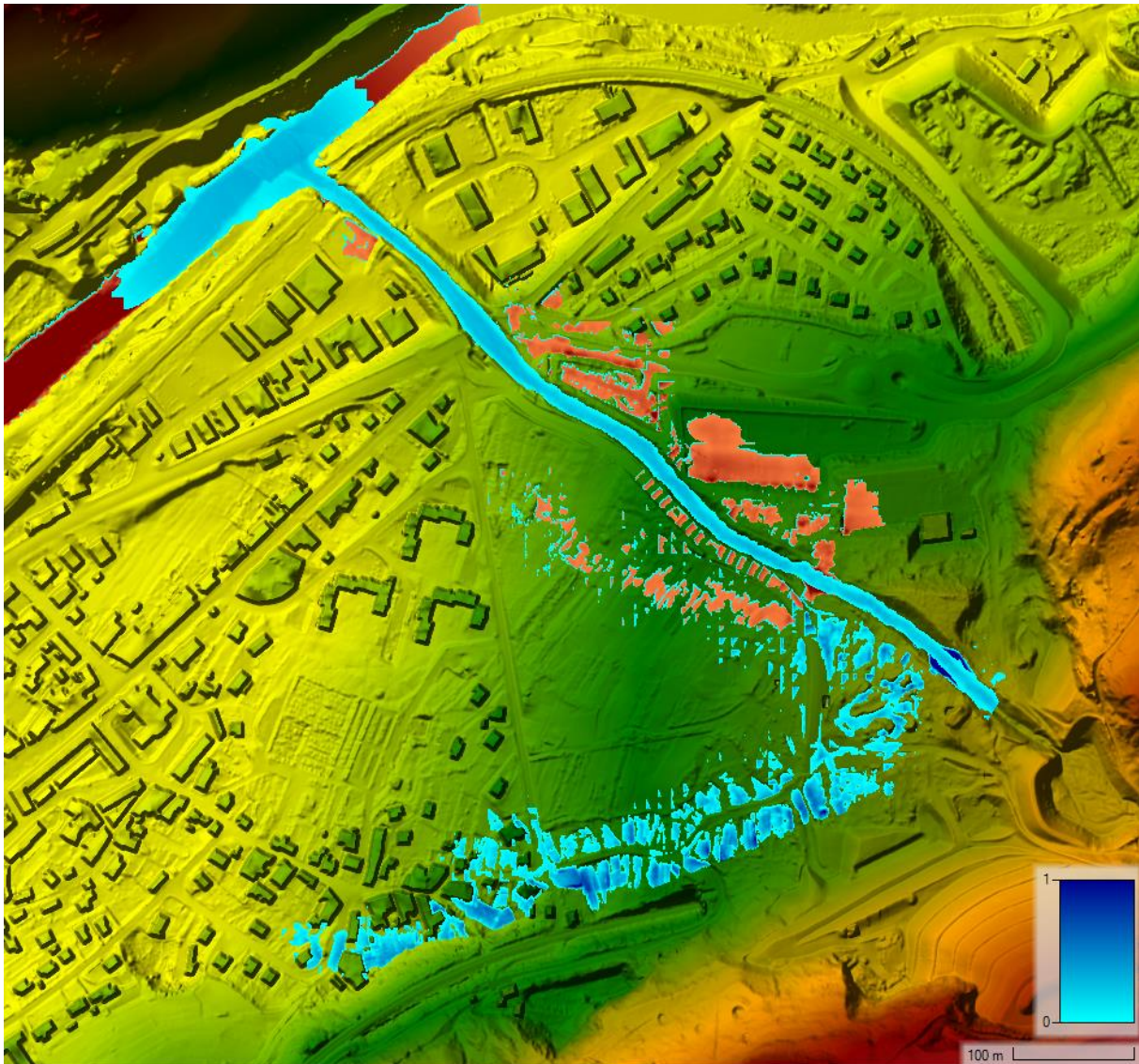


Figure 69 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue Q100 pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu).

6.6.3 Attribution de probabilités conditionnelles

La revanche hydraulique sous le pont de la RD1006 est inférieure à 50 cm dans le cas de la rhéologie « Très visqueuse ». Elle n'est pas suffisante pour assurer le passage du front de lave, ou d'une première bouffée suivie d'une deuxième.

Par conséquent, le scénario dominant de la Q100 est une obstruction du pont de la RD.

La forte hauteur sous tablier (5.5m minimum) réduit la probabilité de blocage total par des gros blocs et la forte largeur (22m) réduit la probabilité d'obstruction totale par des flottants. De ce fait l'obstruction du pont varie entre 30 % et 80 % (dite quasi-totale). Il est accordé une probabilité plus importante pour l'obstruction quasi-totale étant donné qu'elle provoque des débordements davantage représentatifs d'une crue d'occurrence 100 ans.

De même pour le pont SNCF, l'obstruction quasi-totale est envisagée. La probabilité est un peu inférieure à celle du blocage du pont de la RD étant donné qu'il est situé plus en aval, que la pente est plus forte et qu'il n'y a pas de surlargeur autant marquée qu'au pont de la RD qui favorise les dépôts.

La probabilité de blocage du chenal est très faible car l'étude de la crue de 1987 montre qu'il faut une contrainte seuil supérieure à 4000 Pa (ce qui est exclue par ETRM 2016) ou un dépôt de 2.5m dans le lit pour un débordement du chenal.

Le Tableau 5 présente les probabilités relativement les unes aux autres de manière qualitative et avec des formes verbales classiques rencontrées dans les rapports d'hydrauliques (qui ne correspondent pas spécifiquement aux formes verbales de Vick ou Mastrandea).

Les probabilités sont calculées dans un arbre des probabilités (Figure 70) selon méthodologie INRAE & ONF-RTM Piton, Carlados & Tacnet – V2.2 – 2022.

Le Tableau 6 résume leur valeur quantitative.

Tableau 5 : Probabilités relatives qualitative pour l'occurrence 100 ans

Sous Scénarios de la crue d'occurrence 100 ans	Probabilité relative (%)
Q100 nominal	« Très improbable » parce que la revanche est inférieure à 50cm
Q100 obstruction_partielle_pont	« Probable » mais un peu trop optimiste parce que la revanche est inférieure à 50cm
Q100 obstruction_quasi totale_pont	« Très probable » le sous scénario le plus probable
Q100 obstruction_quasi_totale_pontSNCF	« Très probable » parce que la revanche est inférieure à 1m mais moins probable que le sous scénario précédent car plus de revanche, plus de pente, moins de surlargeur localisée et position située en aval du pont de la RD
Q100_obstruction_partielle_chenal	« Très improbable » d'après 5.5 du rapport hydraulique (calage 1987) car il faudrait une contrainte seuil beaucoup trop importante pour expliquer des débordements dans le chenal amont au pont de la RD mais moins improbable que le cas suivant.
Q100 _obstruction_partielle_chenal_totalepont_totaleSNCF	« Exceptionnellement improbable »

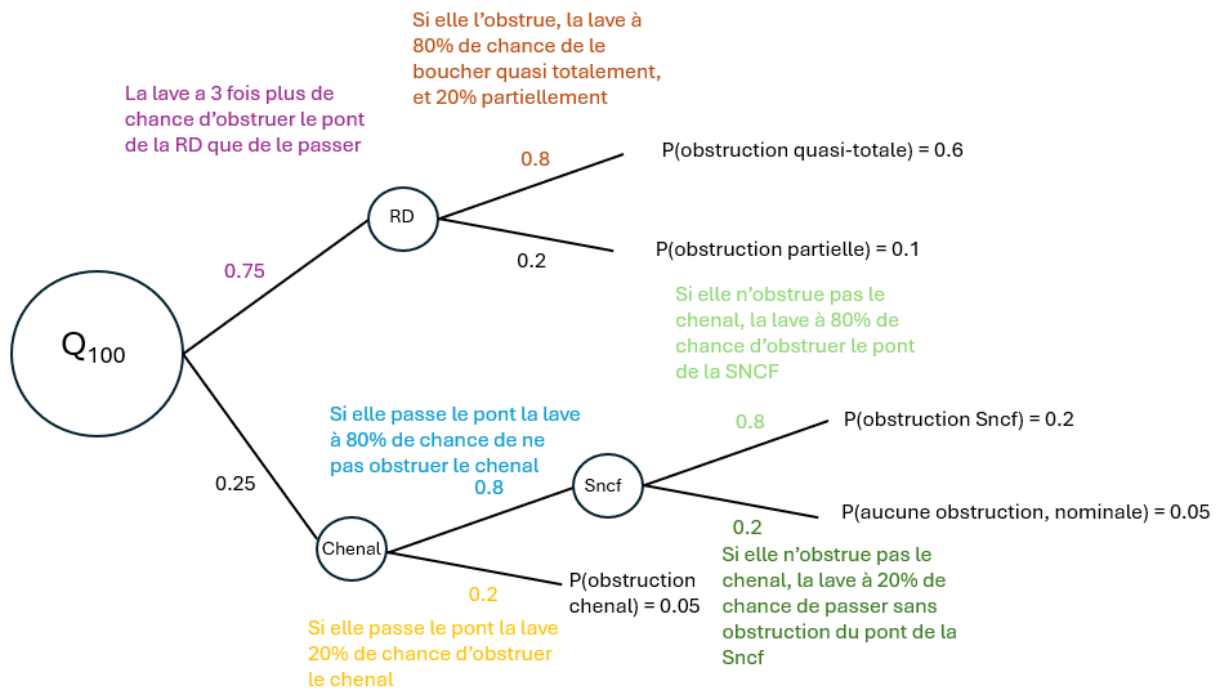


Figure 70 : Arbre des probabilités de la Q100 selon méthodologie INRAE & ONF-RTM Piton, Carlados & Tacnet – V2.2 – 2022

Tableau 6 : Probabilités relatives quantitatives pour l'occurrence 100 ans

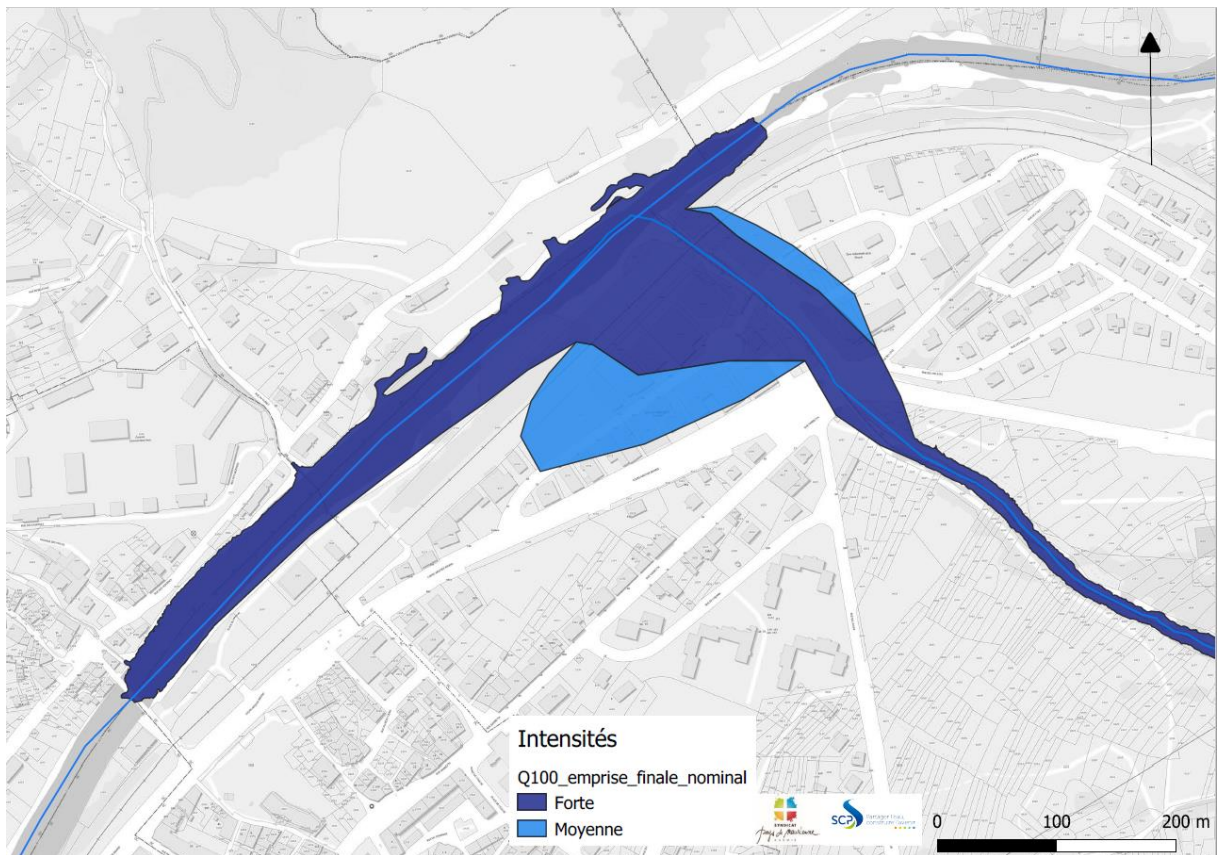
Sous Scénarios de la crue d'occurrence 100 ans	Probabilité relative (%)
Q100 nominal	0.05
Q100_obstruction_partielle_pont	0.1
Q100_obstruction_quasi_totale_pont	0.6
Q100_obstruction_quasi_totale_pontSNCF	0.2
Q100_obstruction_partielle_chenal	0.05
Q100_obstruction_partielle_chenal_totalepont_totaleSNCF	0

6.6.1 Cartographie finale de l'emprise et de l'intensité

A partir des résultats de modélisation brutes, les cartes sont complétées à dire d'expert (terrain, topographie, historiques, REX) et les emprises finales sont présentées ci-dessous.

6.6.1.1 Sous scénario fonctionnement nominal

Carte des emprises et des niveaux d'intensité :



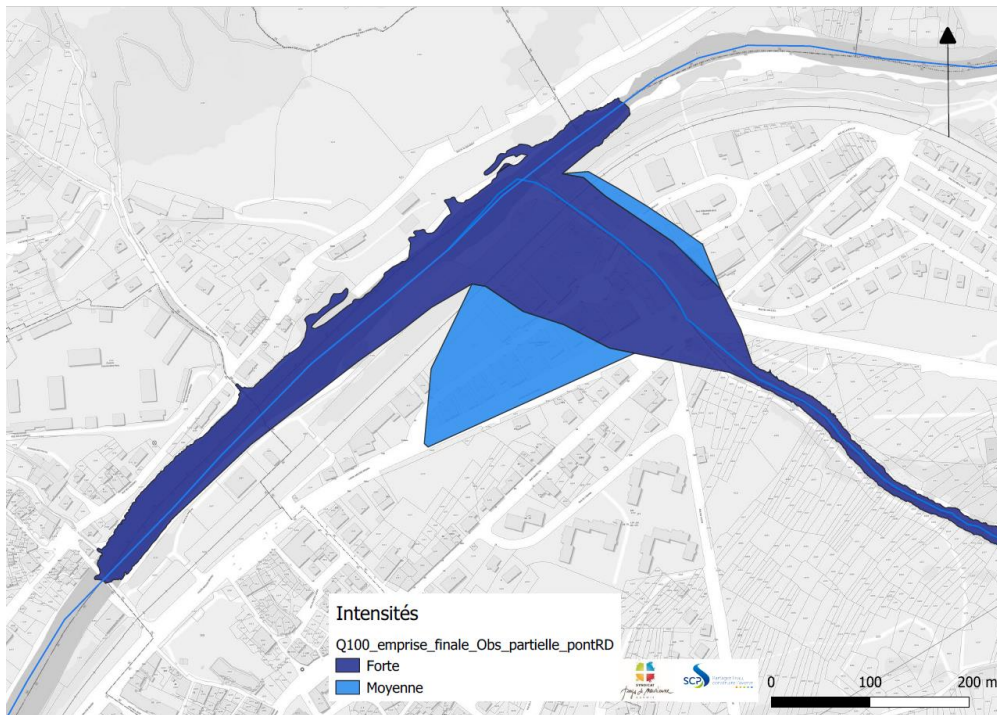
6.6.1.2 Sous scénario obstruction partielle (30%) du pont de la RD1006

Carte brute :



Figure 71 : Q100 obstruction à 30% du pont de la RD1006. Superposition des résultats bruts de modélisations (toutes rhéologies confondues), des cheminements préférentiels et des classes d'intensité retenues

Carte des emprises et des niveaux d'intensité :



6.6.1.3 Sous scénario obstruction quasi-totale (80%) du pont de la RD1006

Carte brute :

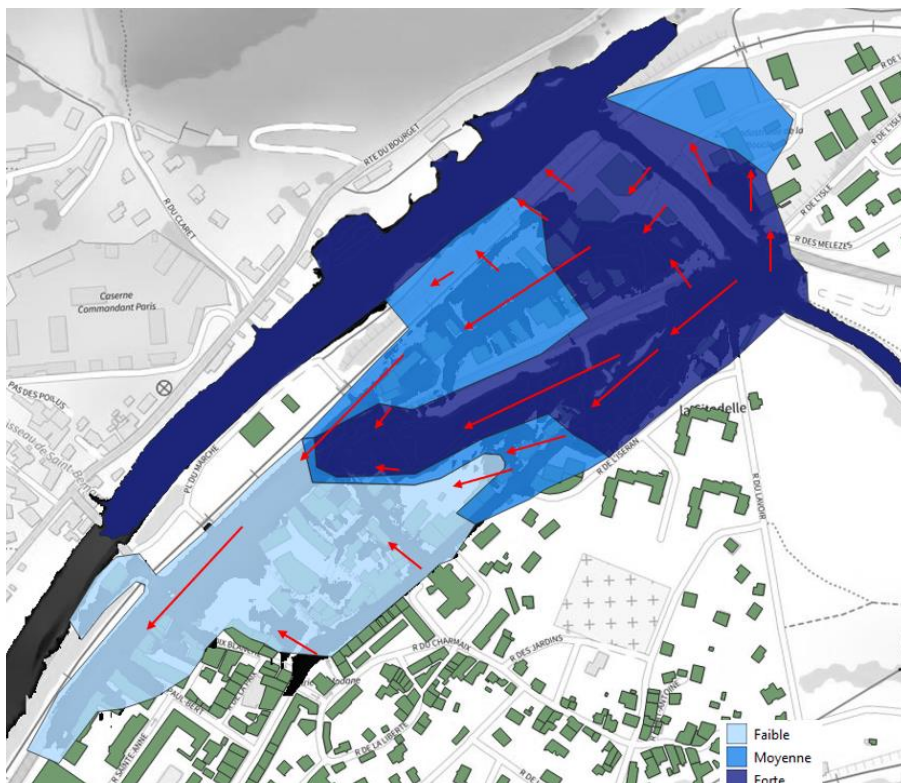


Figure 72 : Q100 obstruction à 80% du pont de la RD1006 (quasi-totale). Superposition des résultats bruts de modélisations (toutes rhéologies confondues), des cheminements préférentiels et des classes d'intensité retenues

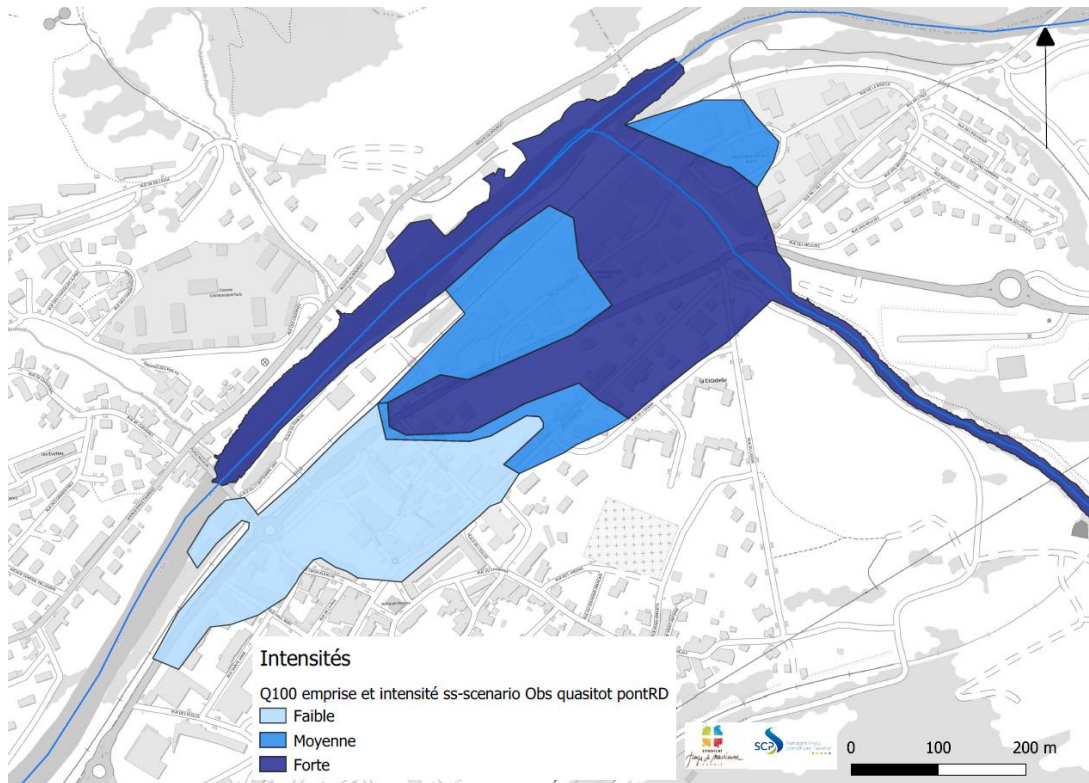
Carte des emprises et des niveaux d'intensité :

Figure 73 : Cartographie de l'intensité et emprise de la Q100 du sous scénario obstruction à 80% (quasi-totale), du pont SNCF

6.6.1.4 Sous scénario obstruction quasi-totale (80%) du pont de la SNCF :

Carte brute



Figure 74 : Q100 obstruction à 80% du pont SNCF (quasi-totale). Superposition des résultats bruts de modélisations (toutes rhéologies confondues), des cheminements préférentiels et des classes d'intensité retenues

Carte des emprises et des niveaux d'intensité :

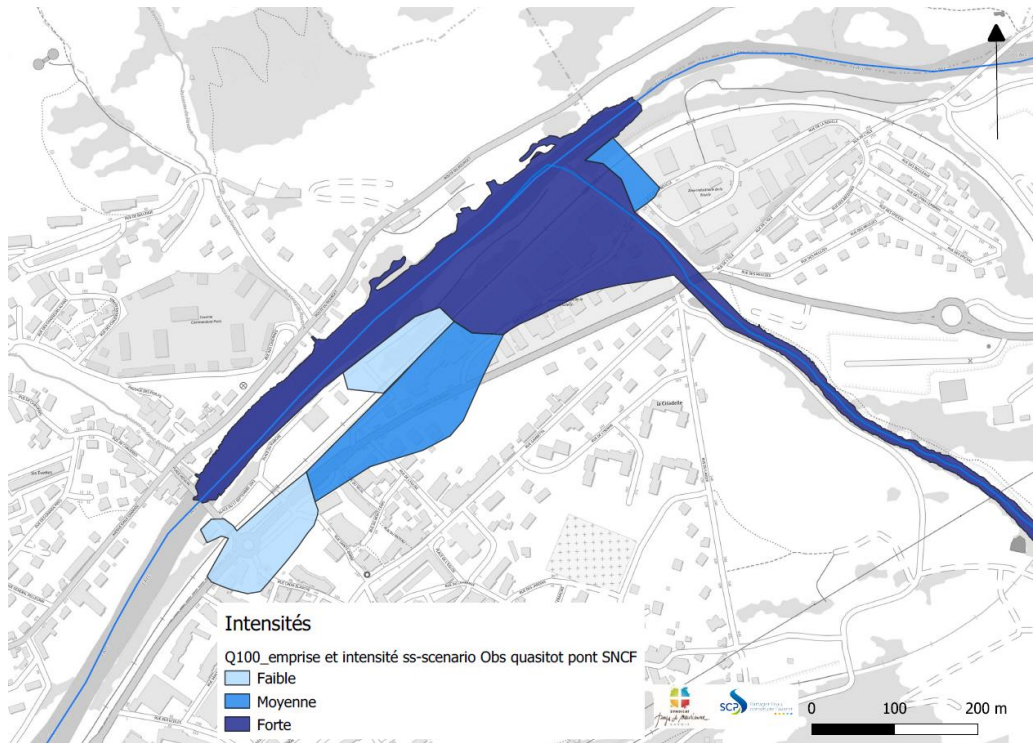
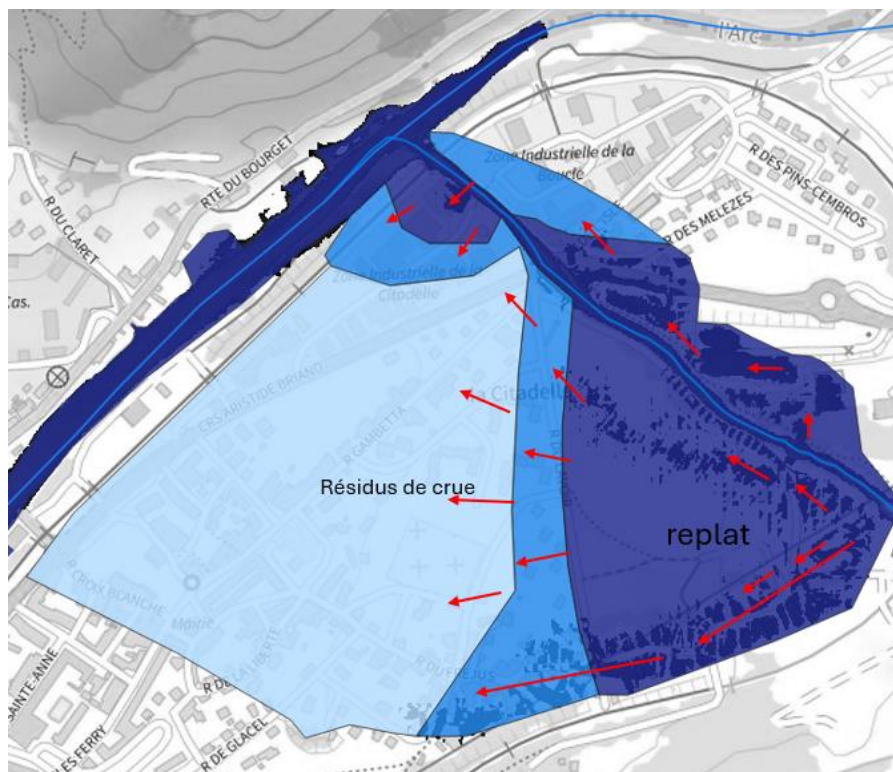
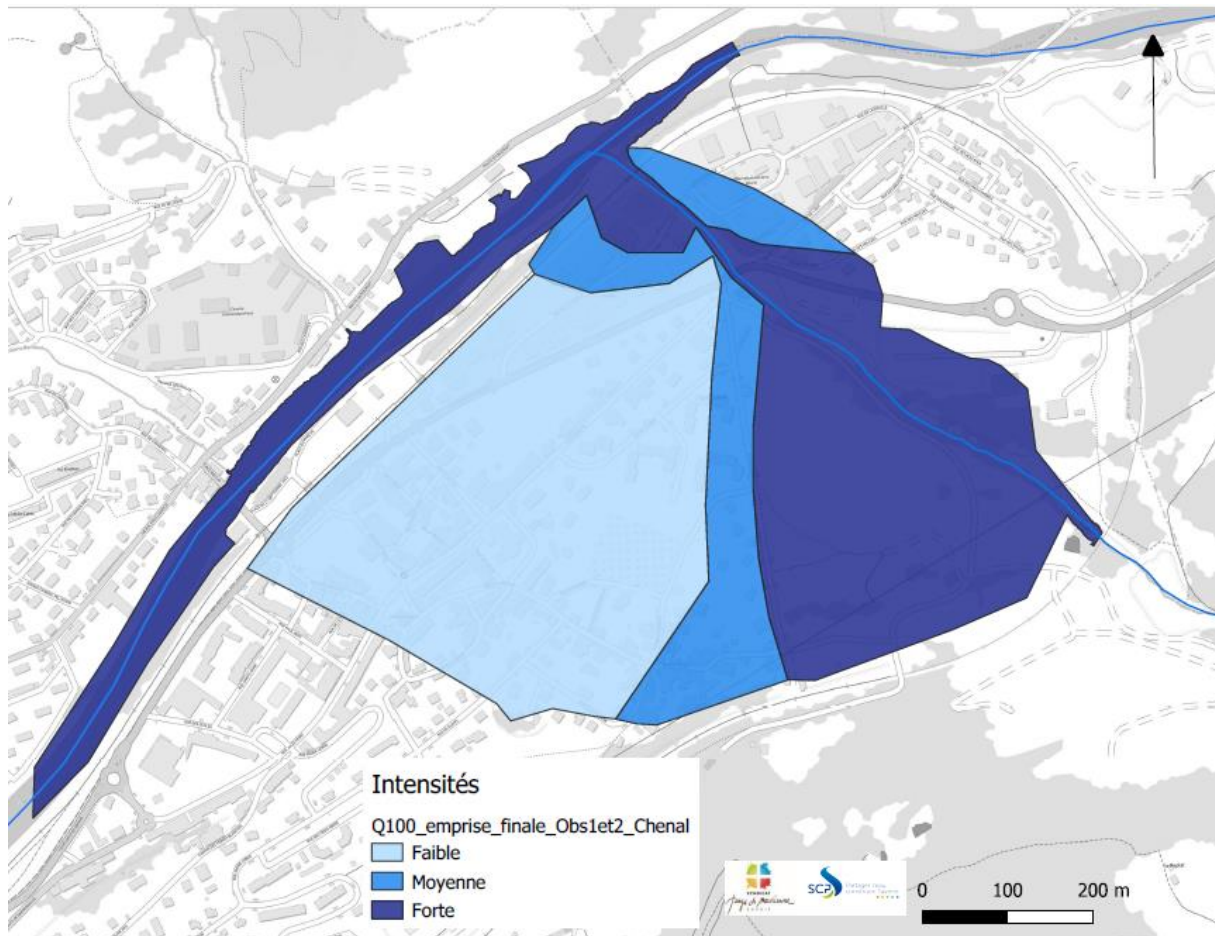


Figure 75 : Cartographie de l'intensité et emprise de la Q100 du sous scénario obstruction à 80% (quasi-totale), du pont SNCF

6.6.1.1 Sous scénario obstruction partielle du chenal entre la plage de dépôt et le pont de la RD

Carte brute :



Carte des emprises et des niveaux d'intensité :

6.7 Crue type exceptionnelle T>100 ans

6.7.1 Résultats bruts des modélisations

L'hydrogramme de la crue exceptionnelle a été utilisé sans écrêtement par la plage de dépôt. Cependant il est considéré que les gros blocs sont stoppés par la plage et n'obstruent pas les ouvrages de franchissements ni le lit mineur.

Pour cette occurrence on constate des débordements pour la rhéologie « Très visqueuse ».

Les débordements sont localisés :

- En amont du pont de la RN1006 et en rive gauche uniquement, par le déversoir du petit bassin de rétention routier, sans débordement en dehors du bassin.
- En aval immédiat du pont de la RN1006 et en rive gauche et droite, par-dessus la digue.
- En aval immédiat de la passerelle et en rive gauche uniquement.

L'étude de la rhéologie « Visqueuse » confirme le débordement en zone artisanale, ce qui le rend d'autant plus certain, mais pas au pont de la RD.

Les rhéologies « Fluide » et « Très fluide » provoquent un débordement dans la zone artisanale, en aval immédiat de la passerelle et en rive gauche uniquement mais avec une très faible emprise de propagation.

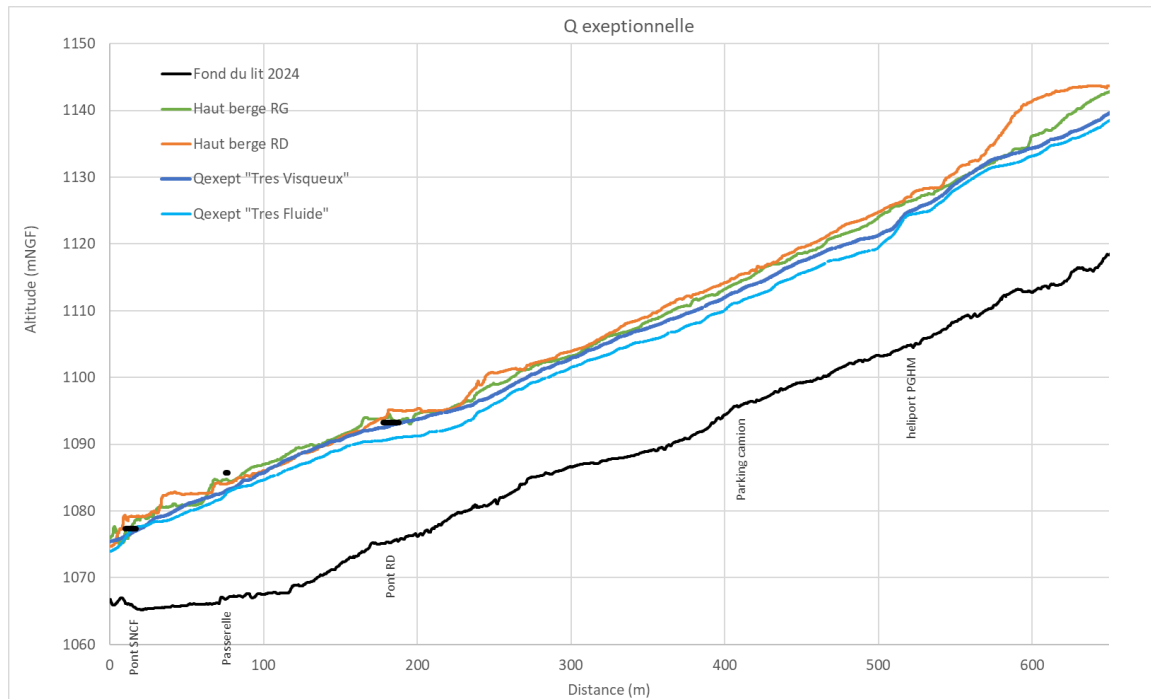


Figure 76 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »



Figure 77 : vue en plan des hauteurs et des débordements modélisés avec un hydrogramme Q100 pour une rhéologie « Très Visqueuse »,

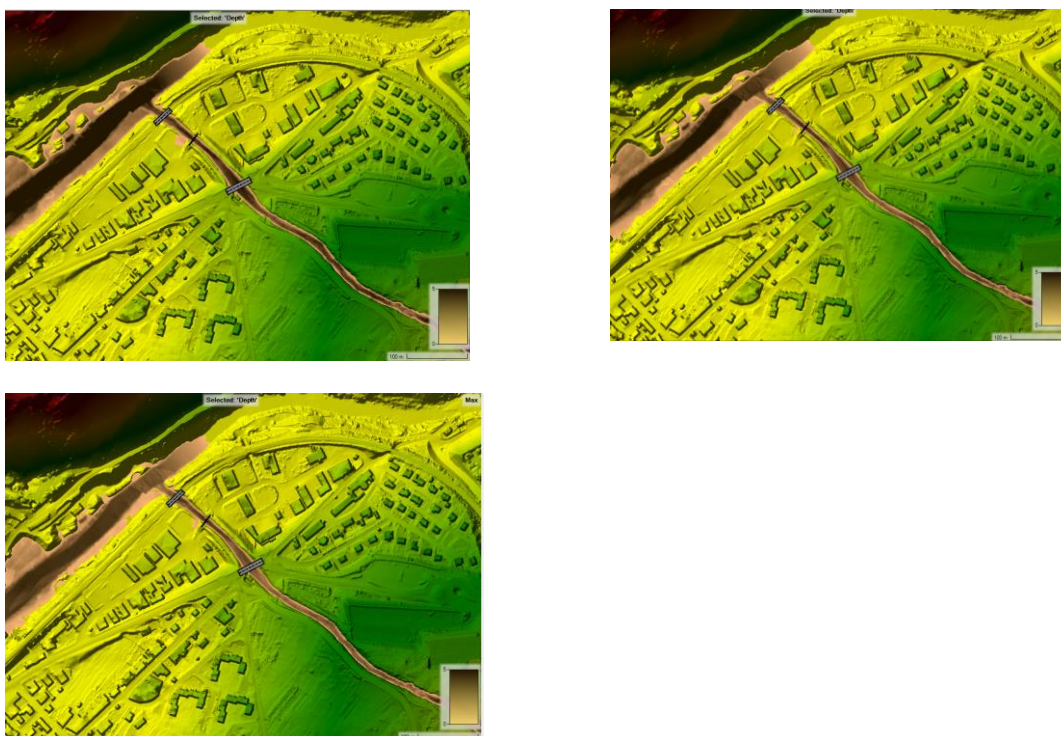


Figure 78 : En haut à gauche « Visqueux », en haut à droite « Fluide », en bas à gauche « Très fluide »

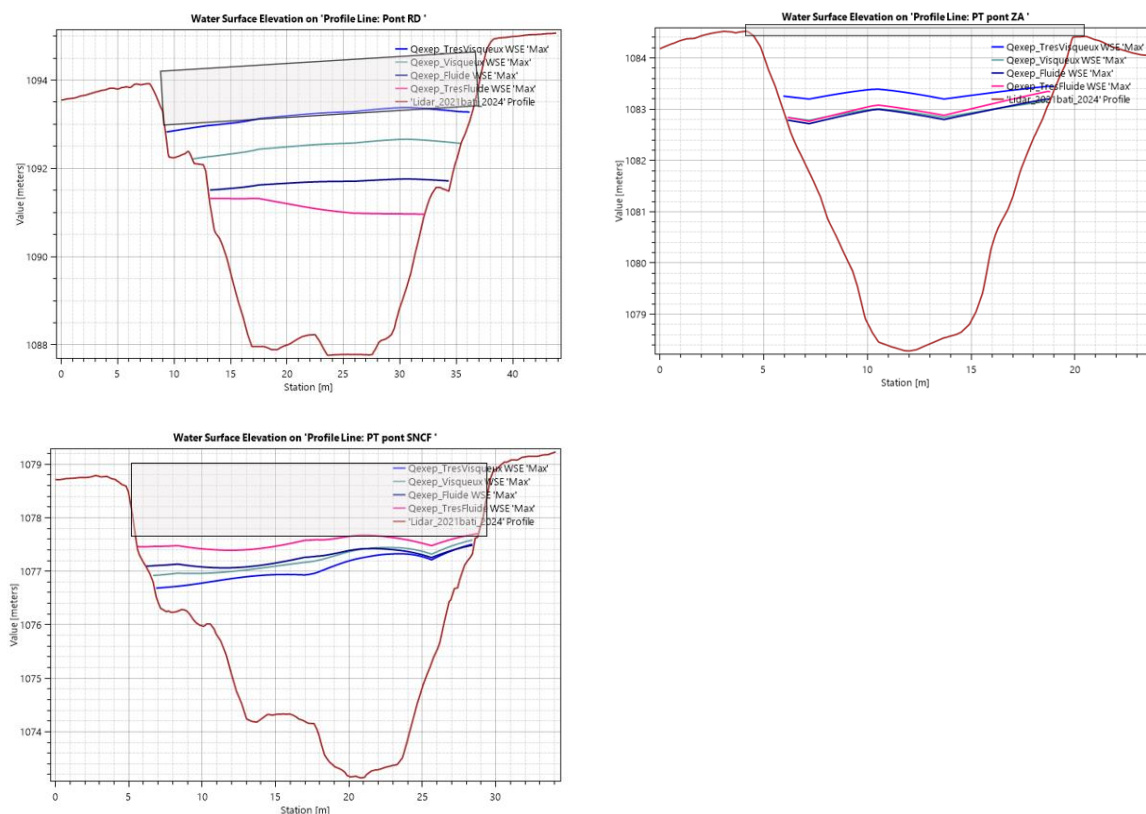


Figure 79 : La hauteur pour Qexceptionnelle des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements

6.7.2 Scénarios aggravants

6.7.2.1 Rhéologie « Très visqueuse »

Le scénario « Très visqueux » est un scénario aggravant, qui provoque des débordements en amont et aval immédiat du pont de la RD, et qui est déjà inclus dans le scénario de base.

6.7.2.2 Obstruction totale du Pont de la RD

Dans ce scénario, la plage de dépôt ne fonctionne pas, les gros blocs ne sont donc pas arrêtés et viennent obstruer quasi totalement le pont de la RD.

Dans ce scénario la section hydraulique restante est de 13 m², soit une réduction de 80%.



Figure 80 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue exceptionnelle pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction quasi totale du pont (rose)

Etant donné les déversements certains en cas d'obstruction du pont à 80%, c'est la rhéologie « Très fluide » qui est utilisée pour modéliser l'étalement (Figure 84).

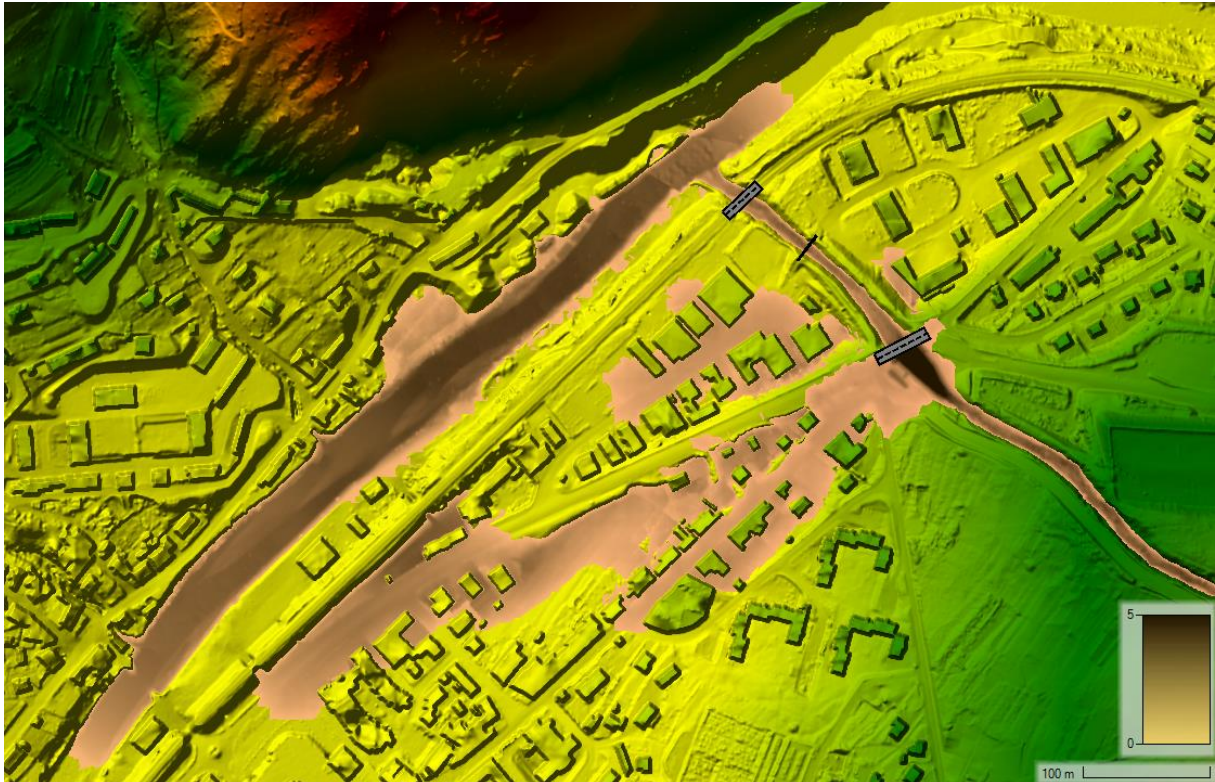


Figure 81 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue exceptionnelle pour une rhéologie « Très Fluide », avec obstruction quasi-totale du pont (marron)

La simulation montre un étalement, en rive gauche sur 560 ml.

6.7.2.3 Obstruction partielle du chenal entre la plage de dépôt et le pont de la RD

Dans le cas où la plage de dépôt ne permet pas de retenir les gros blocs, et que ces derniers entravent l'écoulement au niveau du chenal entre le pont de la RD et la plage dépôt, alors des débordements en amont du cône de déjection pourraient se produire (Figure 82).

Cette hypothèse est équivalente à celle de la Q100 (s'y référer pour la méthode de modélisation).

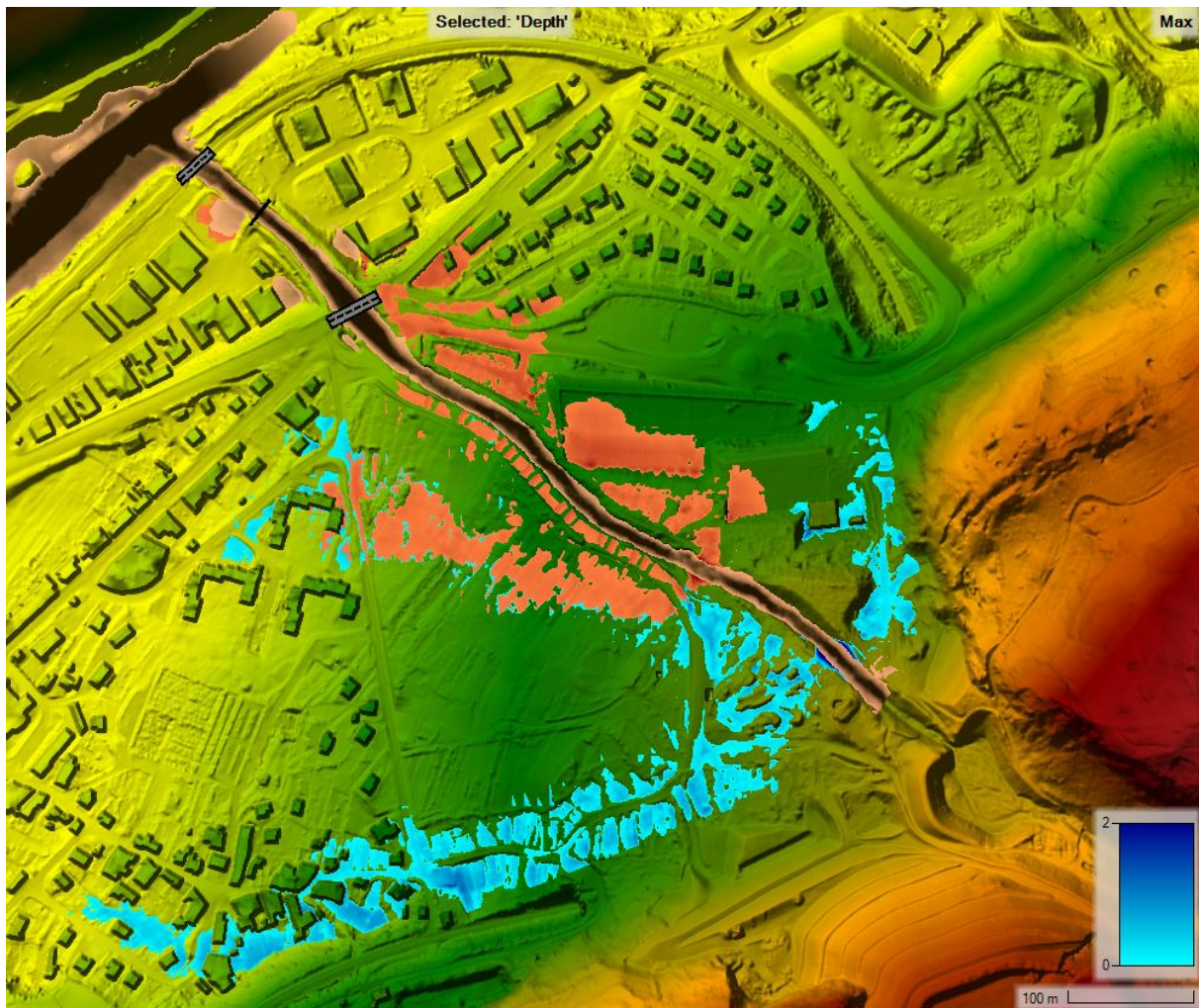


Figure 82 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue exceptionnelle pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu).

6.7.1 Attribution de probabilités conditionnelles

La revanche hydraulique sous le pont de la RD1006 est nulle dans le cas de la rhéologie « Très visqueuse ». L'écoulement accroche la sous poutre, par conséquent, l'ouvrage n'est pas suffisant pour assurer le passage du front de lave, ou d'une première bouffée suivie d'une deuxième.

Par conséquent, le scénario dominant de la Qexp est une obstruction du pont de la RD.

De même pour le pont SNCF, l'obstruction quasi-totale est envisagée. La probabilité est un peu inférieure à celle du blocage du pont de la RD étant donné qu'il est situé plus en aval, que la pente est plus forte et qu'il n'y a pas de surlargeur autant marquée qu'au pont de la RD qui favorise les dépôts.

Le blocage du chenal est «très improbable car l'étude de la rue de 1987 montre qu'il faut une contrainte seuil supérieure à 4000 Pa (ce qui est exclu par ETRM 2016) ou un dépôt de 2.5m dans le lit pour un débordement du chenal.

Le Tableau 5 présente les probabilités relatives de manière qualitative et le Tableau 6 traduit leur valeur quantitativement.

Tableau 7 : Probabilités relatives qualitative pour l'occurrence exceptionnelle (>100ans)

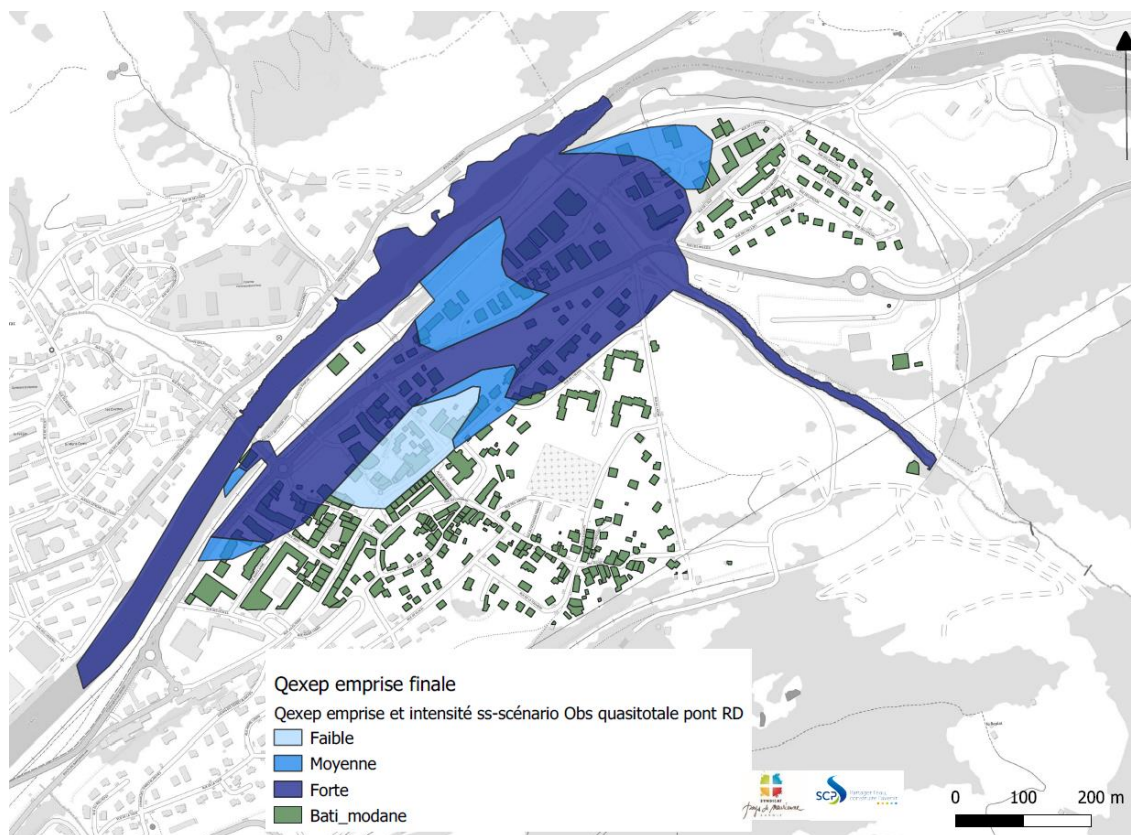
Sous Scénarios de la crue d'occurrence 100 ans	Probabilité relative (%)
Qexp nominal	«Exceptionnellement improbable » parce que l'écoulement accroche la sous poutre
Qexp obstruction_partielle_pont	«Exceptionnellement improbable » parce que l'écoulement accroche la sous poutre et qu'une obstruction de 30% est trop optimiste
Qexp obstruction_quasi totale_pont	« Très probable » parce que l'écoulement accroche la sous poutre
Qexp obstruction_quasi_totale_pontSNCF	« Très probable » parce que la revanche est inférieure à 50m mais moins probable que le sous scénario précédent car plus de revanche, plus de pente, moins de surlargeur localisée et position située en aval pont de la RD
Qexp _obstruction_partielle_chenal	« Très improbable » d'après 5.5 du rapport hydraulique (calage 1987)
Qexp _obstruction_partielle_chenal_totalepont_totaleSNCF	« Exceptionnellement improbable »

Tableau 8 : Probabilités relatives quantitatives pour l'occurrence 100 ans

Sous Scénarios de la crue d'occurrence 100 ans	Probabilité relative (%)
Qexp nominal	0
Qexp _obstruction_partielle_pont	0
Qexp _obstruction_quasi totale_pont	0.6
Qexp _obstruction_quasi_totale_pontSNCF	0.3
Qexp _obstruction_partielle_chenal	0.1
Qexp _obstruction_partielle_chenal_totalepont_totaleSNCF	0

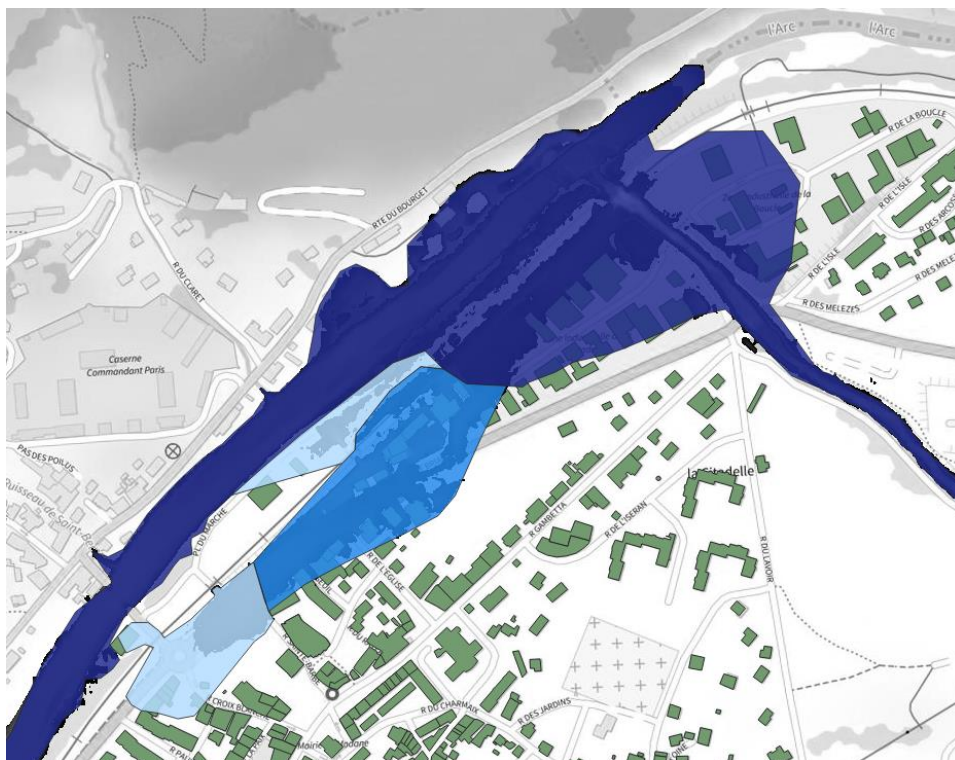
6.7.2 Cartographie finale de l'emprise et de l'intensité

6.7.2.1 Sous scénario obstruction quasi-total du pont de la RD1006

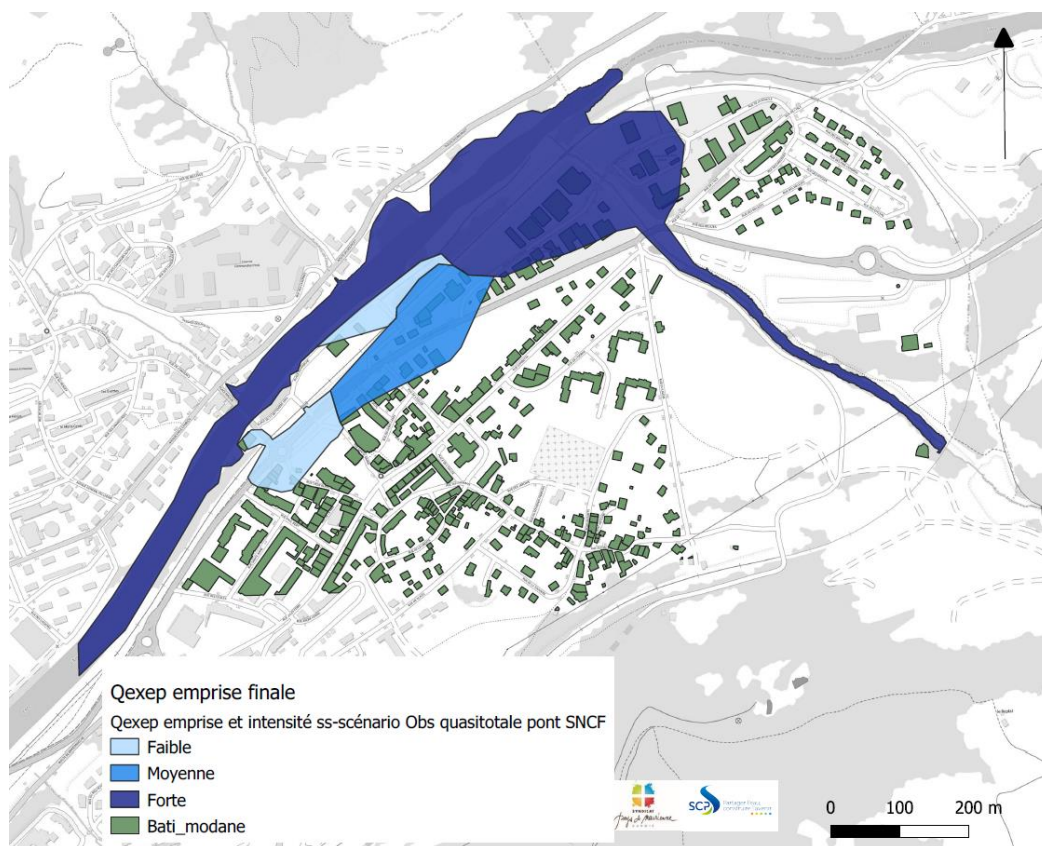
Carte brute :Carte des emprises et des niveaux d'intensité :

6.7.2.1 *Sous scénario obstruction quasi-totale du pont de la SNCF*

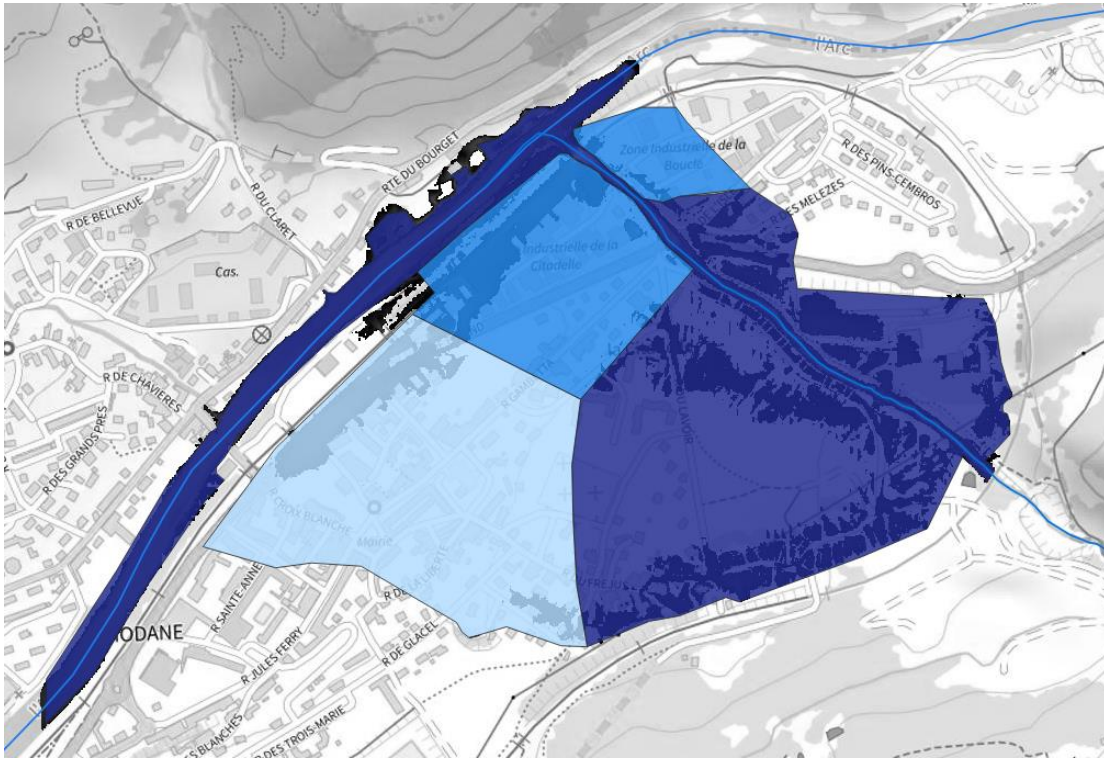
Carte brute :



Carte des emprises et des niveaux d'intensité :



Carte brute :



Qexep emprise et intensité ss-scénario Obs1et2 chenal

- Faible
- Moyenne
- Forte

0 100 200 m

6.8 Crue Extrême T>1000 ans

6.8.1 Résultats bruts des modélisations

L'hydrogramme de la crue extrême a été utilisé sans écrêtement par la plage de dépôt. Cependant il est considéré que les gros blocs sont stoppés par la plage et n'obstruent pas les ouvrages de franchissements ni le lit mineur.

Pour cette occurrence on constate des débordements pour la rhéologie « Très visqueuse ».

Les débordements sont localisés :

- Sur l'ensemble du linéaire en amont du pont de la RN1006, sur l'ensemble du chenal, en rive gauche et droite.
- Au niveau du pont RN1006 et en rive gauche et droite, par-dessus la digue.
- Au niveau de la zone industrielle et en rive gauche et droite.

Les rhéologies « Fluide » et « Très fluide » provoquent un débordement au niveau du pont de la RD1006 et dans la zone artisanale.

Au bilan, la crue extrême déborde sur l'ensemble du chenal, ce qui est cohérent, puisque la crue extrême et celle qui alimente en quantité le cône de déjection et sa modélisation doit donc résulter en des débordements généralisés.

En pratique les débordements du chenal ne sont pas modélisables (hétérogénéités, débordements qui s'auto amplifient, auto-chenalisassions etc....) et seront donc être cartographiés à dire d'expert.

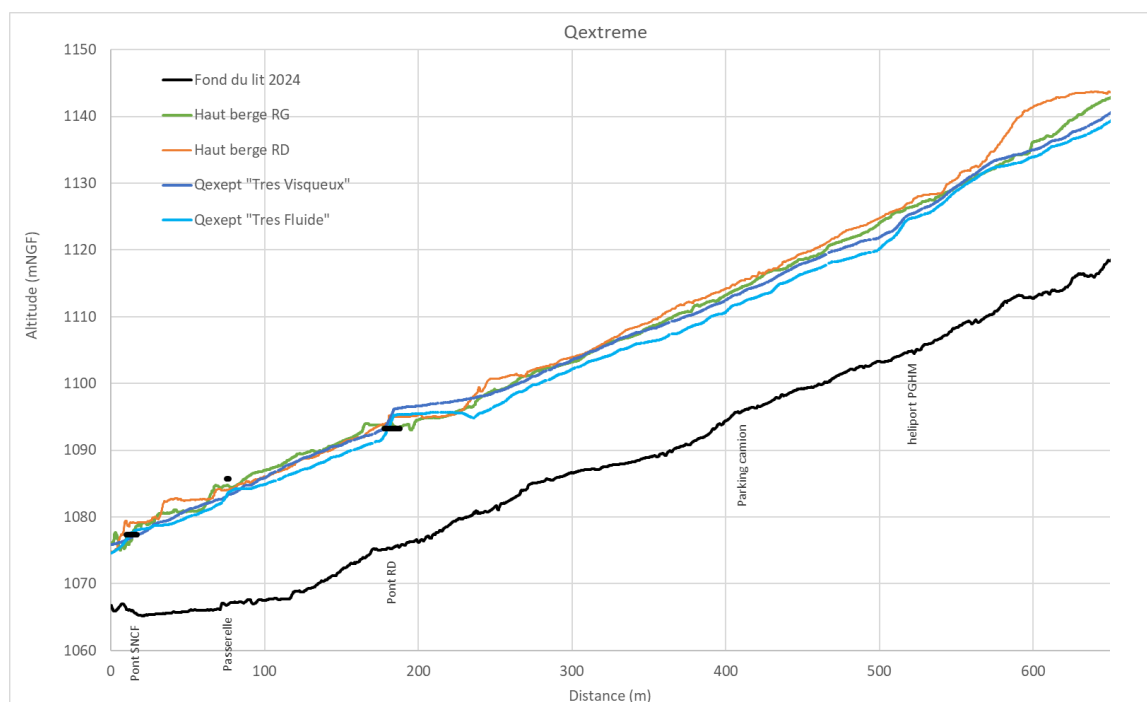


Figure 83 : Profil en long du fond du lit et des hauts de berges (2024) ainsi que les lignes d'écoulements de la modélisation « Très Fluide » et « Très visqueuse »

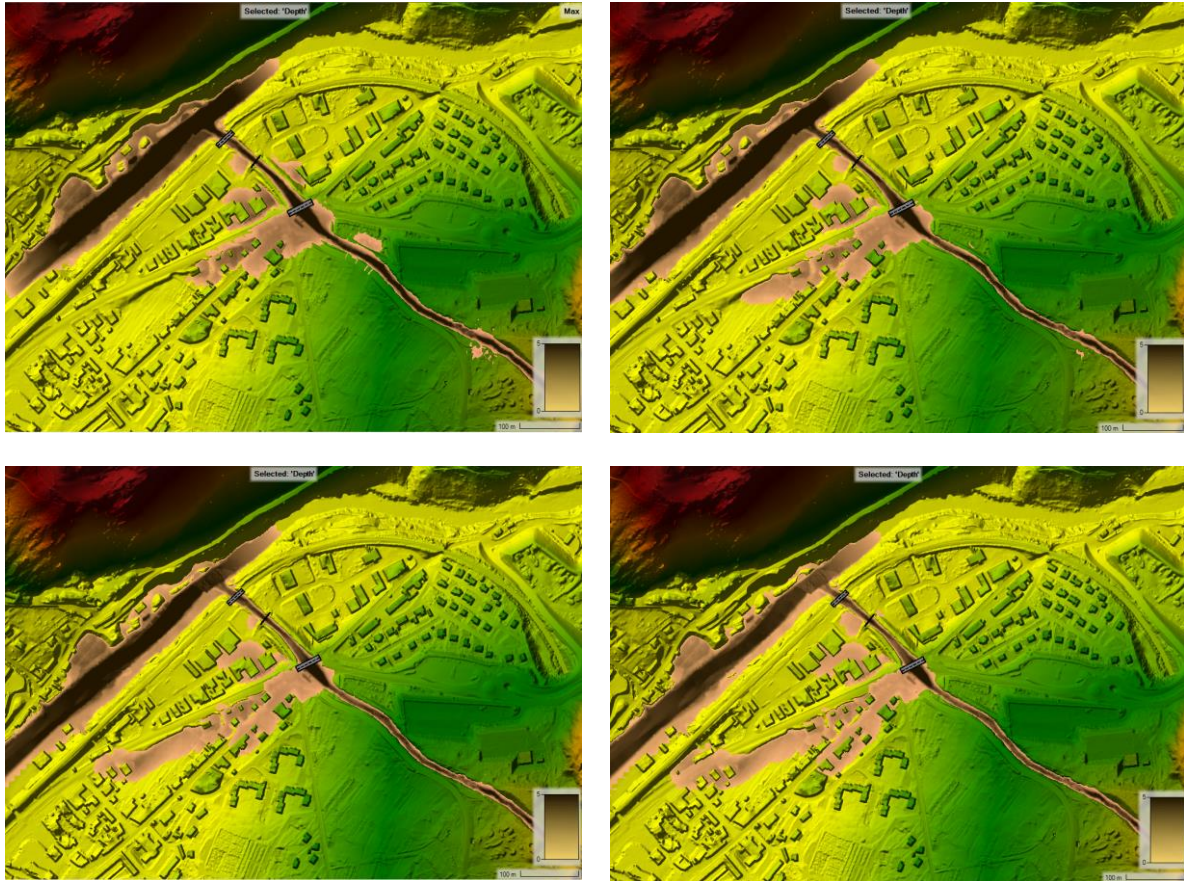
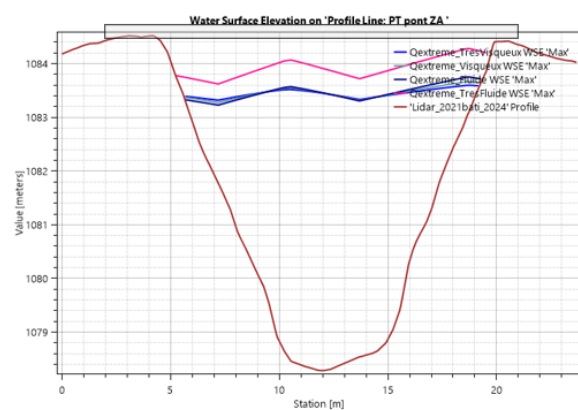
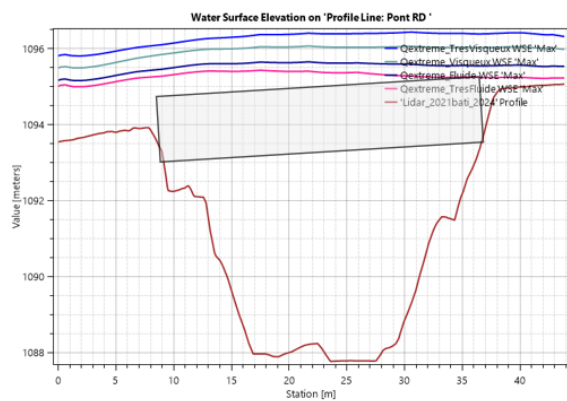


Figure 84 : L'emprise et la hauteur de Qextrême des 4 rhéologies modélisées En haut à gauche « Très Visqueux », en haut à droite « Visqueux », en bas à gauche « Fluide », en bas à droite « Très fluide »



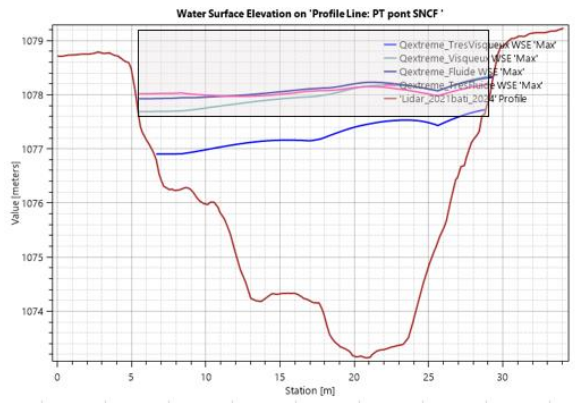


Figure 85 : La hauteur pour Qextrême des 4 rhéologies modélisées sous les 3 ouvrages de franchissements

6.8.2 Scénarios aggravants

6.8.2.1 Rhéologie « Très visqueuse »

Le scénario « Très visqueux » est un scénario aggravant, qui provoque des débordements sur l'ensemble du chenal, et qui est déjà inclus dans le scénario de base.

6.8.2.2 Obstruction quasi totale du Pont de la RD

Dans ce scénario, la plage de dépôt ne fonctionne pas, les gros blocs ne sont donc pas arrêtés et viennent obstruer quasi totalement le pont de la RD.

Dans ce scénario la section hydraulique restante est de 13 m², soit une réduction de 80%.

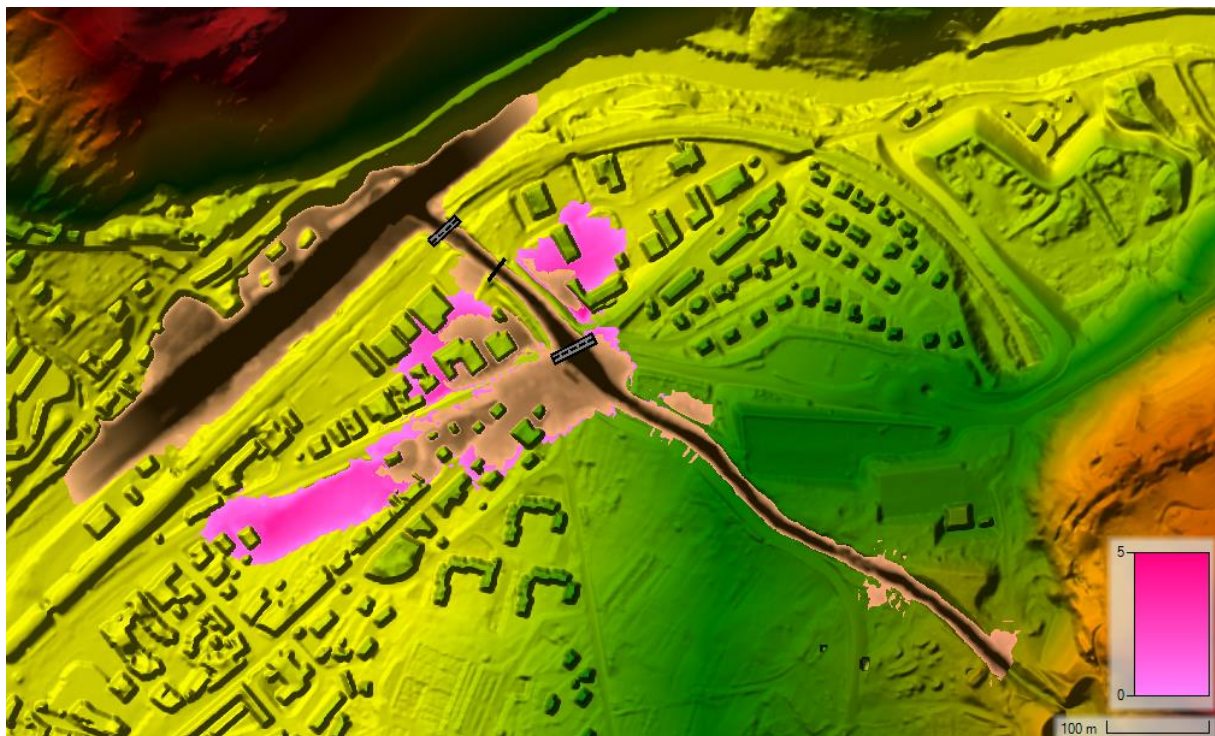


Figure 86 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue extrême pour une rhéologie « Très visqueuse », sans obstruction du pont (marron) et avec obstruction quasi totale du pont (rose)

Etant donné les déversements certains en cas d'obstruction du pont à 80%, c'est la rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF » avec une contrainte seuil à 200 Pa qui est utilisée pour modéliser l'étalement maximale de cette crue extrême (Figure 87). La simulation montre un étalement, en rive gauche sur 830 ml.

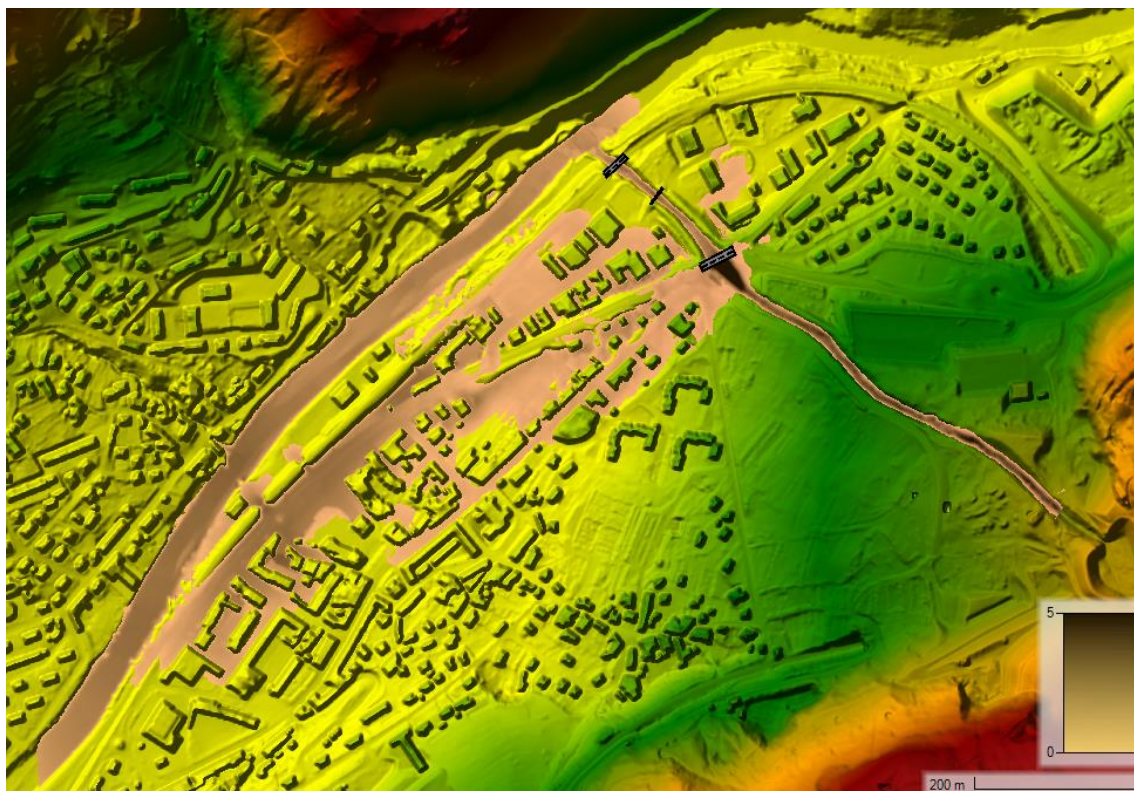


Figure 87 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue extrême pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale du pont (marron)

6.8.2.3 Obstruction partielle du chenal entre la plage de dépôt et le pont de la RD

Dans le cas où la plage de dépôt ne permet pas de retenir les gros blocs, et que ces derniers entravent l'écoulement au niveau du chenal entre le pont de la RD et la plage de dépôt, alors des débordements en amont du cône de déjection pourraient se produire.

Cette hypothèse est équivalente en termes de conséquence, à faire l'hypothèse d'un engravement dans le lit.

Pour cela deux positions de blocage sont modélisées, une en aval immédiat de la plage de dépôt, l'autre entre la plage de dépôt et le pont de la RD.

Ces blocages ont été modélisés en entravant le fond du lit et en laissant libre la partie haute. Les obstructions modélisées sont de l'ordre de 60%.

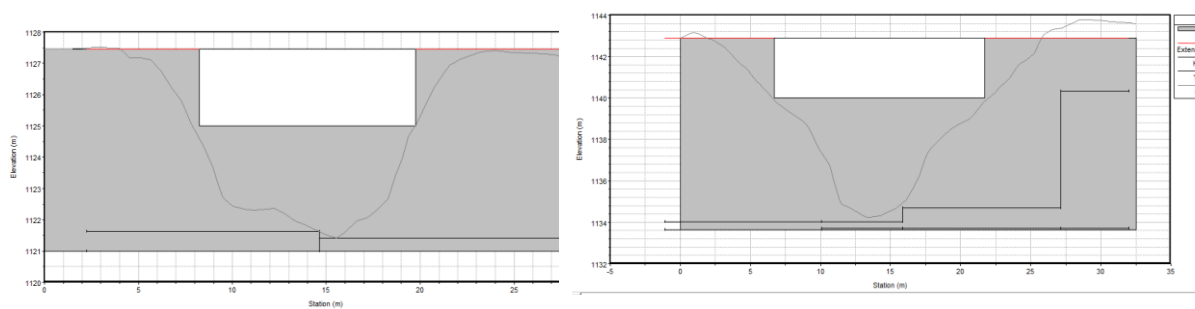


Figure 88 : obstruction du chenal en position 1 (entre la PDD et le pont de la RD) et en position 2 (à l'aval immédiat de la PDD)

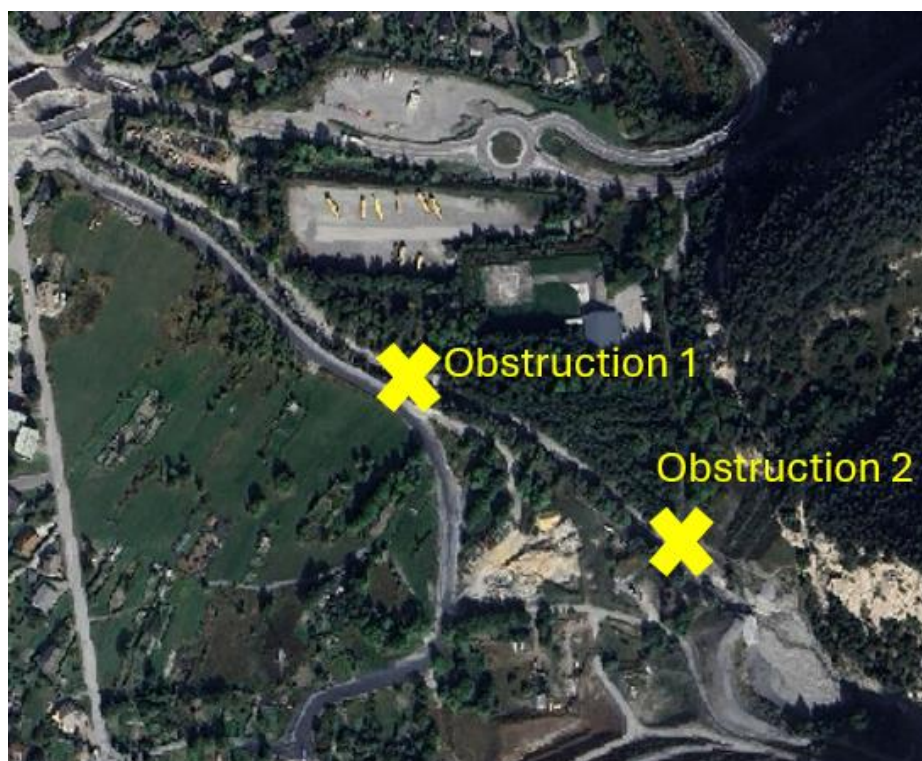


Figure 89 : position des deux obstructions de chenal pour le scénario aggravant de la crue extrême



Figure 90 : vue en plan des débordements modélisés avec un hydrogramme de crue extrême pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », avec obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu).

6.8.2.4 Bilan des scénarios aggravants

L'ensemble des simulations de la crue extrême est présenté (Figure 91).

On constate que quasi l'ensemble du cône de déjection est potentiellement touché par la crue extrême, ce qui correspond bien à la définition géomorphologique du cône de déjection.

A ce stade le chenal, bien qu'ayant évolué avec un affouillement probable, peut toujours produire des débordements amont en cas de blocage par de gros blocs.

Le fait d'avoir réalisé les modélisations avec une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF », permet, d'après les tests de calage de couvrir l'ensemble de l'emprise possible.

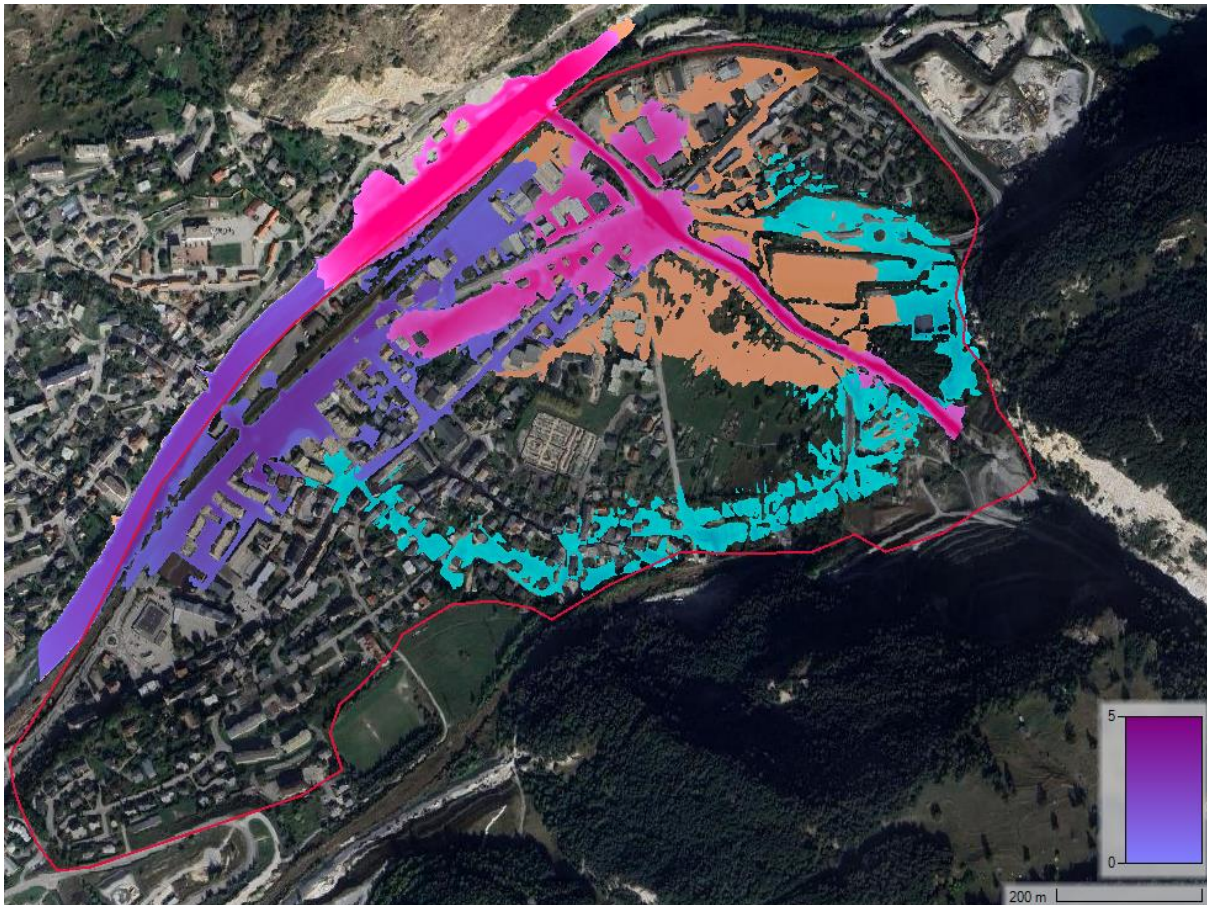


Figure 91 : vue en plan des débordements (hauteurs) modélisés avec un hydrogramme de crue extrême avec obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « très Visqueuse » (rose), obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF » (violet) et obstruction quasi-totale en amont du cône de déjection, en position 1 (orange) et 2 (bleu) obstruction quasi-totale du pont pour une rhéologie « Extrêmement Fluide TTTF ». En rouge le cône de déjection géologique identifié dans l'étude RTM 2016 sur la base de la carte géologique du BRGM.

6.8.3 Dire d'expert sur l'interprétation du cône de déjection géologique

Etant donné le résultat des modélisations, il peut être conclu qu'une grande partie du cône de déjection géologique peut être touché par la crue extrême. Cependant la partie la plus au Sud n'est pas touchée même en simulant un débordement à l'Apex du cône.

La carte suivante présente l'emprise maximale de la crue extrême qui couvre l'ensemble des sous scénarios aggravant. Le cône de déjection géologique n'est pas entièrement couvert, la modélisation ayant permis de sortir les zones non atteignables.

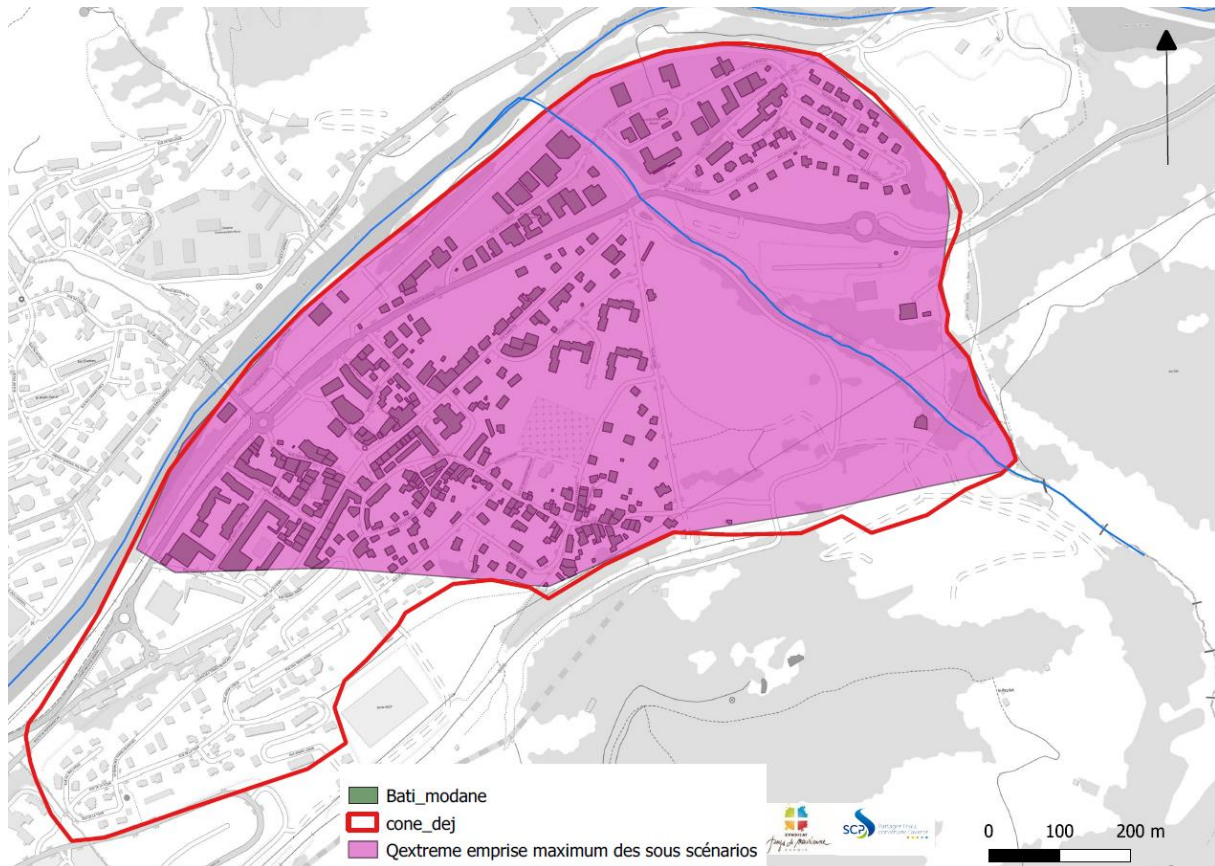


Figure 92 : Emprise de la crue extrême

6.8.4 Attribution de probabilités conditionnelles

L'ouvrage de la RD n'est pas suffisant pour assurer le passage du front de lave.

Par conséquent, le scénario dominant de la crue extrême est une obstruction du pont de la RD.

L'obstruction du chenal ou du pont de la SNCF est dans le même ordre de grandeur.

L'obstruction du chenal est très probable étant donné l'ampleur du phénomène est un peu plus probable que le blocage du pont SNCF étant donné que cela engendrerait une diminution du débit aval étant donné les débordements amont

L'obstruction totale de tous les franchissements au cours de la crue et du chenal est un moins probable mais pas impossible.

Le franchissement de la voie ferrée vers le dépôt en rive droite n'est pas considéré comme probable car il est estimé à moins de 3% dans l'étude de 2016 d'ETRM et la modélisation de actuelle ne montre pas non plus de franchissement de la voie ferrée en rive droite.

Le Tableau 5 présente les probabilités relatives de manière qualitative et le Tableau 6 traduit leur valeur quantitativement.

Tableau 9 : Probabilités relatives qualitative pour l'occurrence exceptionnelle (>100ans)

Sous Scénarios de la crue d'occurrence 100 ans	Probabilité relative (%)
Qexp nominal	«Exceptionnellement improbable » parce que l'écoulement est supérieur au niveau de la sous poutre
Qexp obstruction_partielle_pont	«Exceptionnellement improbable » parce que l'écoulement est supérieur au niveau de la sous poutre
Qexp obstruction_quasi totale_pont	« Très probable » parce que l'écoulement est supérieur au niveau de la sous poutre
Qexp obstruction_quasi_totale_pontSNCF	« Très probable » parce que l'écoulement accroche la sous poutre
Qexp _obstruction_partielle_chenal	« Très probable » parce que la revanche n'est pas suffisante
Qexp _obstruction_partielle_chenal_totalepont_totaleSNCF	« Peu probable » mais non négligeable parce que la crue extrême est celle qui, par définition, alimente le cône de déjection géologique

Tableau 10 : Probabilités relatives quantitatives pour l'occurrence 100 ans

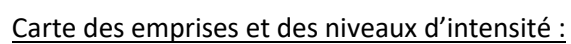
Sous Scénarios de la crue d'occurrence 100 ans	Probabilité relative (%)
Qexp nominal	0
Qexp _obstruction_partielle_pont	0
Qexp _obstruction_quasi totale_pont	0.4
Qexp _obstruction_quasi_totale_pontSNCF	0.2
Qexp _obstruction_partielle_chenal	0.3
Qexp _obstruction_partielle_chenal_totalepont_totaleSNCF	0.1

6.8.5 Cartographie finale de l'emprise et de l'intensité

Etant donné que tous les sous scénarios impliquent un débordement sur l'ensemble du chenal, alors la cartographie est relativement similaire entre tous les sous scénarios

6.8.5.1 Sous scénario obstruction quasi-totale du pont de la RD1006

Carte brute :



Page 111 sur 125

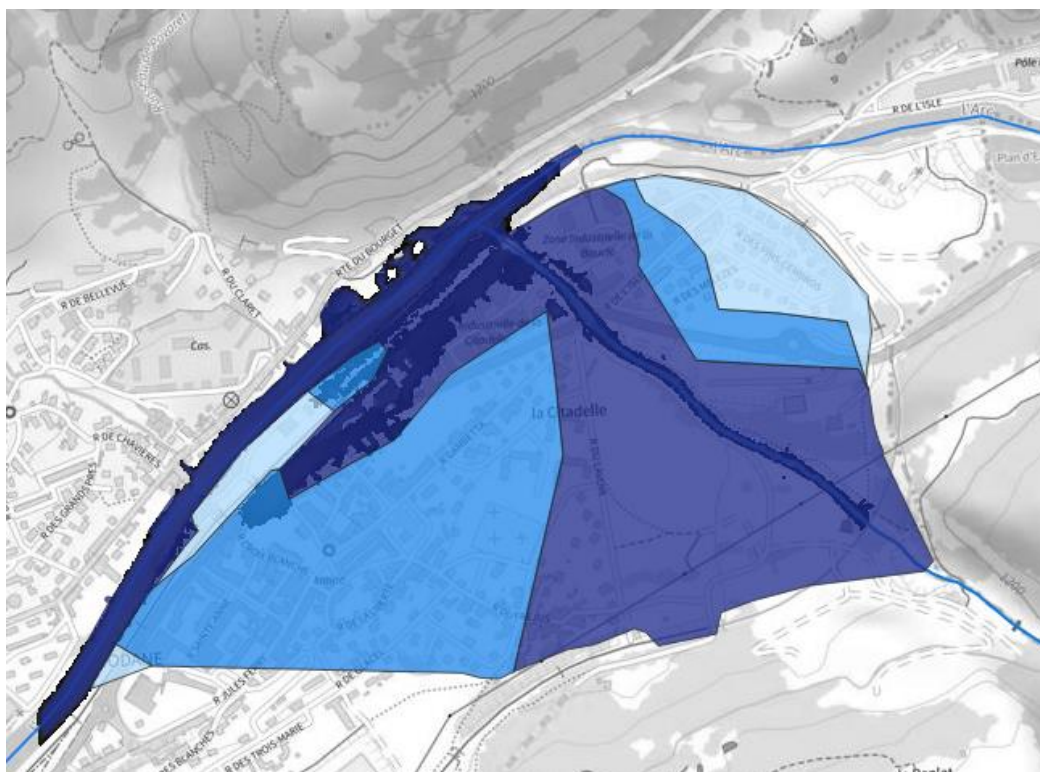
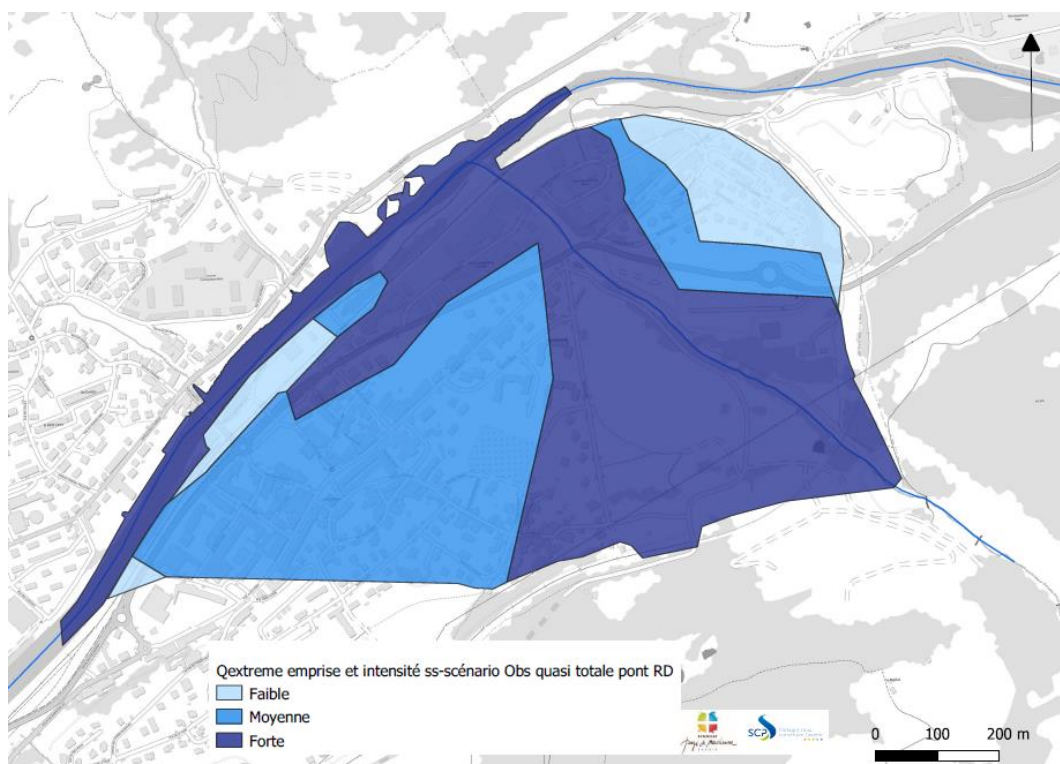
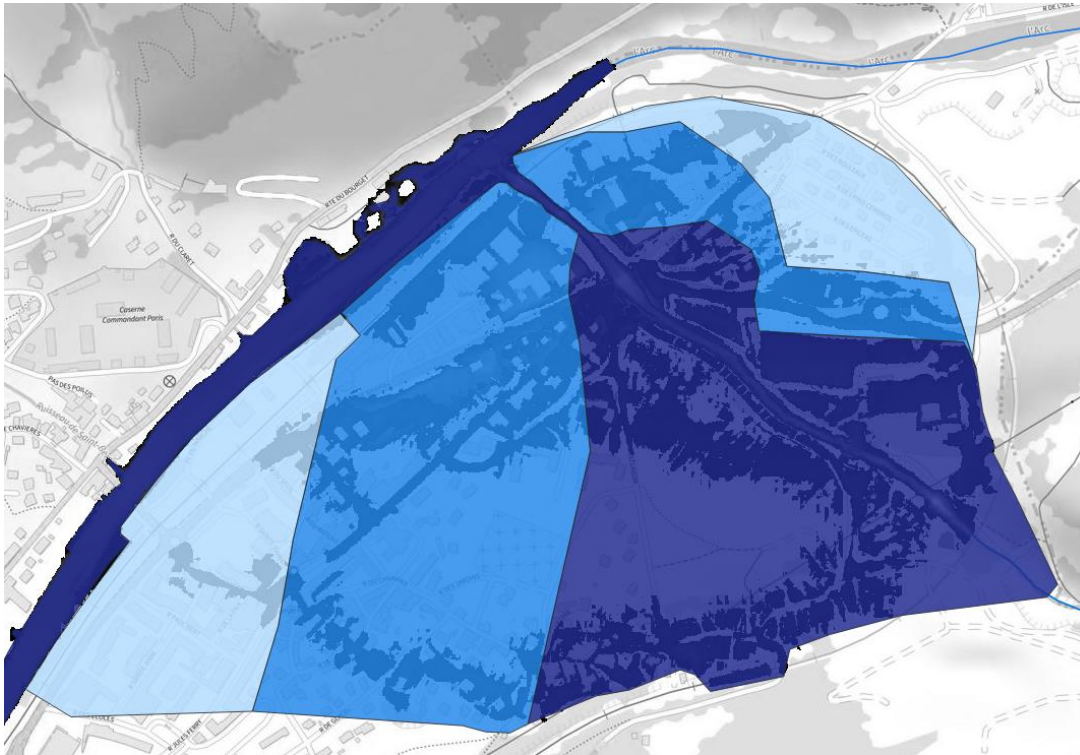


Figure 93 : modélisation brute d la crue exceptionnelle (noir) et cartographie a dire d'expert de la crue extrême avec 3 niveaux d'intensité.

Carte des emprises et des niveaux d'intensité :



Carte brute :

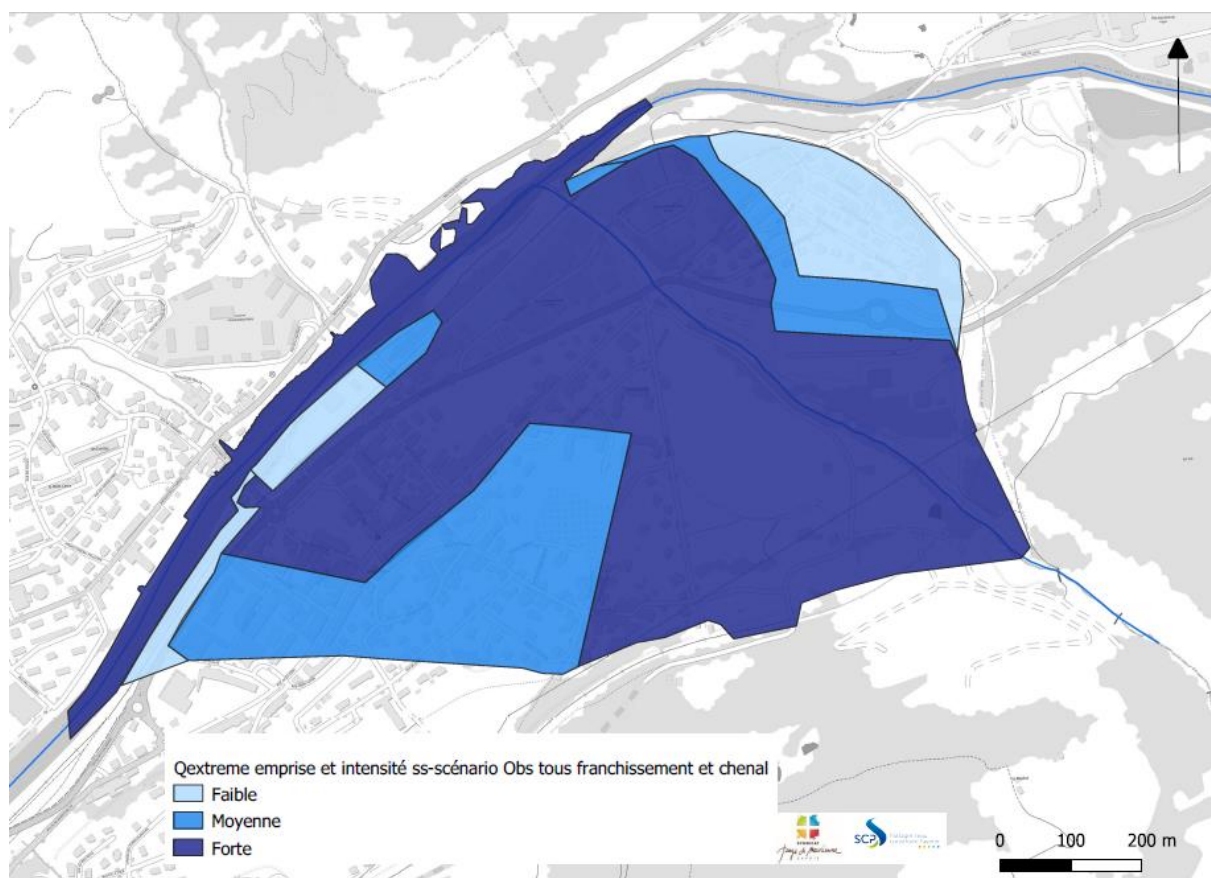
[illegible]

6.8.5.4 *Sous scénario obstruction du chenal et de tous les franchissements et du chenal*

Carte brute :



Carte des emprises et des niveaux d'intensité :



7 MODELISATION DE LA PLAGE DE DEPOT DANS LES PROJETS D'AMENAGEMENT

7.1 Présentation de l'outil MCB

A ce jour, la modélisation de l'interaction en 2D entre une plage de dépôt et un écoulement de lave torrentielle la traversant n'est pas possible. En effet les problématiques de blocage de l'ouvrage de fermeture, du tri granulométrique, de la modélisation de l'arrêt de la lave sur forte pente etc... sont trop complexes pour être prises en compte dans les outils classiques de l'ingénieur (Hec Ras, flow2D, Ramms, etc...).

INRAE (cf. Piton et al 2022 et publication rendue publique par une action du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires⁷) a donc développé une modélisation « OD » qui repose sur une approche type « réservoir » et qui synthétise tous ces processus par une approche macroscopique.

Cet outil MCB (Modeling of Clogging by Boulders of Barriers and Bridges – Modélisation de l'obstruction par les blocs des barrages et ponts) vient d'être développé par l'INRAE (en cours de publication, version 1.0) et est accessible en ligne (sur le site platrisk.ige.inrae.fr).

Cet outil permet de caractériser leur efficacité de piégeage et d'atténuation des débits de pointe ou les probabilités de blocages des ouvertures.

La spécificité, en plus de prendre en compte les écoulements boueux des laves torrentielles, est de simuler l'obstruction de l'ouvrage de fermeture par des blocs rocheux par un processus aléatoire. Le résultat est donc une série d'hydrogramme de sortie de la plage de dépôt que l'on peut analyser en termes de quantile.

Ainsi, cet outil permet de définir l'hydrogramme de sortie (l'hydrogramme de quantile 25 et 75 par exemple) de la plage et le volume retenu dans celle-ci et ainsi le gain effectif à aménager une plage de dépôt en termes de débit de pointe et de volume sur la crue.

En utilisant cet outil, nous pouvons donc quantifier le bénéfice à utiliser une plage de dépôt, en comparant l'impact d'une crue avec et sans ouvrage.

Les données d'entrée sont :

- L'hydrogramme amont simple triangulaire
- La courbe hauteur volume de la plage de dépôt (topographie)
- Une loi hauteur-débit sortant construite sur la base d'équation simple d'hydraulique (loi de seuil, loi d'orifice).

L'équation de conservation de la masse permet ensuite de calculer la part de débit sortant.

7.2 Géométrie des ouvrages de fermeture

Les ouvrages de fermetures doivent être décomposés en superposition de seuil afin de rentrer leur géométrie dans le modèle.

⁷ MCB3 : Modélisation simplifiée des obstructions d'ouvrages soumis à des laves torrentielles - Extension à plusieurs ouvrages et mise à disposition d'un interface utilisateur en ligne, Décembre 2024

Au niveau des options de plage de dépôt, un *slit* (*fente*) est traité comme un seuil de paroi verticale, un *weir* (*seuil*) présente des parois obliques d'angle à définir et un *slot* (*ouverture*) est un orifice.

Pour la plage de dépôt actuelle, la géométrie est la suivante :

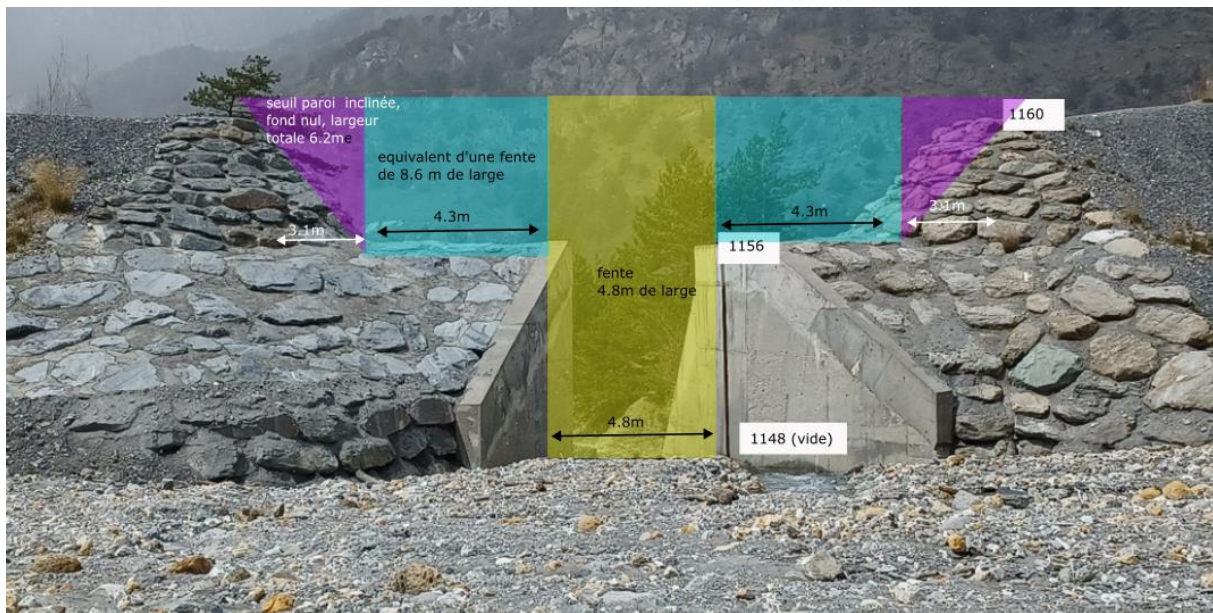


Figure 94 : géométrie de la plage de dépôt à rentrer dans le modèle

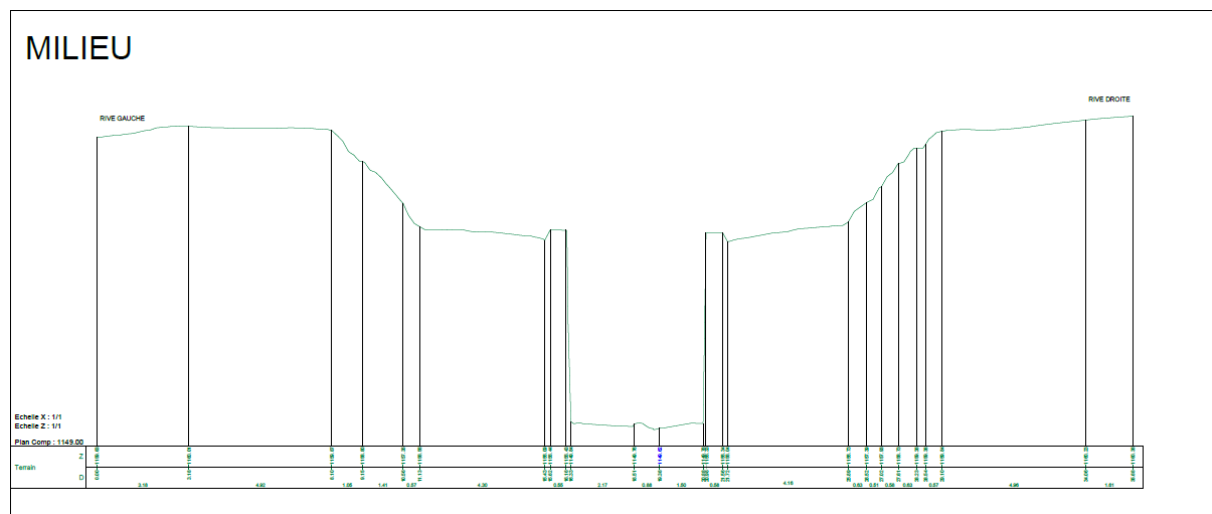


Figure 95 : ouvrage de fermeture de la plage de dépôt du Saint Antoine, VR3D

7.3 Nombre de blocs

A cela s'ajoute le nombre de blocs présent dans la lave. Leur nombre et leur taille seront responsables de la probabilité de blocage dans la fente de la plage de dépôt.

Ce paramètre est difficile à estimer car il faudrait analyser la granulométrie des dépôts de curage. Sur le Saint Antoine, une partie des blocs de taille supérieurs à 3m ont été bloqués dans la plage de dépôts et dans le pont cadre en 2014 et peuvent être comptés sur la base de photos.

D'après la Figure 11, on peut estimer le nombre de bloc piégé dans la plage de dépôts

- 5 blocs de 4 à 5m

D'après les photos post crue 2014 on peut voir :

- Une dizaine de blocs entre 3 et 4m (un bloc de 3m s'est retrouvé dans le chenal au niveau de la zone industrielle).
- Un pourcentage important de blocs de taille entre 1 et 3 m à proximité du lit mineur.
- Une coulée plutôt fluide dans les étalements latéraux.

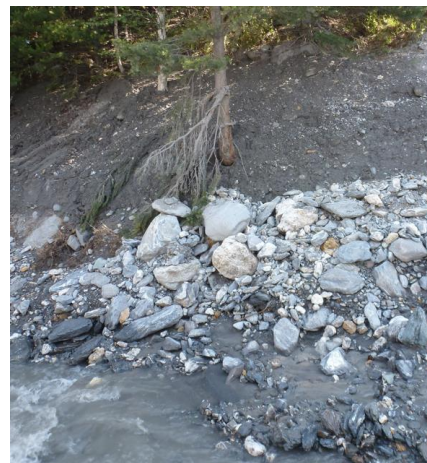




Figure 96 : Etat du chenal et du cône de déjection post crue 2014, P. Freydier pour INRAE

Pour les blocs entre 1 et 3 m une estimation sans comptage lors d'un curage est plus délicate.

A dire d'expert (rapport de stage INRAE) le volume total de tous les blocs d'une lave pourrait se situer entre 0.5% et 3%.

Sur un volume de crue de $80\,000\text{ m}^3$ (Q100), le volume de blocs se situe donc entre 400 m^3 et 2400 m^3 .

De cette façon, pour une crue de volume de référence $80\,000\text{ m}^3$, le nombre de blocs peut être estimé comme suit :

- 4 blocs de 4 à 5 m avec une incertitude entre 2 et 5 ($180 - 450\text{ m}^3$)
- 10 blocs entre 3 et 4m avec une incertitude entre 6 et 12 ($200 - 500\text{ m}^3$)
- 20 blocs entre 2 et 3 m avec une incertitude entre 10 et 25 ($150 - 390\text{ m}^3$)
- 250 blocs entre 1 et 2 m avec une incertitude entre 200 et 300 ($350 - 600\text{ m}^3$)

7.4 Modélisation de l'hydrogramme de sortie de la plage de dépôt (PDD)

7.4.1 Plage de dépôt actuelle

Les données d'entrée sont :

- l'hydrogramme Q100 ($Q_p=150\text{ m}^3/\text{s}$, $V = 80\,000\text{ m}^3$) avec une propagation d'incertitude autour de 145 à $155\text{ m}^3/\text{s}$ et de $75\,000$ à $85\,000\text{ m}^3$. Ces paramètres sont choisis resserrés intentionnellement, puisque ce seront des débits et volumes de dimensionnement et qu'au plus ils seront choisis large, au plus le résultat sera étalé autour du débit de pointe.

- la courbe hauteur volume de la plage de dépôt considérée comme vide au moment de la crue (tableau suivant).

Pente de dépôt	3%	4%	5%
Hauteur dépôt (mNgF)	Volume (m³)		
1148	1	1	1
1150	3645	4182	4691
1152	9112	10455	11726
1154	14943	17145	19231
1156	20046	23000	25798

La pente de dépôt est prise entre 3 et 5 % conformément à l'incertitude estimée dans l'étude RTM 2016.

A partir de 20 simulations et au-delà les résultats sont similaires. Etant donné qu'il y a autant de simulation basses et hautes, il y en tout 40 simulations, voir 80 simulations avec la version MCB mise à jour durant l'étude par l'INRAE.

L'ensemble des simulations est présenté en Figure 97.

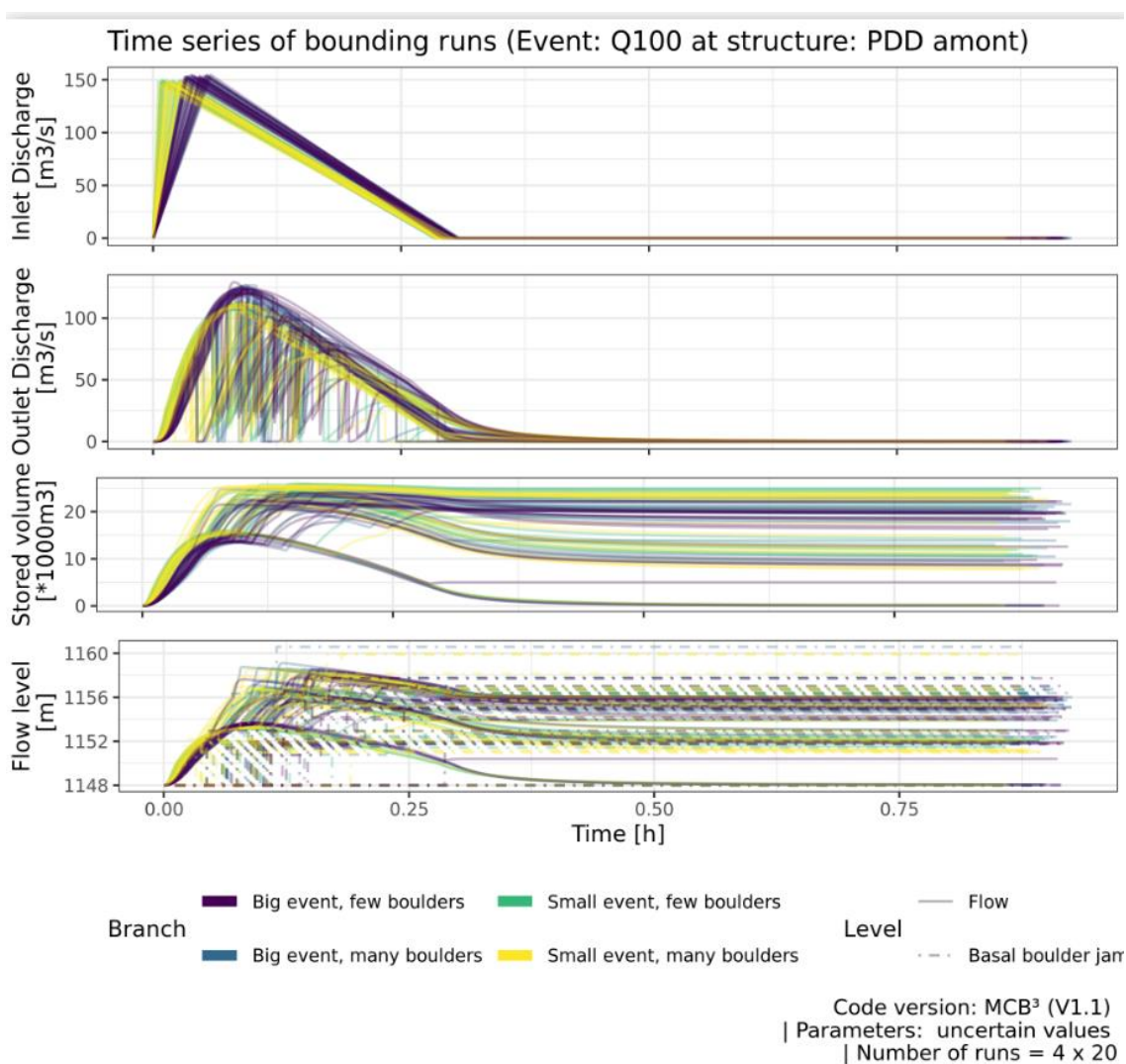


Figure 97 : Comparaison des hydrogrammes d'entrée et de sortie avec l'outil MCB pour une PDD de 23 000 m³.

Comme on peut le voir, il y a deux type d'hydrogrammes d'entrée correspondant aux deux débits de pointes. En effet, le principe de ce modèle est de simuler deux distributions :

- une distribution basse (les paramètres sont entre le min et la meilleure estimation)
- une distribution haute (les paramètres sont entre la meilleure estimation et le max).

De ce fait, le modèle calcule deux familles d'hydrogrammes de sortie afin d'encadrer le résultat.

La 3^{ème} sous figure montre que la plage de dépôt est donc bloquée pour 85 % des évènements. Quand elle est bloquée, elle se remplit complètement une fois sur 2. C'est un comportement proche de la réalité, les laves souvent mais pas systématiquement bloquées par la plage de dépôts. Cette modélisation nous permet de valider les paramètres d'entrée.

Un traitement statistique disponible avec l'outil permet de calculer la borne basse et haute de l'enveloppe de toutes les simulations. La situation optimiste (celle qui écrête le plus le débit) étant typiquement un événement avec beaucoup de gros blocs en début de crue, et la situation pessimiste un événement avec peu de blocs ou des blocages tardifs.

Au bilan, L'ensemble des simulations à l'aval de la PDD amont montre :

- une situation plutôt optimiste avec un débit de pointe laminé à 100 m³/s et une plage de dépôt complètement rempli,
- une situation plutôt pessimiste mais pas rare avec un débit laminé à 120 m³/s voir jusqu'à 130 m³/s et un volume à moitié rempli.

	Débit de pointe (m ³ /s)	Volume retenu (m ³)
Sans la PDD	150	0
Avec la PDD – situation « optimiste »	100	20 000-23 000
Avec la PDD – situation « pessimiste »	130	10 000

A noter que la plage de dépôt amont, avec une fente plutôt large et sans les barres horizontales horizontaux, n'est pas 100 % efficace. Dans 50 % des cas elle ne se remplit pas totalement et écrête assez peu le débit de crue.

Son efficacité pourrait être améliorée avec une barre horizontale. La crue de 2014 a montré que les IPN ne résistaient à la flexion avec la portée de 5m, mais une barre béton pourrait peut-être convenir via une étude génie civil spécifique. Une rapide simulation avec une barre horizontale à 3m de haut montre que 100% des laves torrentielles centennales seraient bloquées par la plage de dépôt amont et que le débit aval serait laminé plus efficacement par la plage de dépôt aval.

Si, pour le gestionnaire, la plage de dépôt amont doit jouer le rôle de bloquer les gros blocs afin d'écarter au mieux la lave centennale, il convient de se poser la question de l'équiper d'une barre transversale (à moindre coût par rapport au cout initial de la plage de dépôt et sa rénovation en 2014) afin d'optimiser son fonctionnement global.

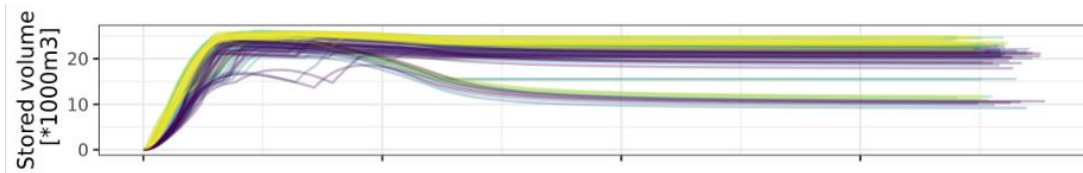


Figure 98 : simulation du volume stocké par la plage de dépôt amont s'il était installé une barre horizontale à 3m de haut par rapport au fond du lit

7.4.1 Deux plages de dépôt en série pour un volume total de 48 000 m³, projet S3 Phase2

La phase 2 du projet AVP retient la solution de faire une plage de dépôt en série à l'aval de celle qui existe déjà :

- La plage de dépôt amont n'est pas retouchée, son volume théorique est déjà au maximum de ce que la topographie locale permet (23 000 m³).
- Une nouvelle plage de dépôt est construite juste à l'aval pour un volume total de 25 000 m³ à la pente de 4%.

L'ensemble des simulations est présenté en Figure 97 et l'encart présente la statistique des débits laminés.

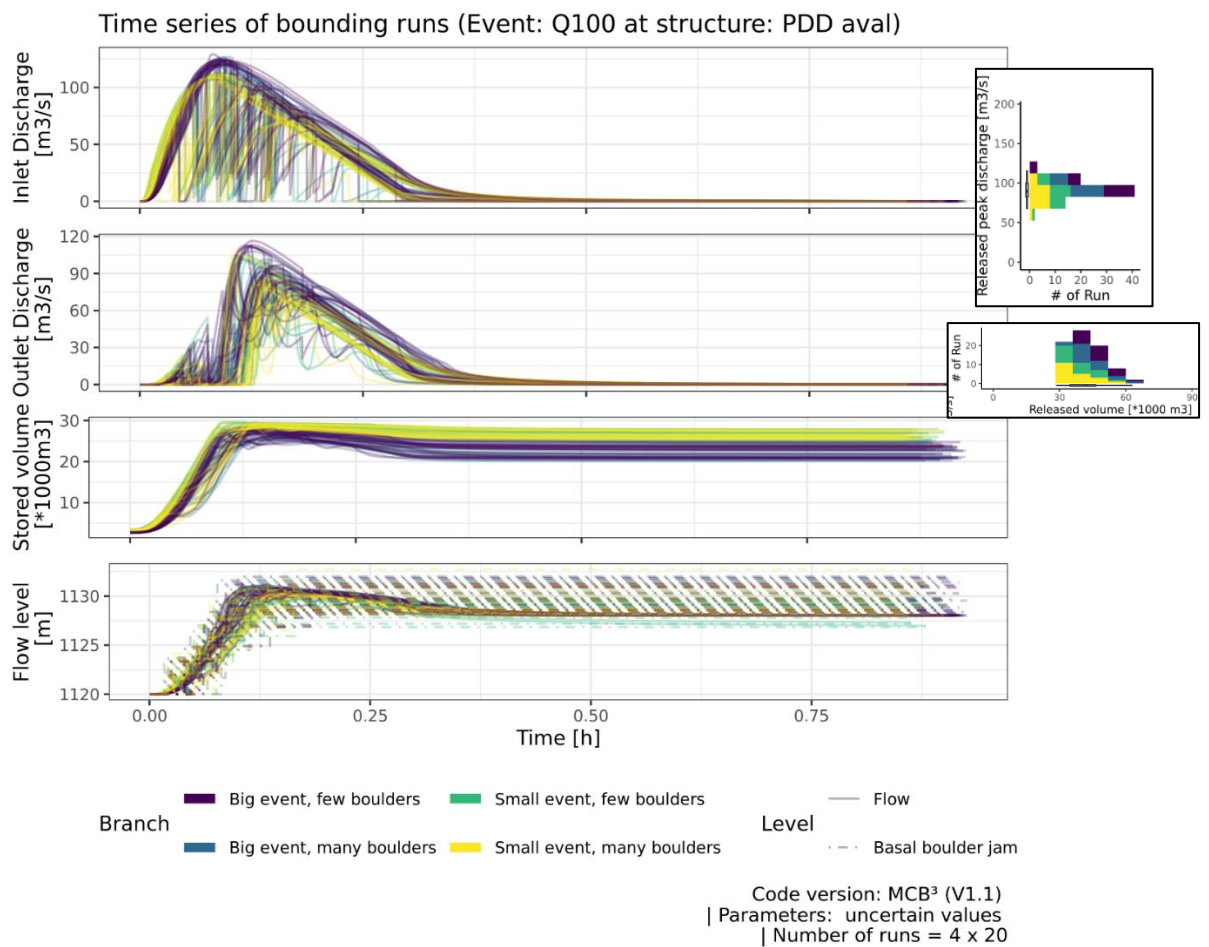


Figure 99 : Comparaison des hydrogrammes d'entrée et de sortie avec l'outil MCB pour une PDD de 23 000 m³ suivie d'une PDD de 25 000 m³

L'ensemble des simulations à l'aval de la PDD aval montre :

- La plage de dépôt aval est systématiquement bouchée et rempli quasi totalement sur l'ensemble des simulations
- Le débit est laminé entre 75 m³/s et 110 m³/s avec une majorité d'évènements à 90 m³/s.
- La médiane des évènements avec un Qpointe de 90 m³/s, peut se produire pour les 4 types d'évènements simulés : De volume un peu plus gros et peu plus petit que l'évènement centennal ainsi que contenant un peu plus de blocs ou un peu moins de blocs qu'estimé.
- Certains évènements statistiquement rares (de l'ordre de 1%) sont laminés de façon très optimistes avec un débit résultant à 50 m³/s et d'autres, tout aussi rares aussi sont moins bien laminés avec un débit résultant à 120 m³/s.
- Le volume sortant est entre 30 000 m³ et 52 000 m³, avec une part plus importante d'évènements entre 37 000 m³ et 45 000 m³.

	Débit de pointe (m ³ /s)	Volume retenu (m ³) par la PDD aval
Sans la PDD aval	120	0
Avec la PDD aval – situation « optimiste »	70-80	25 000
Avec la PDD aval – situation « pessimiste »	100-110	20 000

7.5 Modélisation de la lave torrentielle Q100 après aménagement

Les aménagements de l'AVP de phase 2 sont les suivants :

- La plage de dépôt amont n'est pas retouchée, son volume théorique est déjà au maximum de ce que la topographie locale permet (23 000 m³).
- Une nouvelle plage de dépôt est construite juste à l'aval pour un volume total de 25 000 m³ à la pente de 4%.
- Un curage sous le pont de la RD permet un recalibrage du lit à la pente 8.5% sous le pont et 8% du pont à la passerelle.
- Un curage à la confluence pour un retour au fond de 2013

Par conséquent la simulation 2D de la lave torrentielle de projet Q100 est relancée après avoir pris en compte les ouvrages et avec les paramètres suivants :

- Q pointe 90 m³/s, soit un débit autour de la médiane des simulations.
- Volume intercepté de 35 000 m³ (volume relâché de 45 000 m³).
- Rhéologie fluide à visqueuse mais pas au-delà, témoignant de l'absence de gros blocs. La rhéologie visqueuse est quand même prise en compte pour ne pas être trop optimiste sur la rhéologie.

Type	τ_c	K	n	$\frac{\tau_c}{\rho}$	$\frac{K}{\tau_c}$	ρ
Fluide	1260	380	0.33	0.6	0.3	2000
Visqueuse	2000	590	0.33	1	0.3	2000

- Pas d'obstruction des ponts par les blocs étant donné qu'ils sont interceptés par les deux plages de dépôts successives

La modélisation 2D de la lave centennale montre un passage sans débordement et sans accroches des sous poutres dans la traversée de Modane.

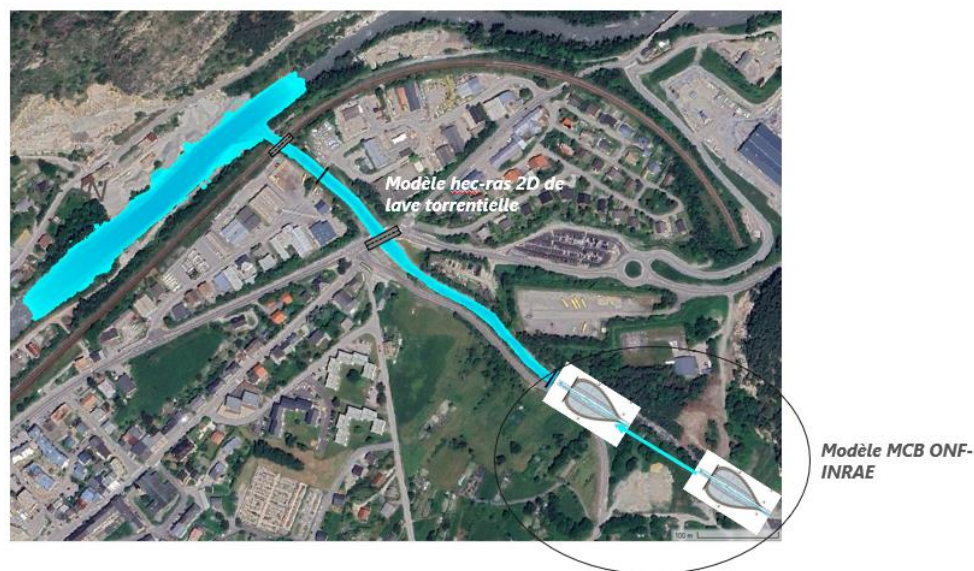


Figure 100 : Principe de la modélisation après aménagement et résultat de la modélisation hec-ras 2D de la lave torrentielle centennale visqueuse, après les aménagements sus-cités, et après avoir simulé l'hydrogramme par le modèle MCB ONF-INRAE présentés au §7.1.

Les résultats au droit des ouvrages, après aménagements, sont les suivants :

- La lave torrentielle passe dans Modane sans débordement et avec une revanche de 1. 8m au pont SNCF, 2.2 à la passerelle et 2.4 m au pont de la RD.
- Bien que ce ne soit pas l'objet de l'étude, notons que les digues aval du pont de la RD sont mises en charges, puisque le torrent est de toute façon plus haut que le terrain naturel du cône de déjection (Figure 103).
- Entre la zone artisanale et la passerelle, la crête de berge rive gauche est réduite brutalement, le profil est quasi plein bord (50 cm avant débordement) (Figure 104).

Les figures ci-dessous présentent le tableau de résultats, les profils en travers et profils en long de la Q100 après aménagement suscités.

Figure 101 : tables des lignes d'écoulements calculées après les aménagements sus-cités

Ouvrage	Ligne d'écoulement (mNgF) en face amont de l'ouvrage		Sous poutre	Revanche avec la lave fluide	Revanche avec la lave visqueuse
	Q100 fluide (1260 Pa, paramètre K 380)	Q100 visqueuse (2000 Pa, paramètre K 380)			
RD	1090.3	1090.9	1093.28	3.0	2.4
Passerelle	1081.5	1082.2	1084.36	2.9	2.2
SNCF	1075.4	1075.6	1077.36	2.0	1.8

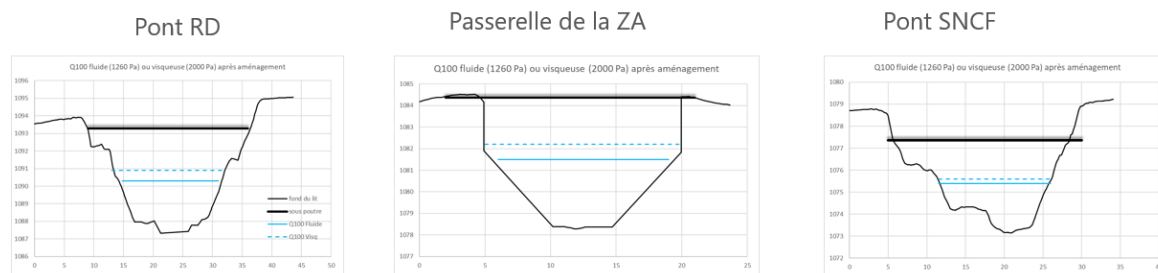


Figure 102 : profils en travers au droit des ouvrages des lignes d'écoulements Q100 calculées après les aménagements sus-cités

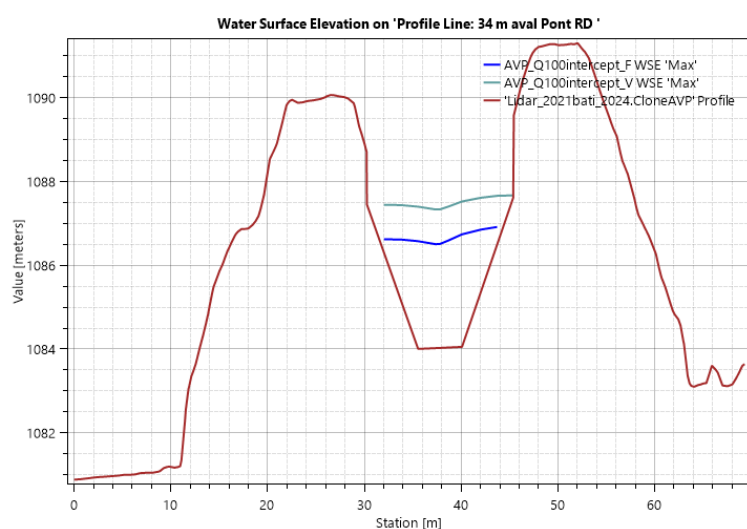


Figure 103 : profils en travers au droit de la digue située entre la passerelle et le pont de la RD

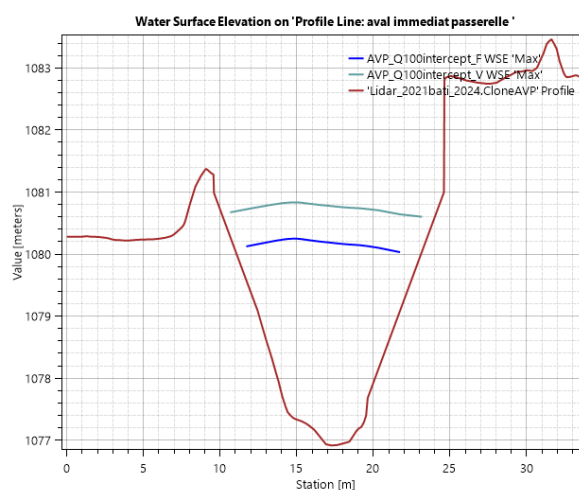


Figure 104 : profils en travers à l'aval de la passerelle

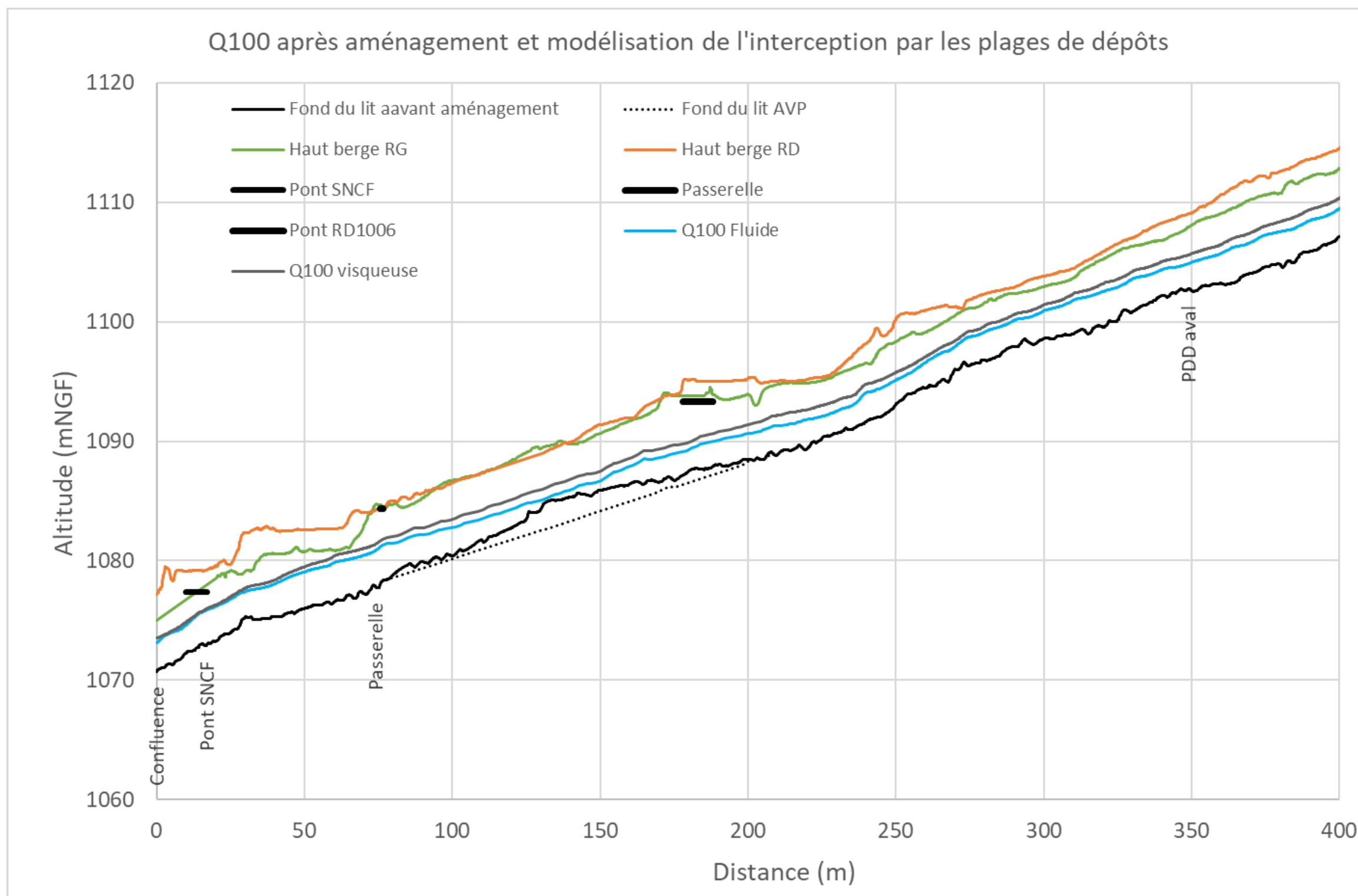


Figure 105 : profil en long des lignes d'écoulements Q100 calculées après les aménagements sus-cités