

CONSULTING

Projet de correction torrentielle et confortement du système d'endiguement du Piésan en aval de la RD182

Etude de dangers du système d'endiguement du Piésan

SAFEGE opérant sous la marque SUEZ Consulting (SIREN n° 542 021 829) « Ce document a été réalisé par du personnel de SAFEGE SAS (opérant sous la marque commerciale SUEZ Consulting) ; SAFEGE SAS est un organisme agréé en tant qu'intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, conformément à l'arrêté du 13 juillet 2021. Cet agrément est en vigueur jusqu'au 31 juillet 2029. »

Consulting

VÉRIFICATION DE DOCUMENTS



Numéro du Projet : 23CRA122

Intitulé du Projet : Projet de correction torrentielle et confortement du système d'endiguement du Piésan en aval de la RD182

Intitulé du Document : Etude de dangers du système d'endiguement du Piésan

Contrôle données entrée	Réunion de démarrage	RACI Agrément	Check List (EDD)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Vers ion	Rédacteur NOM / Prénom	Contrôleur 1 NOM / Prénom	Contrôleur 2 NOM / Prénom	Date d'envoi JJ/MM/AA	COMMENTAIRES Documents de référence / Description des modifications essentielles
1	Mathieu VALENTIN Maxence CHAUVET	Thibaut VANDEKERCKHOVE	Arnaud BONNAFE	11/10/2024	Version provisoire pour relecture ONF/RTM NON DIFFUSABLE
2	Mathieu VALENTIN	Thibaut VANDEKERCKHOVE	Arnaud BONNAFE	05/12/2024	Version modifiée suite à commentaire
3	Mathieu VALENTIN	Thibaut VANDEKERCKHOVE	Arnaud BONNAFE	19/12/2024	Version modifiée suite à commentaire
4	Mathieu VALENTIN	Thibaut VANDEKERCKHOVE	Arnaud BONNAFE	24/01/2025	Version avec dernières modifications mineures, pour dépôt

Ce document a été réalisé par du personnel de SAFEGE SAS (opérant sous la marque commerciale SUEZ Consulting) ; SAFEGE SAS est un organisme agréé en tant qu'intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, conformément à l'arrêté du 13 Juillet 2021 (Agrément « Auscultation - tous barrages » valide jusqu'au 31 juillet 2029).

Sommaire

0.....	Résumé non technique	16
0.1	Objectifs de l'étude de dangers (EDD)	16
0.2	Gestionnaire du système d'endiguement	18
0.3	Description succincte du système d'endiguement	18
0.4	Description des éléments composant le système de protection et leurs fonctions hydrauliques	20
0.5	Bilan du fonctionnement en crue	26
0.5.1	Limites fonctionnelles du système d'endiguement.....	26
0.5.2	Risques de défaillance	28
0.6	Présentation de la zone protégée et du niveau de protection associé	28
0.6.1	Présentation de la zone protégée.....	28
0.6.2	Niveaux de protection retenus	31
0.7	Etude des différents scénarios de venues d'eau dans et en dehors de la zone bénéficiant du système d'endiguement	32
0.7.1	Scénario 1 : Fonctionnement nominal (niveau d'eau correspondant au niveau de protection) 33	
0.7.2	Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle.....	35
0.7.3	Scénario 3 : Défaillance structurelle	35
1.....	Renseignements administratifs	38
1.1	Identification du gestionnaire	38
1.2	Identification du bureau d'études agréé qui a réalisé l'étude de dangers	38
1.3	Rappel des autorisations existantes	39
1.4	Date de remise de l'étude de dangers	39
1.5	Aménagement hydraulique autre que ceux traités dans le dossier complétant le dispositif de protection	39
1.6	Classement des ouvrages.....	39
2.....	Objet de l'étude	40
2.1	Descriptif du cadre de l'étude de dangers	40
2.2	Liste des communes concernées par la zone protégée	41
2.3	Localisation de la zone protégée	41
2.4	Localisation et description sommaire des ouvrages concernés.....	45
3.....	Description du système d'endiguement et de son environnement	47
3.1	Zone protégée.....	47
3.1.1	Lieux de référence où sont mesurés les paramètres représentant les niveaux de protection	47

3.1.2	Niveau de protection.....	47
3.1.3	Enjeux sur la zone protégée.....	51
3.1.4	Zone protégée et limites administratives du CCSLA	52
3.1.5	Communes concernées par la zone protégée	53
3.1.6	Autres communes qui relèvent de l'autorité compétente pour la prévention des inondations	53
3.2	Description des conditions naturelles pouvant conduire à des crues.....	54
3.2.1	Description des facteurs naturels déterminant les risques torrentiels.....	54
3.2.2	Références scientifiques permettant de décrire ces facteurs et leur évolution prévisible	57
3.2.3	Données historiques essentielles expliquant l'analyse de ces facteurs.....	57
3.2.4	Caractéristiques des fondations des ouvrages	57
3.2.5	Classe sismique	58
3.2.6	Les embâcles et les effets possibles	59
3.2.7	Avalanches et effets possibles	59
3.2.8	Retrait et gonflement des argiles.....	61
3.2.9	Cavités souterraines et effondrements karstiques.....	61
3.2.10	Mouvements de terrain (glissements).....	61
3.2.11	Sources d'agression anthropique	63
3.3	Description des éléments composant le système de protection et fonctions hydrauliques associées.....	64
3.3.1	Identification du cours d'eau.....	64
3.3.2	Localisation des éléments constituant le système d'endiguement.....	64
3.3.3	Présentation des différents éléments du système d'endiguement.....	67
3.3.4	Cartographie, profils en travers et profil en long avec mention du niveau de protection.....	70
3.3.5	Description des ouvrages constitutifs du système d'endiguement.....	72
3.3.6	Localisation et description des éventuels aménagements hydrauliques complétant le système d'endiguement.....	80
3.4	Analyse du fonctionnement du système d'endiguement	81
3.4.1	Données historiques sur le comportement structurel.....	81
3.4.2	Description des fonctions structurelles des éléments du système d'endiguement et description du fonctionnement d'ensemble du système d'endiguement	84
3.4.3	Présentation du fonctionnement d'ensemble du système d'endiguement constitué avec ses composants	86
3.4.4	Présentation du niveau de protection	86
3.5	Présentation des situations pouvant survenir pour des niveaux dépassant les performances du système.....	92
3.5.1	Scénario 2 - Défaillance fonctionnelle du système d'endiguement.....	92
3.5.2	Scénario 3 – Défaillance structurelle du système d'endiguement.....	92
3.6	Organisation du gestionnaire.....	95
4.....	Caractérisation des aléas naturels.....	97
4.1	Aléa crue torrentielle – diagnostic torrentiel	97
4.1.1	Description géomorphologique du Piésan	97
4.1.2	Historiques des crues	106
4.1.3	Caractérisation de l'aléa crue torrentielle	112
4.2	Autres aléas naturels et anthropiques.....	155
4.2.1	Avalanches et effets possibles	155
4.2.2	Retrait et gonflement des argiles.....	156
4.2.3	Cavités souterraines et effondrements karstiques.....	157
4.2.4	Mouvements de terrain (glissements).....	157

4.2.5	Aléa sismique	159
4.2.6	Sources d'agression anthropiques	160
4.2.7	Les embâcles et les effets possibles	160
5..... Description du système d'endiguement		162
5.1	Ouvrages existants	162
5.1.1	Historique des ouvrages	162
5.1.2	Découpage en tronçons homogènes	166
5.1.3	Description visuelle du Piésan au droit des ouvrages du système d'endiguement	168
5.1.4	Description des ouvrages constitutifs du système d'endiguement et des ouvrages associés 173	
5.1.5	Ouvrages traversants	185
5.1.6	Végétation	186
5.1.7	Autres ouvrages influençant les conditions d'écoulement	187
5.2	Ouvrages à construire ou à modifier	191
5.2.1	Description des travaux menés	191
5.2.2	Niveau de protection du système d'endiguement pendant les travaux	194
5.3	Description fonctionnelle du système d'endiguement	194
5.3.1	Fonction principale des digues et historique	194
5.3.2	Détermination des limites fonctionnelles des digues : estimation du risque de surverse	194
6..... Retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement		197
6.1	Accidentologie sur les ouvrages du Piésan	197
6.2	Exemples connus d'incidents et d'accidents survenus sur le même type d'ouvrage	197
6.3	Scénarios de défaillance pouvant être mis en évidence par l'étude accidentologique ..	198
6.3.1	Analyse accidentologique	198
6.3.2	Synthèse sur les scénarios de défaillance probables	208
7..... Diagnostic approfondi des éléments constitutifs du système d'endiguement et tenue des ouvrages		210
7.1	Compte-rendu de la visite de terrain approfondies (VTA)	210
7.1.1	Contexte et méthodologie de la VTA	210
7.1.2	État antérieur des ouvrages	210
7.1.3	Conditions de la visite	210
7.1.4	Compte-rendu de la visite	211
7.2	Méthode de caractérisation des probabilités de rupture	215
7.2.1	Modes de rupture retenus	215
7.2.2	Détermination des probabilités de rupture	215
7.3	Caractérisation des probabilités de rupture	216
7.3.1	Scénarii de rupture considérés	216
7.3.2	Cas des laves torrentielles	216
7.3.3	Cas des crues à charriage	223
7.4	Prise en compte des risques liés à la présence d'ouvrages traversants	223
7.5	Synthèse des probabilités des scénarii de rupture des ouvrages et définition du niveau de danger et du niveau de sûreté	223

7.5.1	Probabilités de rupture des scénarii étudiés	223
7.5.2	Estimation du niveau de sûreté	225
7.5.3	Estimation du niveau de danger	225
7.5.4	Choix du maître d'ouvrage des niveaux de protection	225
8..... Etude de risque de venues d'eau dans et en dehors de la zone protégée		
226		
8.1	Généralités	226
8.1.1	Scénarios de défaillance considérés	226
8.1.2	Hypothèses relatives aux scénarios et à la cartographie proposée	227
8.2	Scénario n°1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement	228
8.3	Scénario n°2 : Défaillance fonctionnelle du système d'endiguement	230
8.4	Scénario n°3 : Défaillance structurelle du système d'endiguement	230
9..... Présentation et analyse de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour l'exercice de ses missions		
232		
9..... Bis – recommandations		
232		
9.1	Analyse de l'organisation du gestionnaire	232
9.2	Recommandations dans le but de pérenniser le système d'endiguement	232
10. .. Cartographies		
234		
Annexes		
239		

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des différents ouvrages du système d'endiguement	19
Figure 2: Modes de rupture retenus	28
Figure 3 : Localisation des zones protégées à l'échelle de la commune de Val de Chaise	29
Figure 4 : Carte positionnant la zone protégée et les deux lieux de références	30
Figure 5 : vue depuis la rive droite du lieu de référence n°1, positionnement schématique du niveau de protection à 563.5 mNGF	31
Figure 6 : vue depuis la rive droite du lieu de référence n°2 (2 m en aval de la face aval du pont départemental), positionnement du niveau de protection à 1.5m sous la crête de digue, soit 551.1 mNGF	32
Figure 7 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement	34
Figure 8 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan	36
Figure 9 : Limites administratives du territoire relevant de la CCSLA, et localisation de la commune de Val de Chaise dans ce territoire (rond noir)	42
Figure 10 : Localisation de la zone d'étude du Piésan (source : Géoportail IGN)	42
Figure 11 : Carte positionnant la zone protégée et les deux lieux de références	44
Figure 12 : Localisation des différents ouvrages du système d'endiguement	46
Figure 13 : vue depuis la rive droite du lieu de référence n°1, positionnement schématique du niveau de protection à 563.5 mNGF	Erreur ! Signet non défini.
Figure 14 : vue depuis la rive droite du lieu de référence n°2 (2 m en aval de la face aval du pont départemental), positionnement du niveau de protection à 1.5m sous la crête de digue, soit 551.1 mNGF	Erreur ! Signet non défini.
Figure 15 : Zones protégée et niveau d'eau de protection aux deux lieux de référence	50
Figure 16 : Limites administratives du CCSLA	52
Figure 17 : Localisation de la zone d'étude du Piésan (source : Géoportail IGN)	53
Figure 18 : Localisation du cours d'eau / torrent	54
Figure 19 : Dépôt de flottants et de matériaux jusqu'au niveau de crête de l'ouvrage de la digue de l'école au droit de l'implantation du seuil n°5 (Source : RTM)	56
Figure 20 : Dépôt de flottants sur le tronçon aval en amont de la plage dépôt après la crue de septembre 2014 (Source : RTM)	56
Figure 21 : Extrait de carte géologique 1 : 50 000ème (InfoTerre, BRGM), position des digues entre le pont 2 et la plage de dépôt sur le cône de déjection	58
Figure 22 : Zonage sismique (Source : Data.gouv)	58
Figure 23 : Flottants déposés au sein du lit du Piésan (Sources : (a) Visite de terrain, (b) EDD 2019)	59
Figure 24 : Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche et recensement Enquête Permanente sur les Avalanches dans la zone du Piésan	59
Figure 25 : Avalanche descendue jusqu'au seuil n°40 en mars 2006 - à droite, gros blocs retrouvés dans les dépôts au printemps (source : EDD RTM)	60
Figure 26 : illustration de la respiration du lit dans la partie supérieure de la correction torrentielle (DDRTM – barrage 40) , source EDD RTM	60
Figure 27 : Cartographie des aléas de retrait et gonflement des argiles sur le bassin versant du torrent du Piésan (source : géorisques)	61
Figure 28 : glissements superficiels (source : EDD RTM [7])	62
Figure 29 : Ravinement dans la branche principale du Piésan (vers 1200 m) (source : EDD RTM [7])	62
Figure 30 : vue sur la gorge du Piésan, en aval de la réunion des différentes branches du réseau hydrographique, montrant les éboulements affectant les Flysch situés en rive droite (vue vers l'aval) (source : EDD RTM [7])	63
Figure 31 : Localisation du bassin versant du Piésan	64
Figure 32 : Localisation des éléments du système d'endiguement	66
Figure 33 : Cartographie des accès aux ouvrages composants le système d'endiguement	69
Figure 34 : Profil en long du système d'endiguement avec les lieux de référence	71
Figure 35 : Emprise du système d'endiguement au niveau des tronçons RG_TH1 et RG_TH2	72
Figure 36 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH1 et RG_TH2	73
Figure 37 : Profil en travers du tronçon RG_TH1 au niveau du PK820	73
Figure 38 : Profil en travers du tronçon RG_TH2 au niveau du PK780	73
Figure 39 : Emprise du système d'endiguement au niveau du tronçon RD_TH1	76

Figure 40 : Profil en long au droit du tronçon RD_TH1	76
Figure 41 : Profil en travers du tronçon RD_TH1 au niveau du PK780	77
Figure 42 : Emprise du système d'endiguement au niveau des tronçons RG_TH3 et RD_TH2.....	78
Figure 43 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH3 et RD_TH2.....	78
Figure 44 : Profil en travers des tronçons RG_TH3 et RD_TH2 au niveau du PK610.....	79
Figure 45 : Photo post crue 2014 au niveau du chenal en amont de la plage de dépôt (haut de berge atteint et marqueur d'incision du fond du lit)	81
Figure 46 : Photo post crue 2014 au niveau du chenal en amont de la plage de dépôt	82
Figure 47 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : ETRM).....	83
Figure 48 : Exemple de déversement de lave sur digue, avec pas/peu d'érosion (surverse sur digue de fermeture du torrent de Saint Antoine à Modane – source ETRM)	83
Figure 49 : Tableau de croisement des niveaux de résistance des digues avec les niveaux de sollicitation pour qualifier le risque de défaillance (Présentation France Digue ONF/RTM Méthodologie de diagnostic approfondi et analyse de risques).....	85
Figure 50 : Localisation des deux lieux de référence du système d'endiguement du Piésan	87
Figure 51 : Zone protégée et niveau d'eau de protection aux deux lieux de références	89
Figure 52 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement	91
Figure 53 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan	94
Figure 54 : Bassin versant du Piésan (Source : Google Earth).....	97
Figure 55 : Courbe hypsométrique du torrent du Piésan	98
Figure 56 : Seuils rocheux dans la branche du Piésan (marno-calcaire) – altitude 1200 m (Source : EBR RTM 2014[8])99	
Figure 57 : (a) Lit engravé sur la partie supérieure de la correction torrentielle (seuil n°40 – Source EDD 2019 [7]), (b) Aval du pont de route forestière	100
Figure 58 : (a) Linéaire de la digue de l'école, (b) linéaire entre le pont de la route départementale et la plage de dépôt100	
Figure 59 : Profil en long de la zone d'étude du Piésan depuis la confluence avec le Biel.....	101
Figure 60 : Profil en long de l'écart altimétrique relatif entre le niveau de fond de lit de 2022 et 2012	102
Figure 61 : Différence altimétrique entre les MNT de 2021 et de 2012.....	102
Figure 62 : Ouvrages de franchissement sur la zone d'étude, (a) pont de la route forestière, (b) ponceau agricole, (c) pont communal, (d) pont de la route départementale.....	103
Figure 63 : Tronçon en aval de la plage de dépôt faisant la jonction avec la confluence au Biel	104
Figure 64 : Profil en long du torrent du Piésan	105
Figure 65 : Canal d'écoulement creusé à la pelle mécanique par l'administration des Ponts et Chaussées - juin 1938 - Archives RTM (Source PPRN – Val-de-Chaise)	108
Figure 66 : Dépôt ligneux et de matériaux fin dans la plage de dépôt à la suite de la crue du 2 juillet 2010 (Source : RTM)	109
Figure 67 : Dépôt au sein de la plage à la suite de la crue du 8 septembre 2014 (Source : RTM).....	110
Figure 68 : Dépôt chenal amont de la plage (Source : RTM).....	110
Figure 69 : Entités fonctionnelles d'une lave torrentielle (extrait de Bardou 2002 [1])	113
Figure 70 : Plage de dépôt du Piésan remplie suite à la lave de 2014	113
Figure 71 : Représentation graphique des principales lois de comportement des laves torrentielles (extrait de HEC-RAS Mud and Debris Flow Manual, 2020)	114
Figure 72 : Illustration de crue torrentielle - Torrent de Morte à Tende (06) – Crue Alex 10/2020, (Source : RTM)	116
Figure 73 : Illustration de crue torrentielle - Tempête Alex – Commune de St-Martin Vésubie (06), (Source : RTM) ...	116
Figure 74 : décomposition schématique d'un bassin versant torrentiel (dessin N. Sardat. Source : Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement. A. Recking, D. Richard, G. Degoutte, coordinateurs).....	117
Figure 75 : Classification des torrents à laves et à charriage (Extrait de Debris-flow susceptibility of upland catchments M.Bertrand-F. Liébault-H.Piégay) [2].....	118
Figure 76 : Temps caractéristiques des crues dans l'EDD de 2019 [7].....	119
Figure 77 : Formule de débit instantanée du CEMAGREF	120
Figure 78 : Hydrogrammes liquides et volumes cumulés de la crue courte (a) et longue (b)	120
Figure 79 : ECSTREM, une approche pratique pour prédire la production sédimentaire des torrents des alpes françaises (Christophe Peteuil, Frédéric Liébault, Olivier Marco) - 2012	121
Figure 80 : Extrait du support de présentation de la formation études hydrauliques torrentielles organisée par France Dignes le 30 janvier 2023 [5] – Synthèse de l'utilisation des formules du projet Hydrodemo	121
Figure 81 : Synthèse des estimations d'apports solides par charriage pour une crue rare du Piésan (approche empirique)	122

Figure 82 : Synthèse des estimations d'apports solides par charriage pour une crue rare du Piésan (approche capacité de transport)	122
Figure 83 : Hydrogrammes (a) et volumes cumulés (b) d'une crue de charriage courte, pour un évènement rare	123
Figure 84 : Hydrogrammes (a) et volumes cumulés (b) d'une crue de charriage longue, pour un évènement rare	123
Figure 85 : apports solides par charriage (crue courte) du Piésan en fonction de la pente d'apports pour une crue rare (10 m ³ /s)	124
Figure 86 : Profil en long global de l'écoulement du scénario C1 – crue rare courte.....	126
Figure 87 : Profil en long des niveaux atteints entre le pont n°2 et le pont n°3 pour le scénario C1 – crue rare courte	127
Figure 88 : Profil en long des niveaux atteints en aval du pont n°4 (secteur des travaux) pour le scénario C1 – crue rare courte	128
Figure 89 : Profil en long global de l'écoulement du scénario C2 – crue rare longue	129
Figure 90 : Profil en long des niveaux atteints entre le pont n°2 et le pont n°3 pour le scénario C2 – crue rare longue	130
Figure 91 : Profil en long des niveaux atteints en aval du pont n°4 (secteur des travaux) pour le scénario C2 – crue rare longue	131
Figure 92 : synthèse des estimations empiriques de volumes de laves rares sur le Piésan	133
Figure 93 : Extrait du support de présentation de la formation études hydrauliques torrentielles organisée par France Dignes le 30 janvier 2023 [44] – Synthèse de l'utilisation des formules du projet Hydrodemo	134
Figure 94 : Représentation graphique des principales lois de comportement des laves torrentielles (extrait de HEC-RAS Mud and Debris Flow Manual, 2020 [30]).....	135
Figure 95 : Hauteur d'écoulement en fonction de la pente selon différents paramétrages	138
Figure 96 : Tableau récapitulatif des scénarios de laves torrentielles étudiés.....	141
Figure 97 : Répartition du volume déposé sur le torrent du Piésan pour des laves torrentielles rares.....	142
Figure 98 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle fréquente fluide	143
Figure 99 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle fréquente moyennement visqueuse	144
Figure 100 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle rare fluide.....	145
Figure 101 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle rare moyennement visqueuse	146
Figure 102 : Profil en long global du corps de lave pour les 4 scénarios de lave torrentielle.....	147
Figure 103 : Profil en long des niveaux atteints par le corps de lave entre le pont n°2 et le pont n°3 pour les différentes laves modélisées	149
Figure 104 : Profil en long des niveaux atteints par le corps de lave en aval du pont n°4 (secteur des travaux) pour les différentes laves modélisées.....	150
Figure 105 : Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche et recensement Enquête Permanente sur les Avalanches dans la zone du Piésan.....	155
Figure 106 : Avalanche descendue jusqu'au seuil n°40 en mars 2006 - à droite, gros blocs retrouvés dans les dépôts au printemps (source : EDD RTM)	156
Figure 107 : illustration de la respiration du lit dans la partie supérieure de la correction torrentielle (DDRTM – barrage 40) , source EDD RTM.....	156
Figure 108 : Cartographie des aléas de retrait et gonflement des argiles sur le bassin versant du torrent du Piésan (source : géorisques).....	157
Figure 109 : glissements superficiels (source : EDD RTM [7]).....	158
Figure 110 : Ravinement dans la branche principale du Piésan (vers 1200 m) (source : EDD RTM [7]).....	158
Figure 111 : vue sur la gorge du Piésan, en aval de la réunion des différentes branches du réseau hydrographique, montrant les éboulements affectant les Flysch situés en rive droite (vue vers l'aval) (source : EDD RTM [7])	159
Figure 112 : Zonage sismique (Source : Data.gouv)	159
Figure 113 : Vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [12])	160
Figure 114 : Flottants déposés au sein du lit du Piésan (Sources : (a) Visite de terrain, (b) EDD 2019)	161
Figure 115 : Photographie aérienne de 1937 (avant la crue historique de 1938) - le Piésan n'est pas canalisé en aval du pont départemental (attention la photographie est inversée Sud/Nord)	162
Figure 116 : photographie aérienne de 1951 – Piésan canalisé dans toute la traversée de Cons Sainte Colombe, suite à la crue de 1938	163
Figure 117 : photographie aérienne de 1978 – début de l'urbanisation en aval du pont départemental, derrière des ouvrages très végétalisés.....	163
Figure 118 : photographie aérienne de 1980 – correction torrentielle et réaménagement du lit en amont du cône de déjection, aménagement de la plage de dépôt en aval.....	164
Figure 119 : photographie aérienne de 2004 – des aménagements viennent de s'achever : digue de l'école (juste avant création de l'école visible sur la photo de 2009), et le chenal en enrochement du Piésan entre les ponts 3 (communal) et 4 (départemental)	164
Figure 120 : photographie aérienne de 2012 – des aménagements de réfection du chenal du Piésan viennent de s'achever : tronçon aval de la digue de l'école	165

Figure 121 : photographie aérienne de 2019 – des aménagements de réfection du chenal du Piésan viennent de s'achever : tronçon amont de la digue de l'école + arasement du seuil entre ponts 2 et 3.....	165
Figure 122 : Carte d'emprise du système d'endiguement.....	167
Figure 123 : Profil en long et évolution de la pente du Piésan au niveau de la zone d'étude.....	168
Figure 124 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon RG_TH1.....	169
Figure 125 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du pont n°2 – ponceau agricole.....	169
Figure 126 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon RG_TH2 et RG_TH1, depuis l'extrémité amont du tronçon.....	170
Figure 127 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du pont n°3 (pont communal), à l'aval des tronçons.....	170
Figure 128 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon compris entre les ponts 2 et 3 vu vers l'aval.....	171
Figure 129 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon compris entre les ponts 2 et 3 vu vers l'amont.....	171
Figure 130 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du pont n°4 (extrémité amont du tronçon).....	172
Figure 131 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit des tronçons RG_TH3et RD_TH2.....	173
Figure 132 : Emprise du système d'endiguement au niveau des tronçon RG_TH1 et RG_TH2.....	174
Figure 133 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH1 et RG_TH2.....	174
Figure 134 : Profil en travers du tronçon RG_TH1 au niveau du PK820.....	175
Figure 135 : Profil en travers du tronçon RG_TH2 au niveau du PK780.....	176
Figure 136 : Emprise du système d'endiguement au niveau du tronçon RD_TH1.....	177
Figure 137 : Profil en long au droit du tronçon RD_TH1.....	177
Figure 138 : Profil en travers du tronçon RD_TH1 au niveau du PK780.....	178
Figure 139 : Emprise du système d'endiguement au niveau des tronçon RG_TH3 et RD_TH2.....	179
Figure 140 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH3 et RD_TH2.....	180
Figure 141 : Profil en travers des tronçons RG_TH3 et RD_TH2 au niveau du PK610.....	180
Figure 142 : Localisation des ouvrages associés du Piésan.....	182
Figure 143 : Vue des ouvrages associés (compris entre la digue RD_TH1 et le ponceau agricole) depuis le pont de la route communale vers l'amont.....	183
Figure 144 : Vue des ouvrages associés (compris entre les deux tronçons endigués) depuis le pont de la route départementale vers l'amont.....	183
Figure 145 : Fouille à la pelle des matériaux (digue 1RG - RG-TH1) - Source : Etude confluence 2016.....	184
Figure 146 : Conduite d'eau pluviale se rejetant dans le Piésan au niveau de la zone des travaux projetés en RD au PK540.....	185
Figure 147 : Ponceau agricole vue amont.....	188
Figure 148 : Ponceau agricole suite à la crue de septembre 2014.....	188
Figure 149 : Pont de la route communale vue amont.....	189
Figure 150 : Vue du Piésan au droit de la digue de l'école et du pont de la route communale suite à l'évènement de septembre 2014.....	189
Figure 151 : Pont de la route départementale vue amont.....	190
Figure 152 : Pont de la route départementale vue amont suite à la crue de 2014.....	190
Figure 153 : Profil en travers type – berges en enrochements secs.....	191
Figure 154 : Profil en travers du chenal – berges bétonnés.....	192
Figure 155 : Schéma de principe côté du sabot en enrochements libres.....	192
Figure 156 : Schéma de principe de l'entrée de plage de dépôt.....	192
Figure 157 : Plan de masse des travaux prévus.....	193
Figure 158 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : étude ETRM).....	195
Figure 159 : Photo post crue 2014 – atteinte de la crête de berge par un front de lave transportant du bois, et forte érosion du chenal.....	197
Figure 160 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe.....	198
Figure 161 : Schéma de principe d'une rupture par érosion interne.....	199
Figure 162 : Schéma de principe de rupture d'ensemble (côté cours d'eau).....	199
Figure 163 : schématisation du mécanisme de rupture par surverse (Mériaux et al, 2001).....	200
Figure 164 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : étude ETRM).....	200
Figure 165 : Bourrelets latéraux sur le torrent du St Martin, Saint-Martin de la Porte (73), suite à la lave de juillet 2019 (source RTM).....	201
Figure 166 : Arrêt rapide de débordements d'une lave après surverse sur une digue : crue du 22 août 2011 sur le torrent du Saint-Martin à Saint-Martin-de-la-Porte (73) (source RTM).....	201
Figure 167 : Ecoulement liquide suite à la lave torrentielle du 6 juin 2010 sur le Saint-Martin, à Saint Martin de la porte (73) (Source : RTM).....	203

Figure 168 : vue depuis le chenal du Piésan en amont du pont communal	204
Figure 169 : vue depuis l'extrémité aval de l'ouvrage RG_TH2 du point "faible"	205
Figure 170 : Schématisation du mécanisme de rupture d'ensemble par l'amont (Mériaux et al, 2001)	205
Figure 171 : Schématisation du mécanisme de rupture par érosion interne – renard hydraulique (Mériaux et al, 2001).....	206
Figure 172 : schématisation du mécanisme de rupture par érosion/affouillement (Mériaux et al, 2001).....	207
Figure 173 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : étude ETRM)	209
Figure 174 : Exemple de déversement de lave sur digue, avec pas/peu d'érosion (surverse sur digue de fermeture du torrent de Saint Antoine à Modane (73) – source ETRM [4])	209
Figure 175 : Modes de rupture retenus	209
Figure 176 : Barbacanes présentes dans la digue de l'école	211
Figure 177 : Conduite d'eau pluviale se rejetant dans le Piésan au niveau de la zone des travaux projetés en RD au PK540	213
Figure 178 : Localisation des désordres sur les ouvrages d'endiguement du Piésan	214
Figure 179 : Tableau de croisement des niveaux de résistance des digues avec les niveaux de sollicitation pour qualifier le risque de défaillance	215
Figure 180 : Modes de rupture retenus	216
Figure 181 : vue depuis l'extrémité aval de l'ouvrage RG_TH2 du point "faible"	217
Figure 182 : Profils Géostudio du RG-TH1 et RG-TH2.....	219
Figure 183 : Profils Géostudio du RD-TH1	220
Figure 184 : Profils Géostudio du RG-TH3.....	220
Figure 185 : Profils Géostudio du RG-TH3.....	220
Figure 186 : Synthèse des résultats de stabilité au talus de l'ensemble des tronçons homogènes	221
Figure 187 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement	229
Figure 188 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan	231
Figure 189 : Limites administratives du territoire relevant de la CCCLA, et localisation de la commune de Val de Chaise dans ce territoire (rond noir)	234
Figure 190 : Limites administratives du CCCLA	235
Figure 191 : Localisation de la zone d'étude du Piésan (source : Géoportail IGN)	235
Figure 192 : Carte positionnant la zone protégée et les deux lieux de références	236
Figure 193 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement	237
Figure 194 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan	238

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description structurelles des ouvrages de protection constitutif du système d'endiguement	20
Tableau 2 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH1	21
Tableau 3 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH2	22
Tableau 4 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH1	23
Tableau 5 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH3	24
Tableau 6 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH2	25
Tableau 7 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - générale	26
Tableau 8 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - adoptée	26
Tableau 9 : Table synthétique qualifiante du risque de surverse en fonction des aléas	27
Tableau 10: Population estimée dans la zone protégée	29
Tableau 11 : Cadre de l'étude de dangers	40
Tableau 12 : Sources de données mobilisées pour le dénombrement des enjeux	51
Tableau 13: Population estimée dans la zone protégée	51
Tableau 14 : Caractéristiques généraux du bassin versant du Piésan	54
Tableau 15 : Caractéristiques des tronçons de digues constitutifs du système d'endiguement	65
Tableau 16 : Principales caractéristiques des tronçons de digues constitutifs du système d'endiguement	68
Tableau 17 : Différentes sources de données topographiques à disposition	70
Tableau 18 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH1	74
Tableau 19 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH2	75
Tableau 20 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD-TH1	77
Tableau 21 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH3	79
Tableau 22 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH2	80
Tableau 23 - Synthèse des désordres et état retenu des ouvrages du système d'endiguement à l'état projet	84
Tableau 24 : Description structurelles des ouvrages de protection constitutif du système d'endiguement	84
Tableau 25 : Caractéristiques généraux du bassin versant du Piésan	98
Tableau 26 : Caractéristique des ouvrages de franchissement sur le torrent du Piésan	103
Tableau 27 : Inventaire des principales crues connues du Piésan (Source : EDD Piésan 2019 RTM)	106
Tableau 28 : Estimation de la valeur du coefficient Tc/ρ à partir des hauteurs relevées dans l'historiques (Extrait EDD 2019)	111
Tableau 29 : Ordre de grandeur des paramètres physiques et mécaniques d'un écoulement de lave torrentielle typique. (Source : Chambon et Laigle, 2013)	112
Tableau 30 : Fréquences d'événements de crue en contexte torrentiel	119
Tableau 31 : Débits de référence du Piésan	119
Tableau 32 : Table de valeurs des deux scénarios de crues rares de charriages	124
Tableau 33 : Revanche sous les ouvrages de franchissement lors d'une crue de charriage longue	132
Tableau 34 : Revanche (entre hauteur maximale atteinte par la crue de charriage et crête de digue) relevée au droit des différents tronçons au point le plus défavorable	132
Tableau 35 : Tableau de valeur des volumes obtenus avec les formules ECSTREM	133
Tableau 36 : Tableau de valeur des paramètres des hydrogrammes de crues des laves torrentielles	134
Tableau 37 : Débit de pointe des laves torrentielles conservé en fonction des fréquences d'apparition approximatives	134
Tableau 38 : Expressions des principales lois de comportement représentant les laves torrentielles	135
Tableau 39 : Répartition de la perte de charge implémenté sous HECRAS en fonction de différents paramétrages	136
Tableau 40 : Jeux de paramètres rhéologiques	139
Tableau 41 : Tableau descriptif du logiciel HEC-RAS (Source : Valentin.M 2022)	140
Tableau 42 : Revanche (entre hauteur des corps de lave et côte de sous poutre des ponts) relevée au droit des ouvrages de franchissement	151
Tableau 43 : Revanche (entre hauteur des corps de laves et crête de digue) relevée au droit des différents tronçons au point le plus défavorable	152
Tableau 44 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - générale	152
Tableau 45 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - adoptée	152
Tableau 46 : Table synthétique qualifiante du risque de surverse en fonction des aléas	154
Tableau 47 : Historique du système d'endiguement	166

Tableau 48 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH1	175
Tableau 49 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH2	176
Tableau 50 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH1.....	178
Tableau 51 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH3	180
Tableau 52 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH2.....	181
Tableau 53 : Caractéristiques géomécaniques retenues pour les calculs de stabilité - Source Confluence 2016	185
Tableau 54 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche	195
Tableau 55 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - adoptée	195
Tableau 56 : Table synthétique qualifiante du risque de surverse en fonction des aléas	196
Tableau 57 : Définition des classes d'urgence - Sirs	210
Tableau 58 - Synthèse des désordres et état retenu des ouvrages du système d'endiguement.....	213
Tableau 59 - Synthèse des désordres et état retenu des ouvrages du système d'endiguement à l'état projet.....	215
Tableau 60 : Croisement entre le niveau de résistance et le niveau de contrainte pour qualifier le risque de défaillance par surverse pour un scénario de lave fréquente	217
Tableau 61 : Croisement entre le niveau de résistance et le niveau de contrainte pour qualifier le risque de défaillance par surverse pour un scénario de lave rare	217
Tableau 62 : Caractéristiques géomécaniques retenues pour les calculs de stabilité - Source Confluence 2016	218
Tableau 63 : Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source : CFBR, 2015)	218
Tableau 64 : Liste des sollicitations étudiés dans le cadre du glissement de talus (source : RTM – 2020)	219
Tableau 65 : Niveau de résistance à l'érosion des tronçons sur les digues du Piésan selon l'évènement de lave considéré	222
Tableau 66 : Croisement entre le niveau de résistance et le niveau de contrainte pour qualifier le risque de défaillance par érosion pour des scénarios rares	222
Tableau 67 : Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour l'ensemble des scénarii définis, en considérant un évènement de lave rare visqueuse	224
Tableau 68 : Synthèse des niveaux de sûreté estimés pour l'ensemble des tronçons homogènes du Piésan.....	225
Tableau 69 : Préconisations pour la gestion des ouvrages	233

Table des annexes

[Annexe 1 : Synthèse des résultats relatifs à l'étude du glissement](#)

[Annexe 2 : Rapport géotechnique – Confluence 2016](#)

Bibliographie

- [1] Bardou, Eric. (2002). Méthodologie de Diagnostic des Laves Torrentielles sur un Bassin Versant Alpin.
- [2] Bertrand.M et al. Debris-flow susceptibility of upland catchments. Natural Hazards. 67. (2013) - 10.1007/s11069-013-0575-4.
- [3] Chambon, Laigle, Les laves torrentielles dans Torrents et rivières de montagne. Dynamique et aménagements. Recking, A., Richard, D., Degoutte, G. (eds.), Quae, pp.200-266, 2013, Savoir-faire, 978-2-7592-1999-5. [hal-02604490](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02604490)
- [4] Coussot, Philippe. « Les laves torrentielles : connaissances à l'usage du praticien ». Equipements pour l'eau et l'environnement 23, Cemagref (1996).
- [5] Iverson, R. M. The physics of debris flows. Reviews of Geophysics, 35(3), 245-296. (1997) <https://doi.org/10.1029/97rg00426>
- [6] Note de présentation du PPRN de la commune de Val-de-Chaise, 2019
- [7] RTM Haute-Savoie, Rapport de l'étude de danger du système d'endiguement du Piésan, 2019.
- [8] RTM Haute-Savoie, Etude de bassin de risque Division domaniale du Piésan, Décembre 2014
- [9] RTM Haute-Savoie, Torrent du Piésan - Etat des lieux, diagnostic hydraulique et schéma d'aménagement, avril 2010
- [10] RTM Savoie, Rapport du dossier d'autorisation du système d'endiguement du Nant-Trouble de l'étude de danger, juin 2023.
- [11] Tardy.M, Rapport hydrogéologique sur la protection du captage du Piésan et sur les conditions de la source du grand pre de la commune de Cons-Sainte Colombe, 1990
- [12] Formation : Etudes hydrauliques en contexte torrentiel, formation France digue, intervenant ONF/RTM Janvier 2023.
- [13] Formation : Etudes de danger en contexte torrentiel, formation France digue, intervenant ONF/RTM Mars 2023.
- [14] Méthodologie d'analyse des aléas en cas de déclenchement de laves torrentielles suite à une débâcle d'OGP, Rapport Phase 1 : Procédure d'étude de la propagation de laves torrentielles issues de débâcles d'OGP, 2022
- [15] Mémoire de fin d'étude, Modélisation en deux dimensions de la propagation et de l'étalement des laves torrentielles sur des sites équipés de plages de dépôts, M.Valentin, Août 2022

Résumé non technique

0. RESUME NON TECHNIQUE

*Préambule : dans la v4 du présent document, à la demande de la CCSLA, il a été repris l'orthographe historique du torrent faisant l'objet de la présente étude : le **Piésan**, et non Piésan. Cette orthographe a été reprise dans le texte mais pas sur les figures.*

0.1 Objectifs de l'étude de dangers (EDD)

La présente **étude de dangers** (EDD) porte sur le système d'endiguement du Piésan à Val de Chaise. Pour mettre en place, définir les performances et gérer au quotidien un système d'endiguement ayant une vocation de défense contre les inondations et les submersions, la réglementation impose la réalisation d'une étude de dangers (décret n° 2015-526 du 12 mai 2015) par l'autorité Gemapienne, ici la **CCSLA**.

La réglementation issue du décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 « *relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques* » définit également les notions techniques suivantes, rappelées ici pour permettre une meilleure compréhension de l'étude de dangers :

- **La GEMAPI** est la compétence correspondant à la GEstion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations. L'autorité compétente sur le territoire, aussi appelée l'autorité Gemapienne ou le Gemapien, est ici l'APTV.
- **La Zone Protégée** est une zone peuplée et sensible aux inondations. Définie par le Gemapien en fonction des enjeux qu'il souhaite protéger, elle est au centre de ses réflexions et permet de définir les ouvrages participant à la protection de la zone (le Système d'Endiguement) ainsi que leurs dimensionnements si ceux-ci ne satisfont pas au niveau de protection qu'il souhaite retenir.
- **Le système d'endiguement (SE)** : Composé d'une ou plusieurs digues conçues pour défendre une même zone protégée contre les inondations. Ces digues peuvent s'accompagner de plusieurs autres ouvrages concourant à la préservation de la même zone protégée. Il s'agit d'un ensemble d'ouvrages anthropiques : digues, ouvrages hydrauliques (vannes, clapets, etc.), remblais routiers/SNCF, etc. Tout ouvrage de conception humaine nécessaire au bon fonctionnement d'un SE, sans forcément être conçu dans le cadre de la prévention des inondations, devra faire l'objet d'une convention de gestion avec le gemapien. Dans le cas d'ouvrages à double emploi, il faudra nécessairement conventionner avec l'entité en charge de l'ouvrage (exemple : Voie ferrée : SNCF).
- **Le niveau de protection** est défini par l'article R. 214-119-1 du code de l'environnement. C'est la hauteur maximale définie par le gestionnaire que peut atteindre l'eau sans que la zone protégée soit inondée en raison du débordement, du contournement, ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau. Le niveau de protection est apprécié au regard d'une cote de niveau. Le Gemapien s'engage sur ce niveau de protection.
- **Autorisation environnementale** : Tout système d'endiguement nécessite une procédure de régularisation ou d'autorisation, qu'il soit existant, neuf, avec ou sans travaux. L'autorisation environnementale, qui intègre l'étude dangers, permet une exonération de responsabilité en cas de dommage causés par une inondation au-delà du niveau de protection retenu, si la surveillance et l'entretien des ouvrages ont été réalisés dans les règles de l'art. Seule l'autorité compétente GEMAPI (ici l'APTV) pourra faire cette demande auprès des instances de contrôle.
- **L'étude de dangers** est la pièce centrale de la procédure de d'autorisation du système d'endiguement. Cette étude se place au centre de la connaissance du système d'endiguement et de son environnement. Elle doit présenter et justifier le fonctionnement et les performances attendues du système d'endiguement en toutes circonstances, à partir d'une démarche d'analyse de risque s'appuyant sur la collecte, l'organisation, l'étude et la confrontation de toutes les informations et données pertinentes pour cet objectif.

La présente étude de dangers est réalisée conformément à l'**arrêté du 30 septembre 2019**, qui précise le plan de l'étude de dangers des digues organisées en système d'endiguement. Et s'appuie fortement sur l'annexe 3 de cet arrêté.

L'**étude de dangers** comporte 3 parties :

- **Le résumé non technique**, dont la fonction est de présenter simplement les conclusions de l'étude de dangers en termes de niveau de protection, de délimitation du territoire protégé et de scénarios de risques de venues d'eau en fonctionnement normal et lorsque se produit un événement (crue) provoquant une montée des eaux excédant le niveau de protection.
- **Le document A**, dont la fonction est de présenter, en synthèse des éléments techniques et des justifications détaillés fournies dans le document B, le niveau de protection, la zone protégée et le système d'endiguement qui lui est associé. Il présente également l'organisation mise en oeuvre par le gestionnaire du système d'endiguement pour surveiller, entretenir le système d'endiguement et, lors des épisodes de crue, le surveiller et informer les autorités chargées de l'organisation des secours en cas de risque de dépassement des performances du système d'endiguement ;
- **Le document B** détaille les analyses techniques et scientifiques permettant d'établir et de justifier les performances du système d'endiguement. Il s'articule autour de plusieurs étapes :
 - Une description des aléas naturels pouvant remettre en cause la stabilité du système d'endiguement ;
 - Une description exhaustive du système d'endiguement (sa constitution, son historique, son utilisation...) ;
 - Un diagnostic approfondi analysant les performances structurelles de l'ouvrage en se basant sur le contexte historique et l'état de l'ouvrage ;
 - Des modélisations hydrauliques permettant de connaître le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage et par suite les écoulements pouvant pénétrer dans la zone protégée en cas de dépassements des performances de l'ouvrage ;
 - L'examen des consignes d'organisation du gestionnaire pour surveiller et entretenir le système d'endiguement.

Pour la bonne compréhension du dossier, il convient également de rappeler les niveaux d'eau réglementaires suivants :

- **Le niveau de protection d'un ouvrage** correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau dans le système doivent être prises en compte. Ces entrées d'eau peuvent s'effectuer par brèche ou par surverse sur les digues. Ce niveau est donc la valeur minimale entre les niveaux respectivement de sûreté et de protection apparent définis ci-après ;
- **Le niveau de sûreté d'un ouvrage** correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau par brèche doivent être considérées. Il va permettre de définir les niveaux de protection au sein de la zone protégée, et correspond à une probabilité résiduelle de rupture au plus de 5 % ;
- **Le niveau de danger d'un ouvrage** correspond au niveau d'eau à partir duquel la probabilité de défaillance du système d'endiguement est considérée comme très élevée ou certaine pour l'un des différents modes de rupture auxquels il est exposé, La probabilité d'une brèche est de 50 %.
- **Niveau de protection apparent d'un ouvrage** : hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que la zone protégée ne soit inondée en raison du débordement ou du contournement des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau et en faisant abstraction des risques de défaillance avant surverse. Il s'agit, la plupart du temps, d'un niveau apportant une fausse impression de protection

0.2 Gestionnaire du système d'endiguement

Le gestionnaire du système d'endiguement est la Communauté de Communes des Sources du Lac d'Annecy disposant de la compétence GEMAPI depuis le 24 février 2016.



Communauté de Communes des Sources du Lac d'Annecy

32, route d'Albertville - BP 42 Faverges

74210 Faverges-Seythenex

Tél : 04.50.44.51.05

Courriel : comcom@cc-sources-lac-annecy.com

0.3 Description succincte du système d'endiguement

Les ouvrages du système d'endiguement sont situés sur la commune de **Val-de-Chaise (74210)**.

Le système d'endiguement se situe en bordure du torrent du Piésan. Ce torrent se situe sur la commune de Val de Chaise (74), à l'extrémité Nord-Est du massif des Bauges (Sud du département de la Haute Savoie). Il s'agit d'un affluent de la Chaise qui est, elle-même, un affluent de l'Arly.

Les digues sont constituées des produits de curage issus des charriages et laves, en particulier celle de 1938. Les matériaux de curages, peu à peu entreposés sur les berges, ont conduit à une situation d'endiguement en surélevant la crête des berges par rapport au terrain naturel. Même si, à l'origine, ces cordons de matériaux ne sont pas des ouvrages construits dans les règles de l'art, ils jouent aujourd'hui un rôle de protection contre les risques torrentiels (inondation, érosion et dépôt de matériaux) et sont considérés comme des ouvrages constituant un système d'endiguement.

Il est composé de 4 ouvrages distincts et de 5 tronçons homogènes (cf Figure 12). Aucun de ces ouvrages n'est déjà classé digue au titre du décret n°2007-1745 du 11 décembre 2007.

Le système d'endiguement est composé de 5 tronçons homogènes tous répartis sur le cône de déjection du Piésan.

Les tronçons sont dénommés par **rive** et **numérotés d'amont en aval** (par exemple : **RG_TH1**) :

- RG_TH1 (état actuel) en enrochement bétonné (présence d'un radier en enrochement bétonné),
- RG_TH2 (état actuel) en enrochement libre (présence d'un radier en enrochement bétonné),
- RD_TH1 (état actuel) en enrochement libre (présence d'un radier en enrochement bétonné),
- RG_TH3 (état projet) en enrochement libre sur le 1/3 inférieur de la berge (présence d'un radier en enrochement),
- RD_TH2 (état projet) en enrochement libre sur le 1/3 inférieur de la berge (présence d'un radier en enrochement).

En plus des digues précédemment présentées, les ouvrages associés suivants permettent le bon fonctionnement au droit du système d'endiguement :

- Plusieurs seuils de correction torrentielle qui permettent de stabiliser le profil en long et de limiter l'incision tout en régulant l'apport de matériaux en aval,
- Radiers en enrochement aux droits des tronçons de digues qui permettent de limiter l'affouillement en pied des ouvrages,

- Enrochement de berges qui limite les risques d'érosions.

Les ouvrages sont localisés sur la figure ci-après :



Figure 1 : Localisation des différents ouvrages du système d'endiguement

0.4 Description des éléments composant le système de protection et leurs fonctions hydrauliques

L'ensemble du système d'endiguement du Piésan est composé de digues en remblai, renforcées pour certaines (en amont du pont de la route départementale) par des enrochements.

Leur disposition contre le lit du torrent ainsi que leur dimension imposante (combinés au gabarit du lit) leur permettent d'assurer le transit de lave torrentielle sans débordement connu à ce jour.

Pour chaque tronçon du système d'endiguement, le tableau suivant décrit les composants structurels des ouvrages et leur fonction.

Tableau 1 : Description structurelles des ouvrages de protection constitutif du système d'endiguement

Tronçon	Élément de l'ouvrage	Fonction
RG_TH1	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement bétonné	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
RG_TH2	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement libre	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
RD_TH1	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement libre	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
	Enrobé en crête	Pas de fonction structurelle, route communale en crête
RD_TH2	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement libre sur une partie des berges et sur le fond du lit	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
RG_TH3	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement libre sur une partie des berges et sur le fond du lit	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue

Il est proposé pour chaque tronçon du système d'endiguement de présenter les principales caractéristiques des ouvrages sous forme de tableau :

Tableau 2 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH1

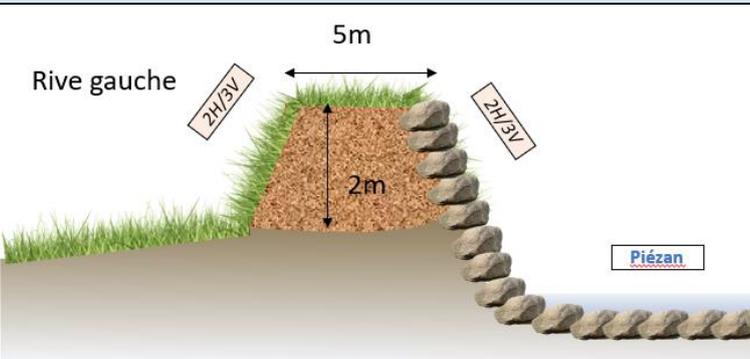
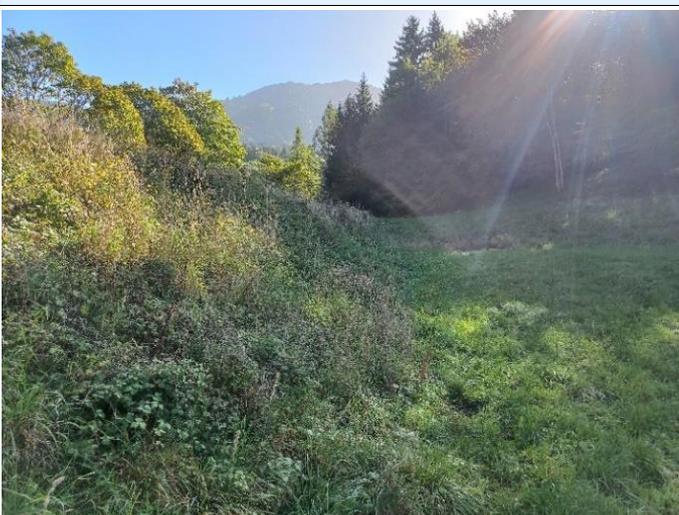
RG_TH1		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 2 m</p> <p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Largeur en base : 12 m</p> <p>PM : 850-800</p> <p>Longueur : 55 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochement bétonné.</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 2H/3V</p>	<p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau et lit mineur enrochement bétonné.</p> <p>Présence de tuyau</p> <p>Pente 2H/3V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

Tableau 3 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH2

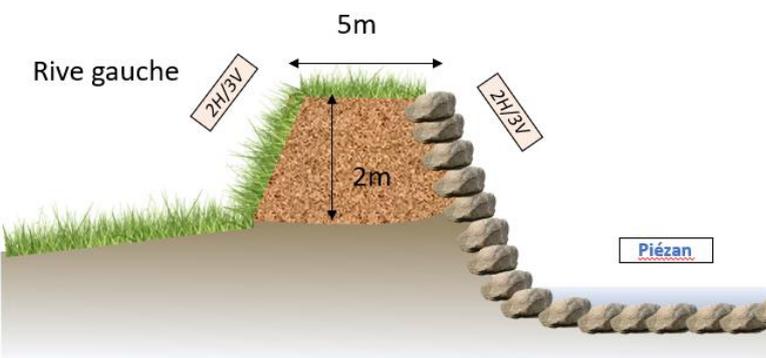
RG_TH2		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 2 m</p> <p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Largeur en base : 12 m</p> <p>PM : 800-760</p> <p>Longueur : 35 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochement libre.</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 2H/3V</p>	<p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau en enrochement libre.</p> <p>Présence de végétation.</p> <p>Pente 2H/3V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

Tableau 4 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH1

RD_TH1		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 m</p> <p>Largeur en crête : 7 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 800-765</p> <p>Longueur : 35 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochements libres</p>	 <p>Rive droite</p> <p>7m</p> <p>3H/2V</p> <p>1m</p> <p>5H/2V</p> <p>Piézan</p>
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 3H/1V</p>	<p>Largeur en crête : 7 m</p> <p>Présence de végétation et chaussée.</p>	<p>Berge du cours d'eau en enrochement libre.</p> <p>Présence de tuyau</p> <p>Pente 5H/2V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

Tableau 5 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH3

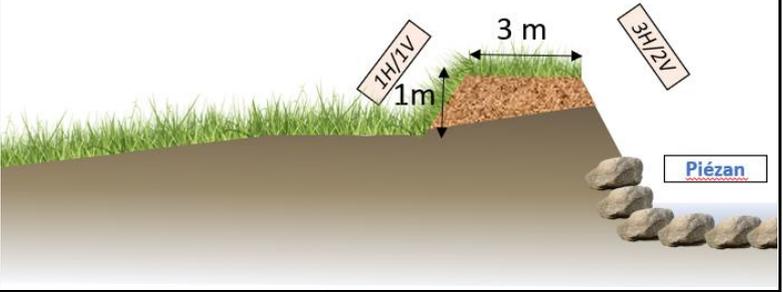
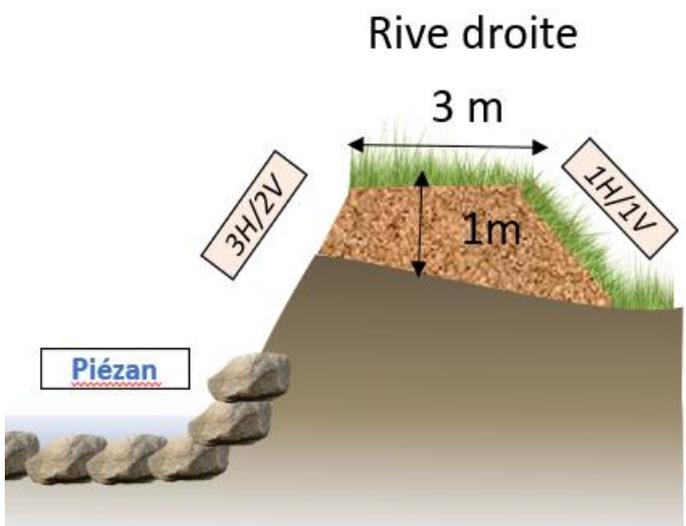
RG_TH3		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 1.5 m</p> <p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 650-300</p> <p>Longueur : 375 m</p>	Digue en levée.	<p>Rive gauche</p> 
Côté protégé	Crête	Côté rivière
Enherbé. Pente 1H/1V	Largeur en crête : 3 m Présence de végétation.	Berge du cours d'eau naturelle. Pente 3H/2V
Photographie coté protégé		Photographie coté Piésan
		

Tableau 6 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH2

RD_TH2		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 1.5 m</p> <p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 650-300</p> <p>Longueur : 375 m</p>	Digue en levée.	 <p>Rive droite</p> <p>3 m</p> <p>1 m</p> <p>3H/2V</p> <p>1H/1V</p> <p>Piézan</p>
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 1H/1V</p>	<p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau naturelle.</p> <p>Présence de végétation.</p> <p>Pente 3H/2V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

0.5 Bilan du fonctionnement en crue

0.5.1 Limites fonctionnelles du système d'endiguement

Généralités :

L'analyse des conditions d'écoulement sur le cône de déjection et au droit des digues du Piésan a été présentée dans le détail au chapitre 4. Pour les digues du Piésan, les risques de débordement sont liés à la hauteur d'écoulement des laves torrentielles.

Ces hauteurs d'écoulement sont principalement liées :

- À la rhéologie de la lave : un corps d'une lave « visqueuse » présentera une hauteur supérieure à celui d'une lave « fluide ». Les hauteurs du corps de lave de différentes rhéologies ont été calculées en appliquant le modèle de Herschel-Bulkley (formules de Coussot 1D et de Herschel-Bulkley) ;
- À la taille du front de lave torrentielle transportant des gros blocs et dépassant généralement la hauteur du corps de la lave torrentielle. La hauteur de ce front n'est pas calculable dans l'état actuel des connaissances et constitue une incertitude importante dans l'appréhension des risques de débordements comme le montre l'évènement de 2014 ;
- À la présence d'ouvrage constituant des obstacles à l'écoulement (ponts, passerelle, etc.) et pouvant, par leur présence (mise en charge, contraction latérale), rehausser localement l'écoulement à l'amont, voire générer une obstruction sous l'ouvrage.

Ces hauteurs d'écoulement sont également liées (avec une sensibilité bien moindre) :

- Au débit de pointe (et donc au volume) de la lave torrentielle ;
- Au niveau de fond du Piésan considéré (donnée topographique ou plan projet).

Estimation du risque de débordement :

Des calculs d'écoulement ont permis d'appréhender le risque de surverse de la digue selon la rhéologie de la lave. Afin de considérer les fortes incertitudes de l'estimation d'une hauteur de lave liées à la hauteur du front de lave torrentielle et celles intrinsèques au modèle (30%, [4]), il a été proposé d'afficher une interprétation des résultats des calculs « théoriques » en probabilité d'atteinte de la limite de débordement selon la considération suivante (voir paragraphe 4.1.3).

Tableau 7 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - générale

Possibilité de débordement	Improbable	Peu probable	Probable	Très probable	Quasi-certain
Revanche sur hauteur du corps de lave	Supérieure à 1,5 m	Entre 1,5 m et 1 m	Entre 1 m et 0,5 m	Inférieure à 0,5 m	Nulle ou négative

Compte tenu :

- Des observations de la crue de 2014, où le sommet de berge en aval du pont de la départementale a été atteint,
- De l'occupation très boisée du bassin versant qui amène la présence irrémédiable d'un volume de tronc important en front d'une lave rare (même avec un entretien régulier assuré par l'ONF),
- Des échanges avec les référents nationaux RTM/ONF sur ce dossier,

nous proposons de prendre une marge supplémentaire sur ce tableau, pour les scénarios de laves uniquement, comme suit :

Tableau 8 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - adoptée

Possibilité de débordement	Improbable	Peu probable	Probable	Très probable	Quasi-certain
Revanche sur hauteur du corps de lave	Supérieure à 2 m	Entre 2 m et 1,5 m	Entre 1,5 m et 1 m	Entre 1 m et 0,5 m	Inférieure à 0,5 m

Tableau 9 : Table synthétique qualifiante du risque de surverse en fonction des aléas

Tronçon/pont	Scénarios courants				Scénarios rares	
	Charriage court	Charriage long	Lave fréquente fluide $\tau c/\rho=0.5$	Lave fréquente moyennement visqueuse $\tau c/\rho=1.5$	Lave rare fluide $\tau c/\rho=0.5$	Lave rare moyennement visqueuse $\tau c/\rho=1.5$
Ponceau agricole	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Probable</i>	<i>Très Probable</i>
RG_TH1	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
RG_TH2	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
RD_TH1	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
Pont de la route communale	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Quasi-certain</i>	<i>Quasi-certain</i>
Pont de la route départementale	<i>Probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Quasi-certain</i>	<i>Quasi-certain</i>
RG_TH3	<i>Probable</i>	<i>Probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>
RD_TH2	<i>Probable</i>	<i>Probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>

0.5.2 Risques de défaillance

Dans le cas de cette étude de dangers il a été conservé les types de défaillances suivants :

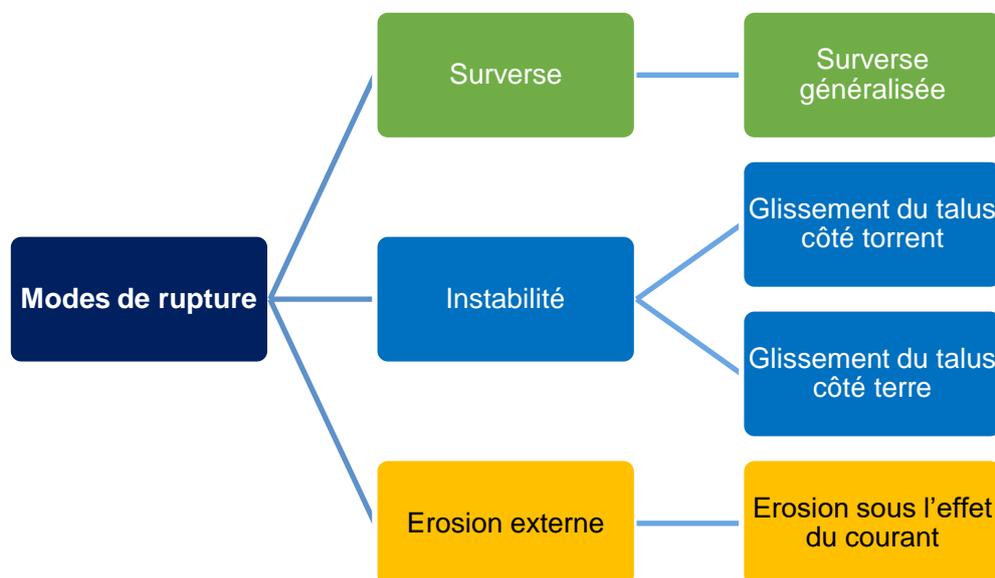


Figure 2: Modes de rupture retenus

Pour les aléas retenus (charriage, lave fréquente, lave rare), l'analyse de ces modes de défaillances a conduit à ce que la probabilité de défaillance structurelle des ouvrages soit inférieure à 1%.

0.6 Présentation de la zone protégée et du niveau de protection associé

0.6.1 Présentation de la zone protégée

La détermination d'une zone protégée dans un contexte torrentiel reste entachée de fortes incertitudes au regard de la nature des phénomènes et d'une part variable du comportement des crues. L'affichage d'une zone inondable ou protégée renseigne une enveloppe maximale, pas nécessairement atteinte au cours d'un seul événement, mais susceptible d'être atteinte au cours d'une ou plusieurs crues.

Elle est définie à partir des zones soustraites à l'inondation par le système d'endiguement pour une sollicitation atteignant le niveau de protection.

Dans le cas présent, la zone bénéficiant du système d'endiguement est représentée sur la carte suivante. Elle a été définie à partir de :

- L'analyse historique ;
- La connaissance locale et les investigations de terrain ;
- L'analyse géomorphologique (topographie, pentes et directions d'écoulement) ;
- Les simulations de transport solide (laves torrentielles et crues avec charriage) avec et sans la contribution des digues ;
- L'expertise des phénomènes torrentiels (phénomènes très aléatoires dans le temps et l'espace) pour interpréter et synthétiser toutes les approches précédentes au service de la caractérisation des phénomènes.
- Des cartes antérieurs représentant les aléas

Tableau 10: Population estimée dans la zone protégée

	Nombre de personnes maximal
Population en résidence principale	211
Population en résidence secondaire	0
Salariés	5
Etablissement scolaire	47
Equipements culturels, touristiques et de loisirs, et autres ERP	0
Etablissements importants pour la gestion de crise	0
Population circulant sur les axes structurants	5
Total général arrondi	270

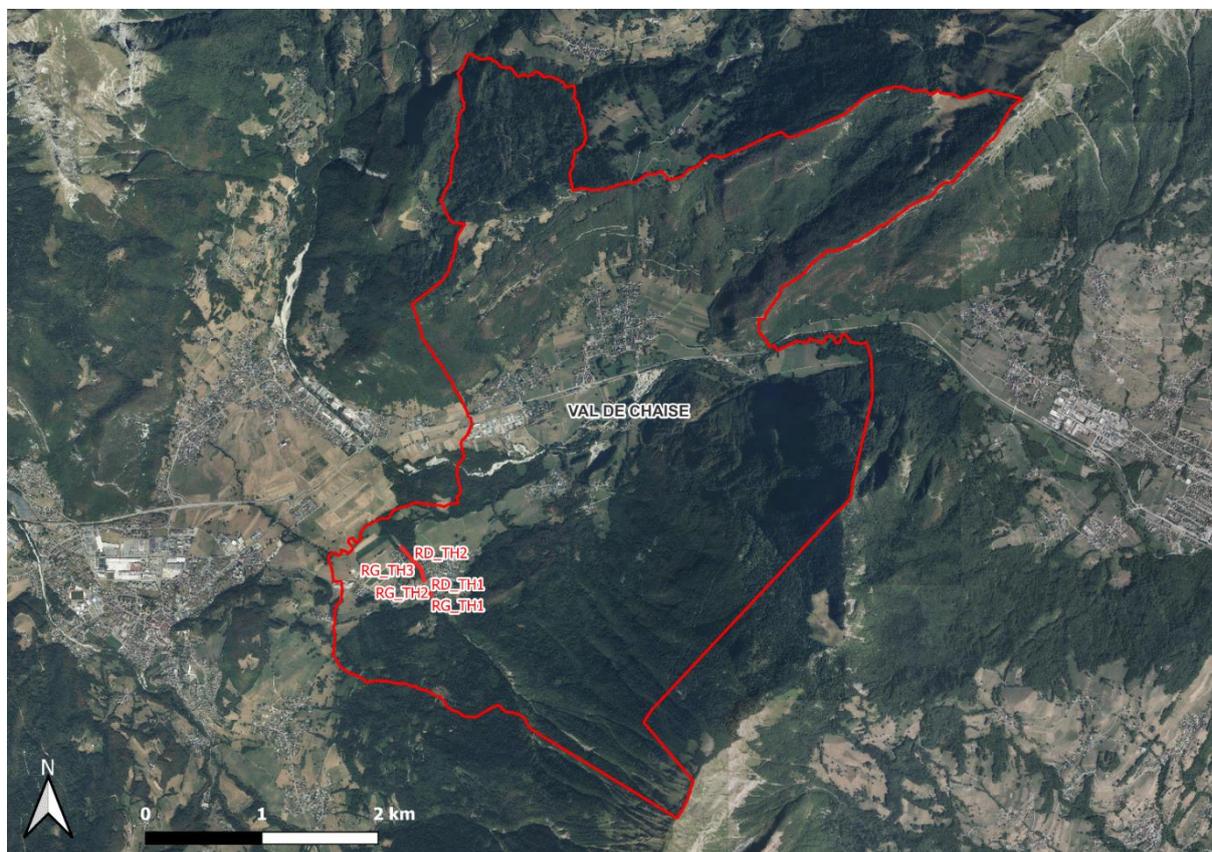


Figure 3 : Localisation des zones protégées à l'échelle de la commune de Val de Chaise

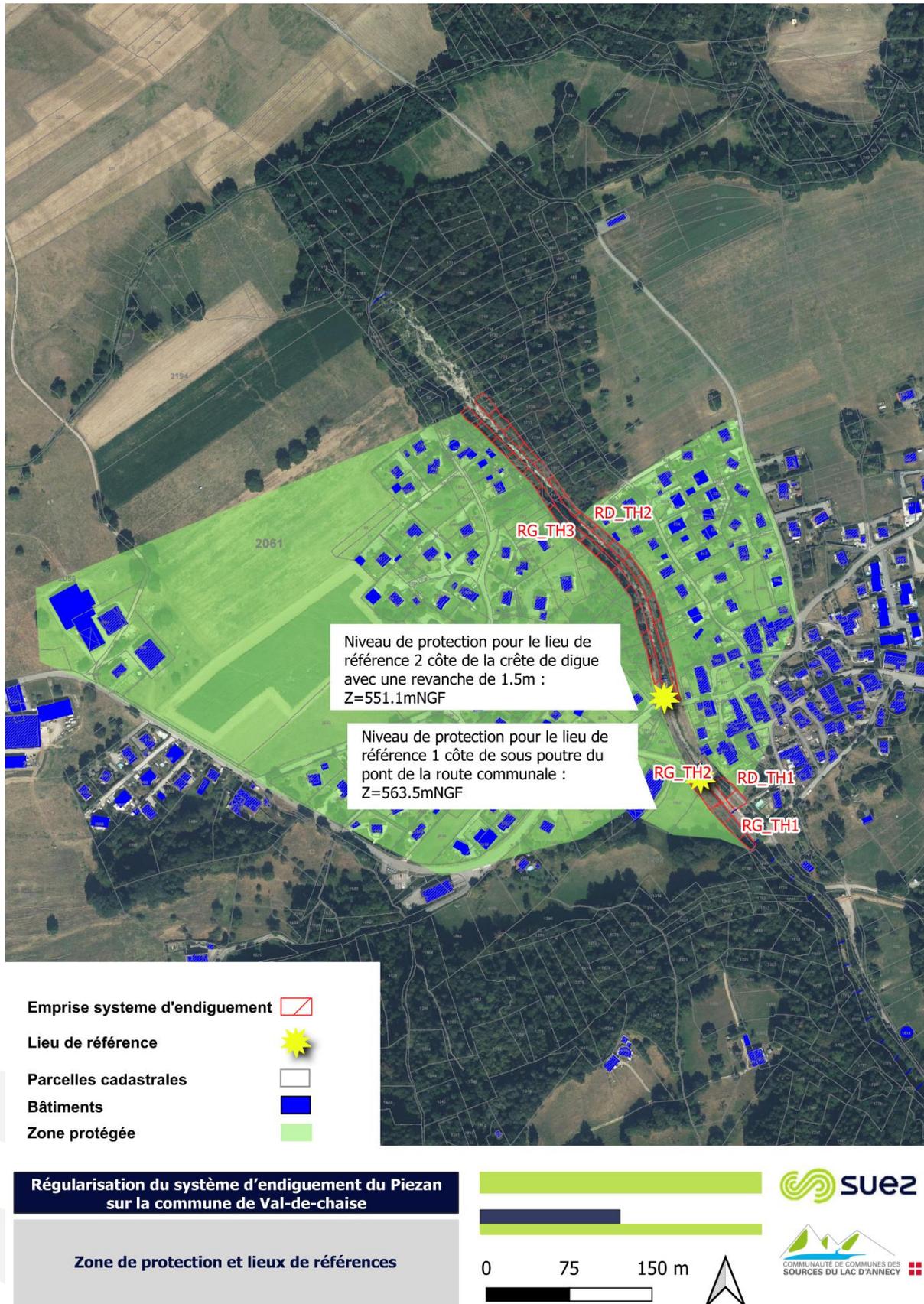


Figure 4 : Carte positionnant la zone protégée et les deux lieux de références

0.6.2 Niveaux de protection retenus

L'analyse des performances des ouvrages du système d'endiguement du Piésan permet d'évaluer la probabilité de défaillance des ouvrages suivant différents mécanismes. Elle est également basée sur l'analyse hydraulique du système qui assure que les écoulements sont contenus par le système d'endiguement.

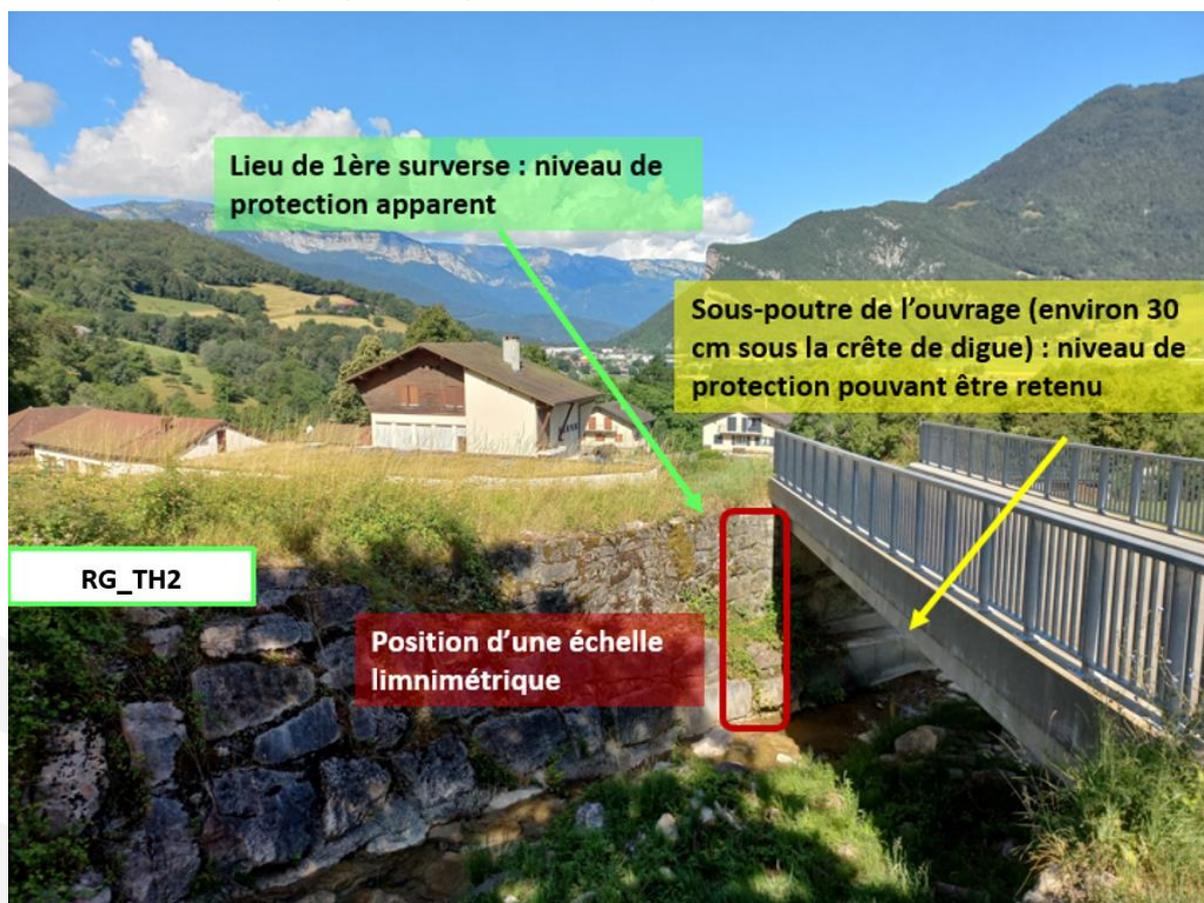
Elle a démontré la résistance mécanique des digues jusqu'au niveau de protection (probabilité de défaillance entraînant une venue d'eau inférieure à 5%) pour les différents mécanismes de rupture.

Aussi, en synthèse, ce niveau de protection :

- Correspond à la sous-poutre du pont de la route communale au droit du premier lieu de référence (aval du tronçon RG_TH2) ;
- Correspond à la limite de surverse des digues RD_TH2 et RG_TH3, 2m en aval du pont de la route départementale, avec une revanche de l'ordre de 1.5 m pour tenir compte des incertitudes associés aux phénomènes torrentiels en jeu (notamment des fronts de laves ainsi que de l'influence du dépôt régressif depuis la plage de dépôt) ;
- Traduit donc un non-débordement de l'ensemble des digues et donc une zone protégée « pieds au sec ».

Le niveau de protection retenu correspond aux niveaux d'eau et de matériaux à chaque lieu de référence, comme suit :

- Lieu de référence n°1 (sous poutre du pont communal) : **563.5 mNGF** ;



- Lieu de référence n°2 (1.5 m de revanche par rapport au niveau de crête de l'ouvrage RG_TH3, 2 m en aval du pont de la route départementale) : 551.1 mNGF.

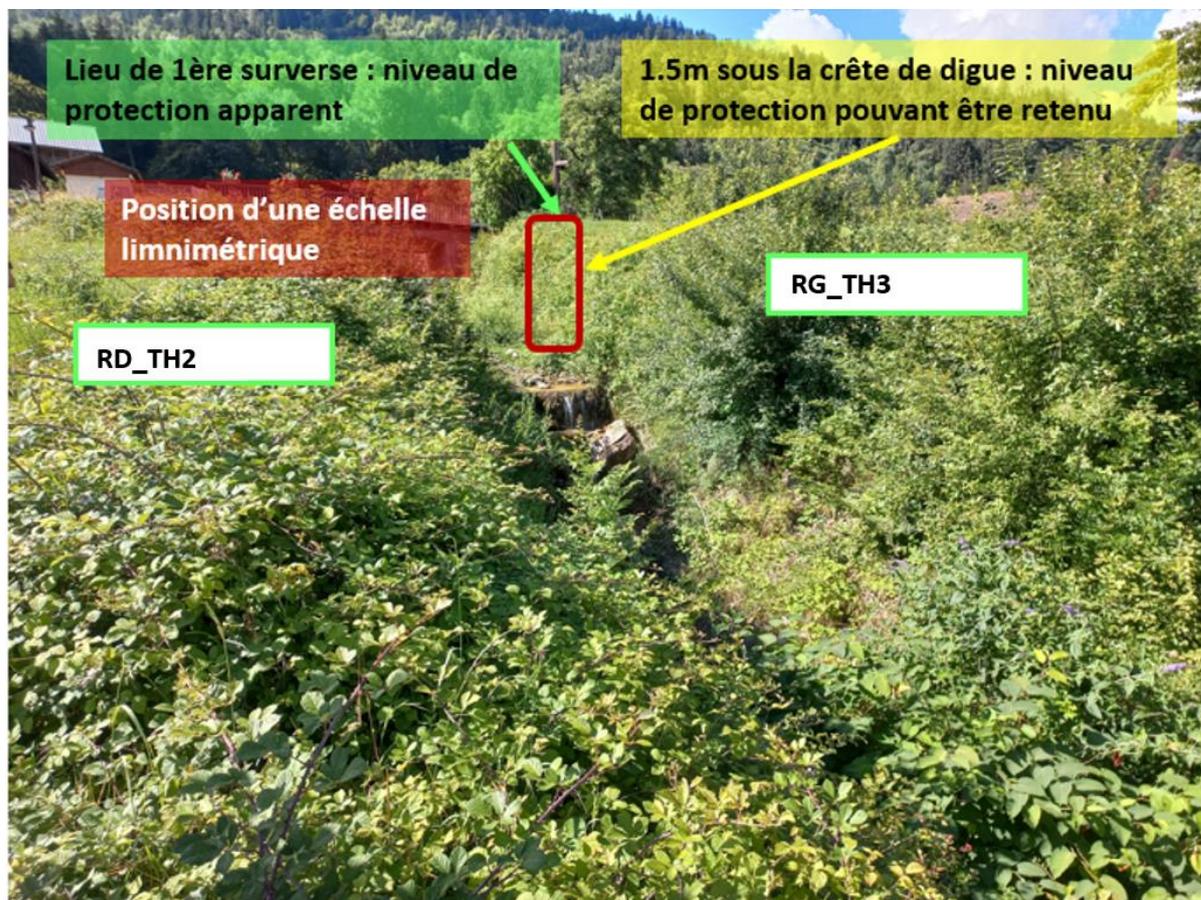


Figure 6 : vue depuis la rive droite du lieu de référence n°2 (2 m en aval de la face aval du pont départemental), positionnement du niveau de protection à 1.5m sous la crête de digue, soit 551.1 mNGF

Pour rappel ces échelles limnimétriques ne sont pas présentes actuellement, elles seront à installer par la suite.

0.7 Etude des différents scénarios de venues d'eau dans et en dehors de la zone bénéficiant du système d'endiguement

L'analyse des conséquences en termes de débordements dans la zone protégée repose sur plusieurs approches complémentaires, vus en partie 4.1 du présent rapport : analyse géomorphologique, historiques des crues, modélisation permettant d'appréhender l'étalement de laves torrentielles, croisement avec les études antérieures du site (en particulier l'EDD de l'ONF/RTM 2019).

La méthode conduit donc à définir des emprises maximales d'extensions de crues, qui ne vont pas correspondre à l'emprise des débordements d'une seule crue, mais correspondent à toutes les zones susceptibles d'être atteinte au cours d'au moins un évènement, selon le caractère aléatoire des crues torrentielles.

En d'autres termes, les zones délimitées par cette méthodologie représentent une enveloppe maximale d'extensions des crues qui pourraient apparaître, dans la gamme d'aléa retenu en termes de période de retour.

Pour tenir compte de cet aspect aléatoire et de toutes les incertitudes liées aux aléas torrentiels, il est proposé, d'associer un niveau de probabilité d'atteinte aux zones concernées : probabilités d'atteinte très probable, probable et peu probable. L'atteinte d'une zone concernée par une faible probabilité sera liée à un phénomène exceptionnel, largement supérieur au siècle ; à l'inverse, un secteur estimé impacté dès dépassement de la crue de protection sera concerné par un risque d'atteinte très probable.

Pour des débordements de lave torrentielle avec étalement, l'intensité de l'aléa diminue avec l'éloignement du torrent. Ce ne serait pas forcément le cas pour un changement total du lit, où le niveau d'aléa peut rester élevé dans un « nouveau lit » s'éloignant pourtant de l'axe initial d'écoulement. Le cas présent, un changement de lit du Piésan vers la zone paraît improbable.

Dans cette logique, sur les secteurs concernés par des débordements de lave, il est considéré que :

- Au droit **des zones exposées à une atteinte très probable**, à proximité du torrent, la hauteur d'écoulement et/ou de dépôt peut dépasser 1 à 2 m, notamment par accumulation contre les faces amonts des bâtiments. Par ailleurs, la dynamique, liée à la vitesse et surtout aux possibles chocs de laves, est élevée. Aussi, **ces débordements sont qualifiés de très dangereux**.
- Au droit des zones exposées **à une atteinte probable**, généralement un peu plus éloignée du lit, la lave continue son étalement et sa dynamique décroît avec la distance. Il est estimé que les hauteurs de dépôts peuvent encore dépasser le mètre, notamment localement au droit de point bas ou contre les faces amont des bâtiments. Les débordements sont alors, sur ce secteur, **qualifiés de dangereux**.
- Enfin, sur les secteurs concernés par une **faible probabilité d'atteinte**, le processus d'étalement de la lave torrentielle se poursuit, à la faveur de la distance parcourue et d'une pente de plus en plus faible. Les vitesses et les hauteurs de dépôts diminuent. L'étendue occupée par de véritables dépôts de laves dépend du volume de débordement, de la rhéologie de la lave. En aval de ceux-ci, les terrains peuvent alors être concernés par des écoulements plus liquides, issus du ressuyage des matériaux ou d'écoulement d'eaux claires en fin de crue. Ces atteintes de la zone protégée sont qualifiées de **peu ou pas dangereuses**.

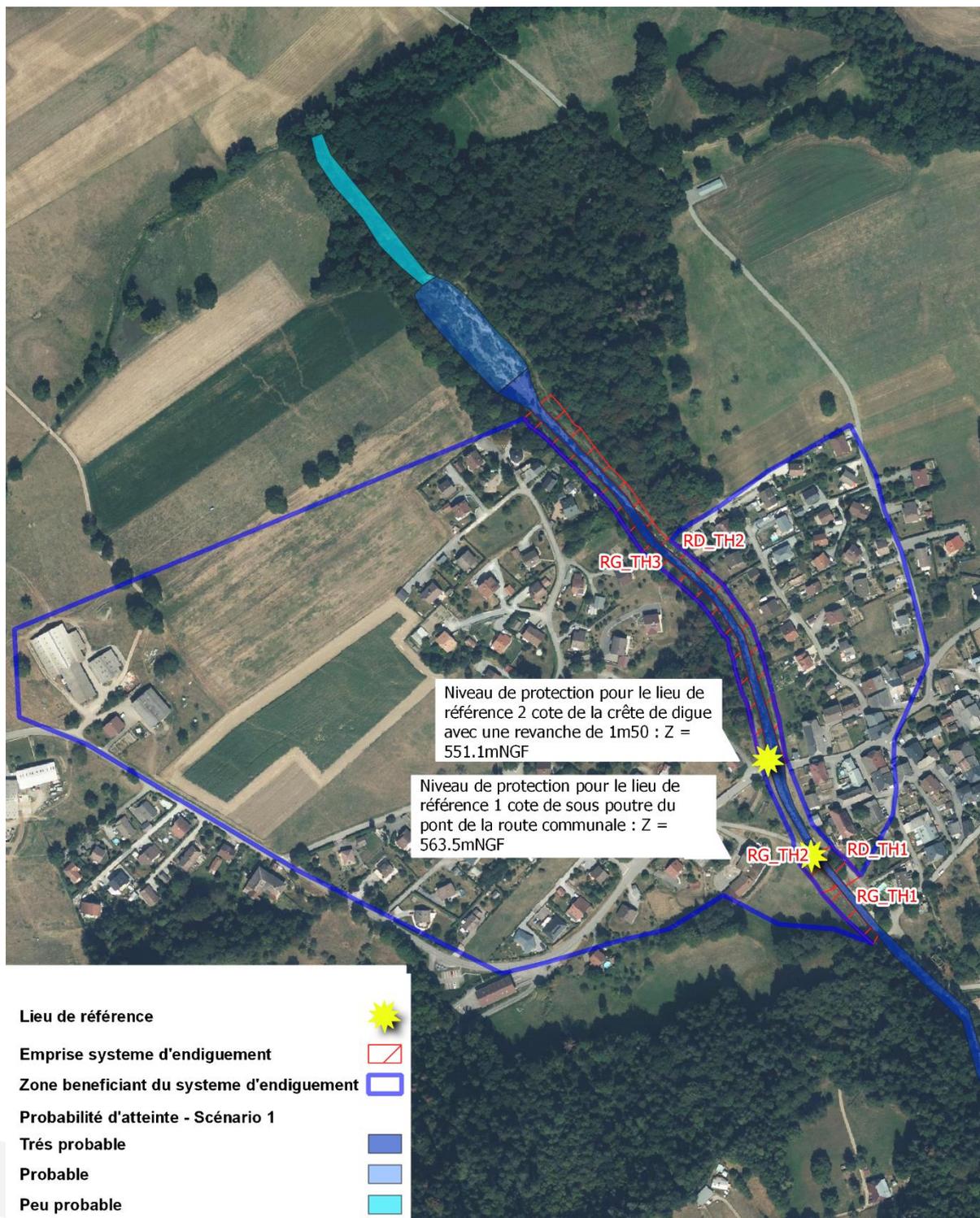
0.7.1 Scénario 1 : Fonctionnement nominal (niveau d'eau correspondant au niveau de protection)

L'arrêté d'avril 2017 prévoit l'étude du fonctionnement nominal du système, quand le niveau de l'eau, correspond au plus haut niveau de protection.

Les risques de débordements, selon les différents aléas étudiés, ont été analysés au paragraphe 4.1.3.

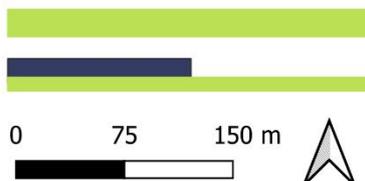
Dans le cas du Piésan, la probabilité d'atteinte est la plus élevée dans le lit avec une décroissance de cette dernière d'amont en aval. La dangerosité est très élevée compte tenu de la vitesse, de la charge de matériaux des laves, et également des hauteurs de dépôts excédant le mètre.

La carte suivante a été établie sur la base d'interprétations faites sur le modèle hydraulique et présente les probabilités d'atteintes d'un événement apparenté à une lave fréquente sur le secteur pour le scénario 1, avec donc une absence de débordement dans la zone protégée.



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-chaise

Venues d'eau dangereuses - Etat projet - Probabilité d'atteinte d'une lave fréquente - Scénario 1 - Fonctionnement nominal du système d'endiguement du Piésan



 SUEZ



Figure 7 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement

0.7.2 Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle

L'arrêté d'avril 2017 prévoit l'étude d'une deuxième famille de scénarios « représentatifs d'une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection ».

Ce scénario ne s'accompagne pas d'une défaillance structurelle, il s'agit bien d'une défaillance liée au dysfonctionnement d'un dispositif de régulation des écoulements. Étant donné qu'il n'y a pas d'ouvrage de régulation sur le Piésan, aucun scénario réaliste ne peut être proposé.

Une crue chargée en matériaux pouvant entraîner des surverses et survenant après un engravement du lit (défaut de curage) est peu probable puisqu'il impliquerait une disponibilité en matériaux importante dans un intervalle de temps rapproché. **Ce scénario a donc été écarté.**

0.7.3 Scénario 3 : Défaillance structurelle

L'arrêté d'avril 2017 demande l'étude d'une troisième famille de scénario « représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement. Pour que ce scénario reflète une situation de terrain réaliste et porteuse d'enseignements pour les services en charge des secours aux personnes, le niveau d'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture d'au moins un ouvrage supérieur à 50% ».

Ce scénario ne représente pas un événement en particulier mais une combinaison d'évènements possibles. Elle est basée sur une interprétation d'un ensemble de modélisations d'étalement de lave torrentielle et de l'interprétation de la géomorphologie locale.

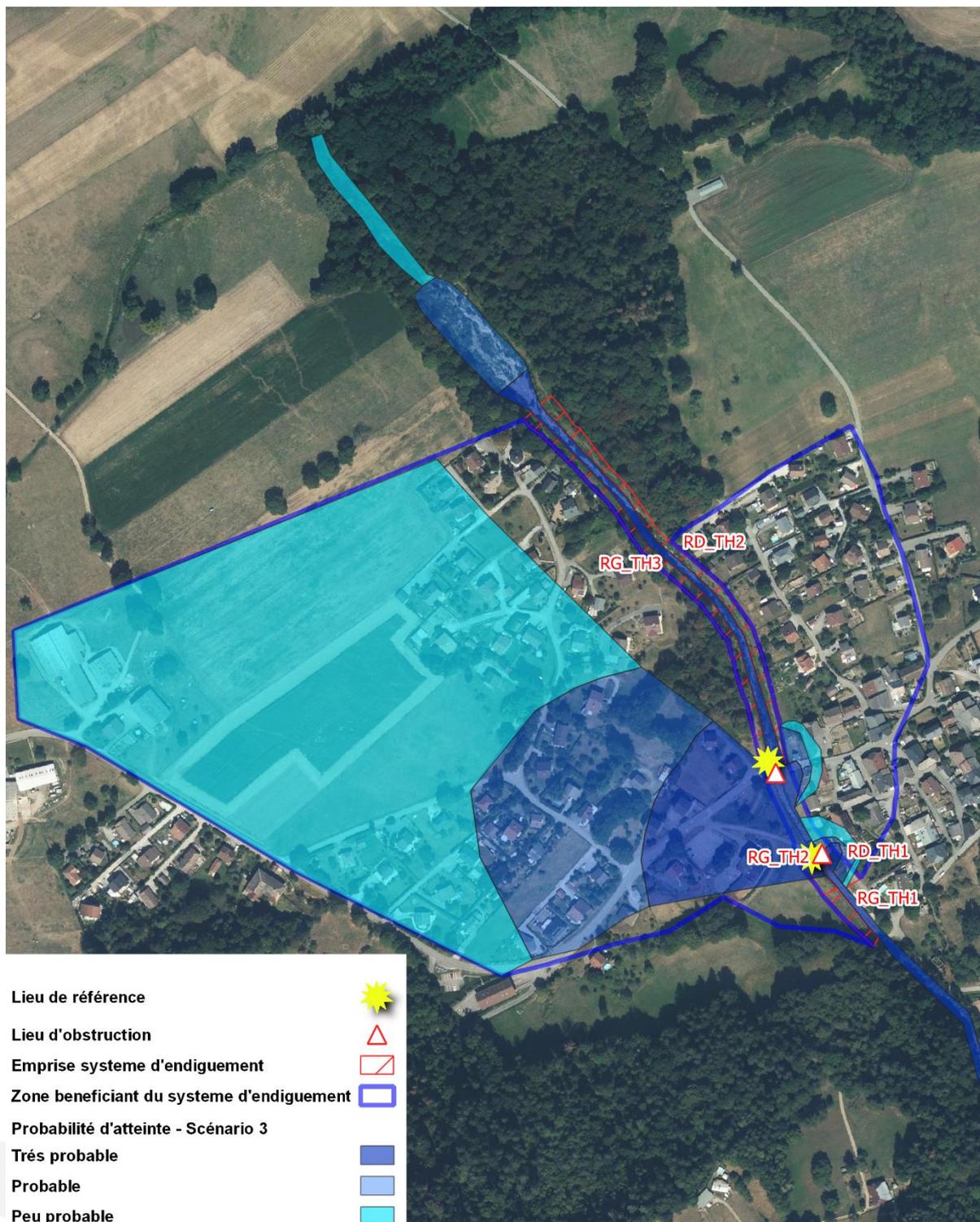
Le scénario n°3 intègre une combinaison des situations suivantes :

- Crue correspondant à la borne haute des scénarios fréquents de lave, avec obstruction des ponts de la route communale et de départementale et tronçon de digue RG_TH2 abaissé (risque de défaillance qualifié au plus de moyen) ;
- Crue correspondant à la borne haute des scénarios rares de lave, avec obstruction des ponts de la de la route communale et de départementale et tronçon de digue RG_TH2 abaissé (risque de défaillance qualifié au plus de moyen) ;

Les conséquences prévisibles sont les suivantes :

- Les laves surversent en grande partie en rive gauche avec des dépôts solides qui décroissent en quantité avec l'éloignement aux différents lieux d'obstruction, en rive droite des débordements locaux sont aussi attendus dans une moindre mesure. Compte tenu des incertitudes associées à ce type de simulation numérique dans un tel contexte, la surverse sur les ouvrages reste possible sur ce type d'évènement, mais resterait assez localisée, sans risque de propagation d'une lave sur une grande distance en arrière des ouvrages.
- Un volume de la lave est potentiellement toujours attendu au sein du lit du Piésan avec un arrêt probablement contenu dans la plage de dépôt ou son amont immédiat.
- Une grande partie de la rive gauche du cône de déjection est concernée par ces venues d'eau, notamment par des écoulements moins chargés en matériaux (fin de crue plus liquides/ dépôt de matériaux).

La dangerosité des venues d'eau décroît avec la probabilité d'atteinte. Pour ces scénarios, au droit des enjeux, on obtient des venues d'eau très dangereuses pour l'école élémentaire et les résidences situées relativement proche des ponts de la route communale et départementale.



**Régularisation du système d'endiguement du Piésan
sur la commune de Val-de-chaise**

Venues d'eau dangereuses - Etat projet - Probabilité
d'atteinte d'une lave fréquente à rare - Scénario 3 -
Défaillance du système d'endiguement du Piésan liée à
l'obstruction des ponts de la route communale et
départementale

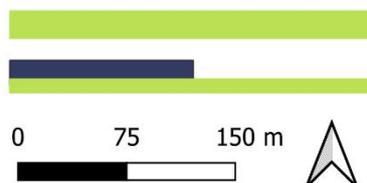


Figure 8 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan

Document A

**Présentation générale du système d'endiguement, associé
le cas échéant à un ou plusieurs aménagements
hydrauliques, contre les inondations et les submersions**

1. RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

Préambule : dans la v4 du présent document, à la demande de la CCSLA, il a été repris l'orthographe historique du torrent faisant l'objet de la présente étude : **le Piésan**, et non Piézan. Cette orthographe a été reprise dans le texte mais pas sur les figures.

1.1 Identification du gestionnaire

Le gestionnaire du système d'endiguement est la Communauté de Communes des Sources du Lac d'Annecy disposant de la compétence GEMAPI depuis le 24 février 2016.



Communauté de Communes des Sources du Lac d'Annecy

32, route d'Albertville - BP 42 Faverges

74210 Faverges-Seythenex

Tél : 04.50.44.51.05

Courriel : comcom@cc-sources-lac-annecy.com

1.2 Identification du bureau d'études agréé qui a réalisé l'étude de dangers

Le présent document qui constitue l'étude de danger du système d'endiguement du Piésan de Val-de-Chaise a été rédigée par la société SAFEGE dont les coordonnées sont les suivantes :



Consulting

SUEZ Consulting (SAFEGE)

SAVOIE Technolac

48 avenue du Lac du Bourget BP 30318

73377 LE BOURGET DU LAC

L'agrément du bureau d'études SAFEGE (SUEZ Consulting) a été renouvelé par l'arrêté du 13 juillet 2021 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques.

SAFEGE est titulaire des agréments suivants, par arrêté du 13 juillet 2021 :

- « Dignes et barrages – études et diagnostics »,
- « Dignes et barrages – études, diagnostics et suivi des travaux »,
- « Barrages de classe C et digues – études et diagnostics »,
- « Barrages de classe C et digues – études, diagnostics et suivi des travaux »,
- « Auscultation tous barrages »,
- « Auscultation barrages de classe C ».

1.3 Rappel des autorisations existantes

Les ouvrages étudiés n'ont pas fait l'objet d'autorisation au titre de la loi sur l'eau.

La présente étude de dangers s'inscrit dans la demande de régularisation initiale du système d'endiguement.

1.4 Date de remise de l'étude de dangers

La présente étude de danger est jointe au dossier de demande d'autorisation initiale du système d'endiguement du Piésan, avec travaux. Elle est déposée en décembre 2024.

1.5 Aménagement hydraulique autre que ceux traités dans le dossier complétant le dispositif de protection

Il n'y a pas d'aménagement hydraulique autorisé conjointement avec le présent système d'endiguement.

1.6 Classement des ouvrages

Conformément à l'article R.214-113 du décret n°2015-526 du 12 mai 2015 (relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques), la classe du système d'endiguement est déterminée suivant le tableau ci-après.

Classe	POPULATION PROTEGEE par le système d'endiguement
A	Population > 30 000 personnes
B	3 000 personnes < Population ≤ 30 000 personnes
C	30 personnes < Population ≤ 3 000 personnes

La population protégée par le système d'endiguement du Piésan est comprise entre 30 et 3 000 personnes. **Le système d'endiguement sera donc de classe C au sens de l'article R214-113.**

2. OBJET DE L'ETUDE

2.1 Descriptif du cadre de l'étude de dangers

La présente étude de dangers (EDD) est réalisée conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019, qui précise le plan de l'étude de dangers des digues organisées en système d'endiguement.

L'État souhaite engager des travaux de confortement du chenal d'écoulement situé à l'aval du pont de la route départementale jusqu'en entrée de la plage de dépôt. Les travaux projetés englobent des interventions sur les remblais en rive droite et gauche du chenal qui s'apparentent fonctionnellement à des digues.

La présente étude de dangers porte sur le système d'endiguement du Piésan constitué des digues suivantes :

- 2 digues situées sur la rive droite du Piésan (dont une sera considérée à l'état projet) ;
- 2 digues situées sur la rive gauche du Piésan (dont une sera considéré à l'état projet).

L'étude de dangers est réalisée en considérant l'état projet des ouvrages concernés par le projet de travaux RTM/ONF.

Tableau 11 : Cadre de l'étude de dangers

	Cas 1	Autorisation initiale du système d'endiguement, sans travaux. Le contenu de l'étude de dangers, qui fait partie du dossier de demande d'autorisation, est conforme aux dispositions de l'article 2 du présent arrêté*.
X	Cas 2	Autorisation initiale du système d'endiguement, avec travaux. Le contenu de l'étude de dangers, qui fait partie du dossier de demande d'autorisation, est conforme aux dispositions de l'article 3 du présent arrêté*.
	Cas 3	Modification substantielle d'un système d'endiguement déjà autorisé. Le contenu de l'étude de dangers, qui fait partie du dossier de demande d'autorisation, est conforme aux dispositions de l'article 4 du présent arrêté*.
	Cas 4	Mise à jour de l'étude de dangers du système d'endiguement exigée par arrêté préfectoral de prescription complémentaire en application des articles R. 181-45 et R. 214-117-III en raison d'une modification non substantielle du système d'endiguement. La mise à jour de l'étude de dangers est conforme aux dispositions de l'article 5 du présent arrêté*.
	Cas 5	Actualisation d'une étude de dangers en application du II de l'article R. 214-117. Cette actualisation est réalisée conformément aux dispositions de l'article 6 du présent arrêté*.

*Arrêté du 30 septembre 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en système d'endiguements et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions

Dans ce cas, le contenu de l'étude de dangers est conforme aux dispositions de l'article 3 du dit arrêté. Les dispositions de cet article sont rappelées ci-dessous :

Article 3 - « Lorsqu'une étude de dangers est jointe à une demande d'autorisation initiale d'un système d'endiguement ou d'un aménagement hydraulique comprenant des travaux, le contenu de l'étude porte sur ce système ou cet aménagement tel qu'il se trouvera dans sa configuration effective au moment où il est considéré comme opérationnel une fois les travaux achevés. L'étude de dangers comporte aussi une évaluation des situations particulières pendant la réalisation des travaux tenant compte de la durée prévue pour ceux-ci. » ;

2.2 Liste des communes concernées par la zone protégée

La zone protégée concerne uniquement la commune de **Val-de-Chaise** (74210).

2.3 Localisation de la zone protégée

La détermination d'une zone protégée dans un contexte torrentiel reste entachée de fortes incertitudes au regard de la nature des phénomènes et d'une part variable du comportement des crues. L'affichage d'une zone inondable ou protégée renseigne une enveloppe maximale, pas nécessairement atteinte au cours d'un seul évènement, mais susceptible d'être atteinte au cours d'une ou plusieurs crues.

La zone protégée est définie à partir des zones soustraites à l'inondation par le système d'endiguement pour une sollicitation atteignant le niveau de protection.

Dans le cas présent, la zone bénéficiant du système d'endiguement est représentée sur la carte suivante. Elle a été définie à partir de :

- L'analyse historique ;
- La connaissance locale et les investigations de terrain ;
- L'analyse géomorphologique (topographie, pentes et directions d'écoulement) ;
- Les simulations de transport solide (laves torrentielles et crues avec charriage) avec et sans la contribution des digues ;
- L'expertise des phénomènes torrentiels (phénomènes très aléatoires dans le temps et l'espace) pour interpréter et synthétiser toutes les approches précédentes au service de la caractérisation des phénomènes.
- Des cartes antérieurs représentant les aléas

La carte ci-dessous donne les limites administratives du territoire relevant de la CCSLA.

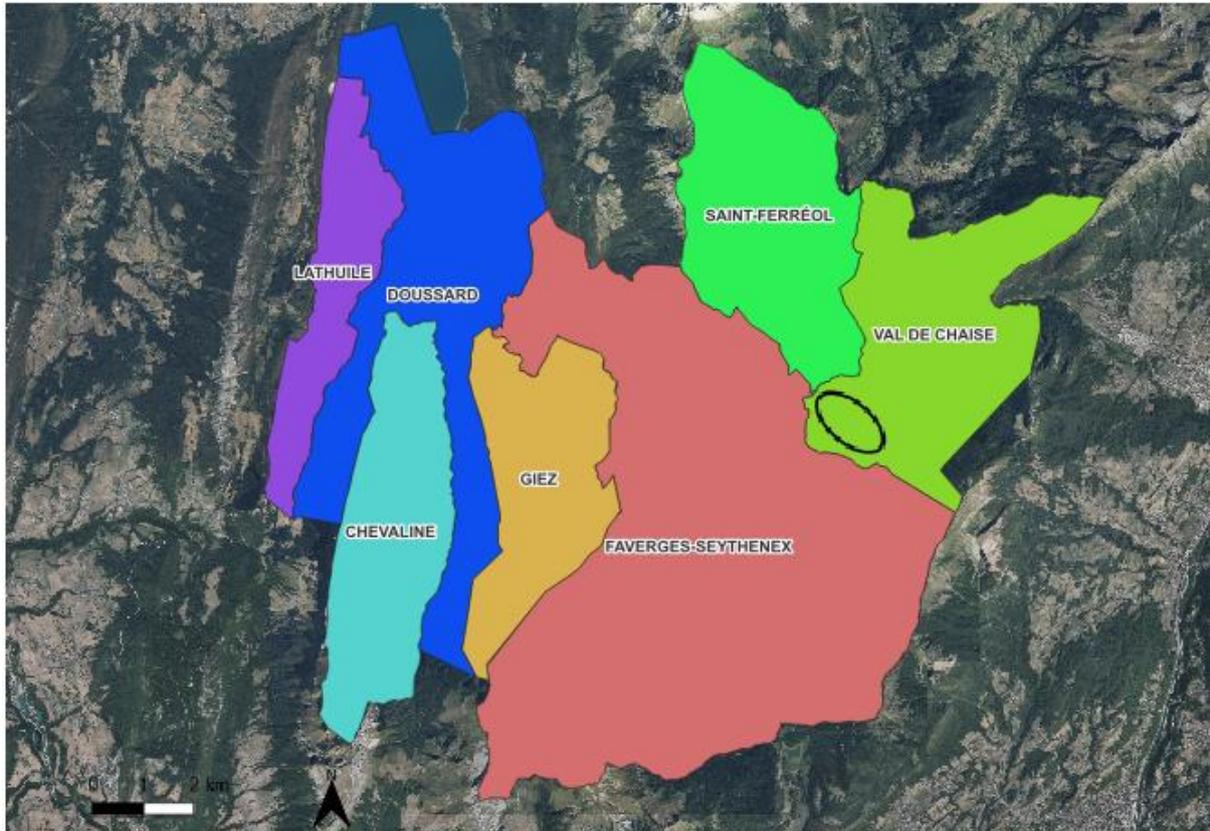


Figure 9 : Limites administratives du territoire relevant de la CCSLA, et localisation de la commune de Val de Chaise dans ce territoire (rond noir)

La carte ci-dessous localise la zone d'étude à l'échelle de la commune de Val-de-Chaise.

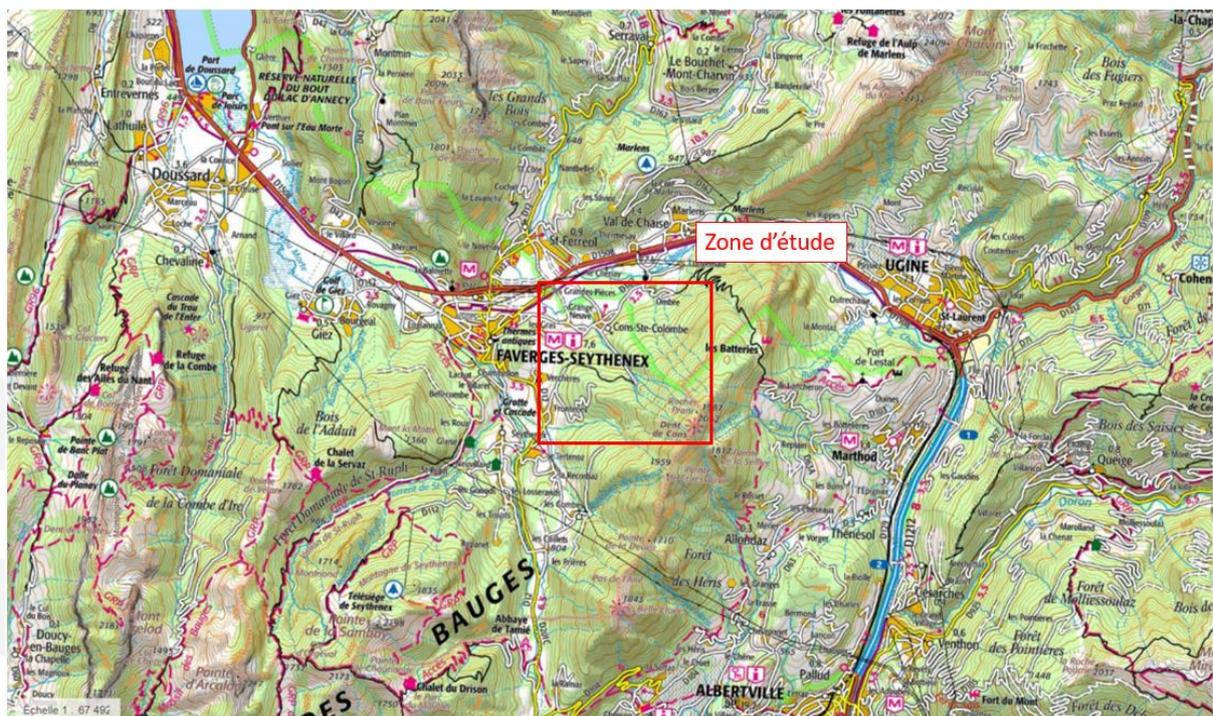


Figure 10 : Localisation de la zone d'étude du Piésan (source : Géoportail IGN)

La carte ci-dessous présente la zone protégée.

Cette zone protégée couvre une grande partie du cône de déjection, en soustrayant les secteurs sans enjeux bâtis.

Deux lieux de référence sont définis, aux endroits suivants :

- **Au niveau de la sous-poutre du pont de la route communale**, ce lieu de référence est lié à la protection de la partie amont du cône de déjection où des entrées d'eau pourraient survenir notamment par le biais d'obstruction d'ouvrage traversant ;
- **Au niveau de la crête moins une revanche de 1m50 de l'ouvrage en aval de la route départementale en rive gauche (RG_TH3)**, ce qui permet de garantir l'absence d'entrée d'eau sur la partie aval de la zone protégée (comportement observé dans l'historique avec la cure de 2014). Cette revanche est ici considérée pour tenir compte des différentes spécificités du contexte torrentiel (embâcle, front de lave) et des incertitudes des modèles.

Ces derniers sont facilement accessibles et visibles en crue à partir des ponts communal et départemental qui devront être équipés d'échelles limnimétriques.

Pour rappel ces échelles limnimétriques ne sont pas présentes actuellement, elles seront à installer par la suite.

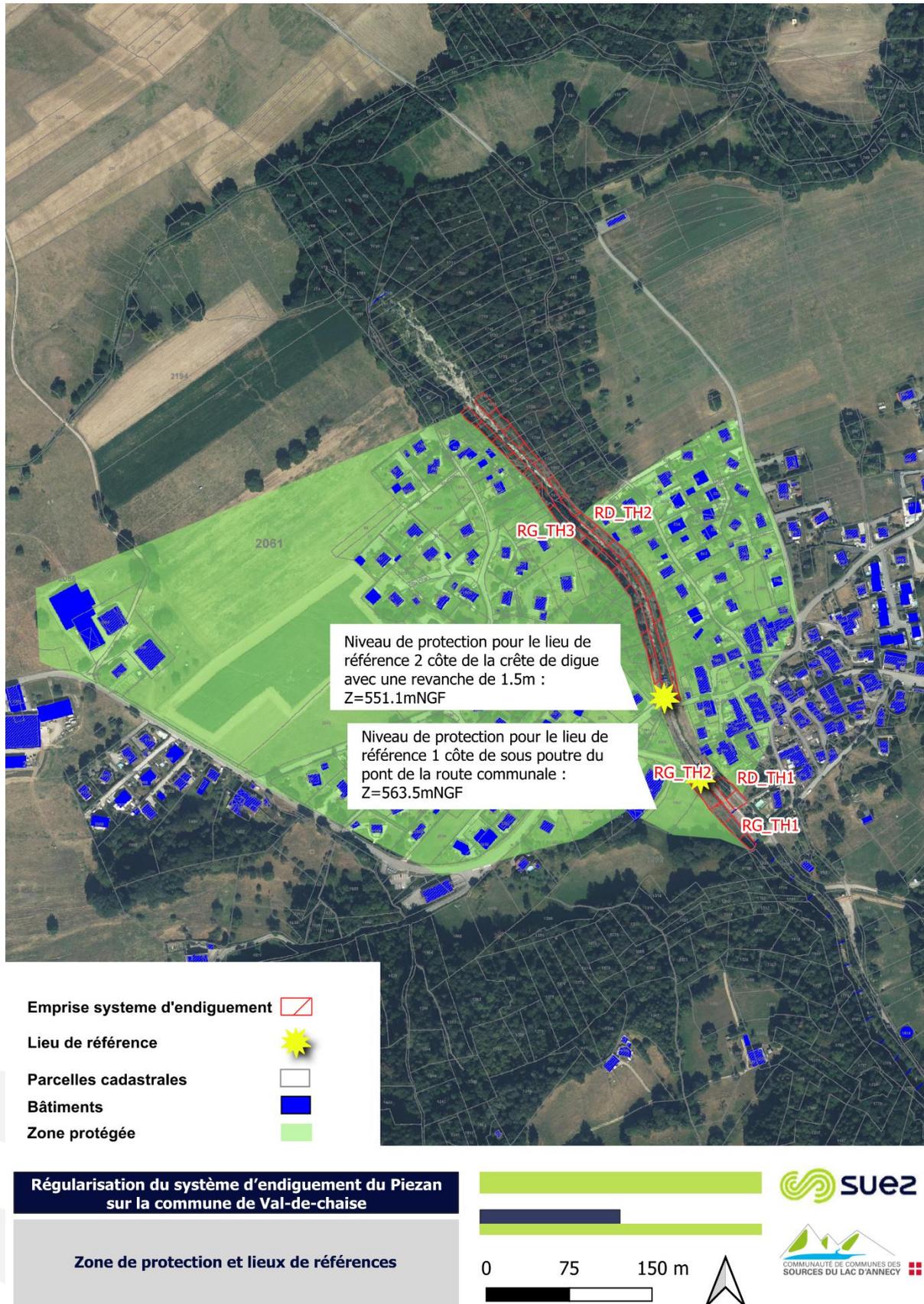


Figure 11 : Carte positionnant la zone protégée et les deux lieux de références

2.4 Localisation et description sommaire des ouvrages concernés

Les ouvrages du système d'endiguement sont situés sur la commune de **Val-de-Chaise (74210)**.

Le système d'endiguement se situe en bordure du torrent du Piésan. Ce torrent se situe sur la commune de Val de Chaise (74), à l'extrémité Nord-Est du massif des Bauges (Sud du département de la Haute Savoie). Il s'agit d'un affluent de la Chaise qui est, elle-même, un affluent de l'Arly.

Les digues sont constituées des produits de curage issus des charriages et laves, en particulier celle de 1938. Les matériaux de curages, peu à peu entreposés sur les berges, ont conduit à une situation d'endiguement en surélevant la crête des berges par rapport au terrain naturel. Même si, à l'origine, ces cordons de matériaux ne sont pas des ouvrages construits dans les règles de l'art, ils jouent aujourd'hui un rôle de protection contre les risques torrentiels (inondation, érosion et dépôt de matériaux) et sont considérés comme des ouvrages constituant un système d'endiguement.

Il est composé de 4 ouvrages distincts et de 5 tronçons homogènes (cf Figure 12). Aucun de ces ouvrages n'est déjà classé digue au titre du décret n°2007-1745 du 11 décembre 2007.

Le système d'endiguement est composé de 5 tronçons homogènes tous répartis sur le cône de déjection du Piésan.

Les tronçons sont dénommés par **rive** et **numérotés d'amont en aval** (par exemple : **RG_TH1**) :

- RG_TH1 (état actuel) en enrochement bétonné (présence d'un radier en enrochement bétonné),
- RG_TH2 (état actuel) en enrochement libre (présence d'un radier en enrochement bétonné),
- RD_TH1 (état actuel) en enrochement libre (présence d'un radier en enrochement bétonné),
- RG_TH3 (état projet) en enrochement libre sur le 1/3 inférieur de la berge (présence d'un radier en enrochement),
- RD_TH2 (état projet) en enrochement libre sur le 1/3 inférieur de la berge (présence d'un radier en enrochement).

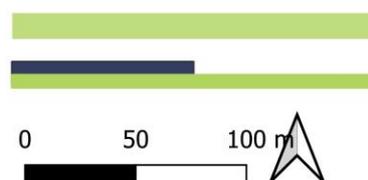
En plus des digues précédemment présentées, on notera la présence des ouvrages associés suivants liés au caractère torrentiel du Piésan, ouvrages qui permettent le bon fonctionnement le système d'endiguement :

- Plusieurs seuils de correction torrentielle qui permettent de stabiliser le profil en long et de limiter l'incision tout en régulant l'apport de matériaux en aval,
- Radiers en enrochement aux droits des tronçons de digues qui permettent de limiter l'affouillement en pied des ouvrages,
- Enrochement de berges qui limite les risques d'érosions.



Régularisation du système d'endiguement du Piézan sur la commune de Val-de-Chaise

Localisation du système d'endiguement du Piézan



 SUEZ

Figure 12 : Localisation des différents ouvrages du système d'endiguement

3. DESCRIPTION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET DE SON ENVIRONNEMENT

3.1 Zone protégée

L'endiguement étudié protège une zone maximale d'inondation potentielle appelée « zone protégée ». Ce paragraphe décrit les limites administratives de cette zone et les enjeux présents.

3.1.1 Lieux de référence où sont mesurés les paramètres représentant les niveaux de protection

Deux lieux de référence sont définis au droit du système d'endiguement :

- **Lieu de référence n°1** : positionné sur l'ouvrage RG_TH2 en face amont du pont de la route communale, ce lieu est lié à la protection de l'ensemble des enjeux de la zone protégée, en particulier les enjeux les plus en amont (école rive gauche) ;
- **Lieu de référence n°2** : positionné sur l'ouvrage RG_TH3 en aval du pont de la route départementale (2 m environ), ce lieu est lié à la protection des enjeux en aval du cône de déjection.

Remarques sur le choix de ces lieux de référence :

Il faut rappeler ici que les phénomènes étudiés sont soumis à de très fortes incertitudes, en effet il est possible (cf. 2014) qu'une lave torrentielle du Piésan puisse transiter sur la partie amont du cône de déjection sans que des débordements soient observés, et que, sur les tronçons plus en aval, on observe à l'inverse des surverses sur les ouvrages, et ce pour un même évènement. Cette spécificité est notamment liée à la forte présence de bois sur le bassin versant ayant la capacité de générer des embâcles. A cela s'ajoute également la présence d'ouvrage traversant qui peuvent s'avérer limitant. Pour toutes ces considérations il a été décidé d'établir deux lieux de référence afin de se prémunir d'un tel phénomène.

Ces derniers sont facilement accessibles et visibles en crue à partir des ponts communal et départemental qui devront être équipés d'échelles limnimétriques.

Pour rappel les échelles limnimétriques ne sont pas présentes actuellement, elles seront à installer.

3.1.2 Niveau de protection

L'analyse des performances des ouvrages du système d'endiguement du Piésan permet d'évaluer la probabilité de défaillance des ouvrages suivant différents mécanismes. Elle est également basée sur l'analyse hydraulique du système qui assure que les écoulements sont contenus par le système d'endiguement.

Elle a démontré la résistance mécanique des digues jusqu'au niveau de protection (probabilité de défaillance entraînant une venue d'eau inférieure à 5%) pour les différents mécanismes de rupture.

Aussi, en synthèse, ce niveau de protection :

- Correspond à la sous-poutre du pont de la route communale au droit du premier lieu de référence (aval du tronçon RG_TH2) ;
- Correspond à la limite de surverse des digues RD_TH2 et RG_TH3, 2m en aval du pont de la route départementale, avec une revanche de l'ordre de 1.5 m pour tenir compte des incertitudes associés aux phénomènes torrentiels en jeu (notamment des fronts de laves ainsi que de l'influence du dépôt régressif depuis la plage de dépôt) ;
- Traduit donc un non-débordement de l'ensemble des digues et donc une zone protégée « pieds au sec ».

Les niveaux de protection retenus correspondant aux niveaux d'eau et de matériaux à chaque lieu de référence, comme suit :

- Lieu de référence n°1 (sous poutre du pont communal) : **563.5 mNGF** ;

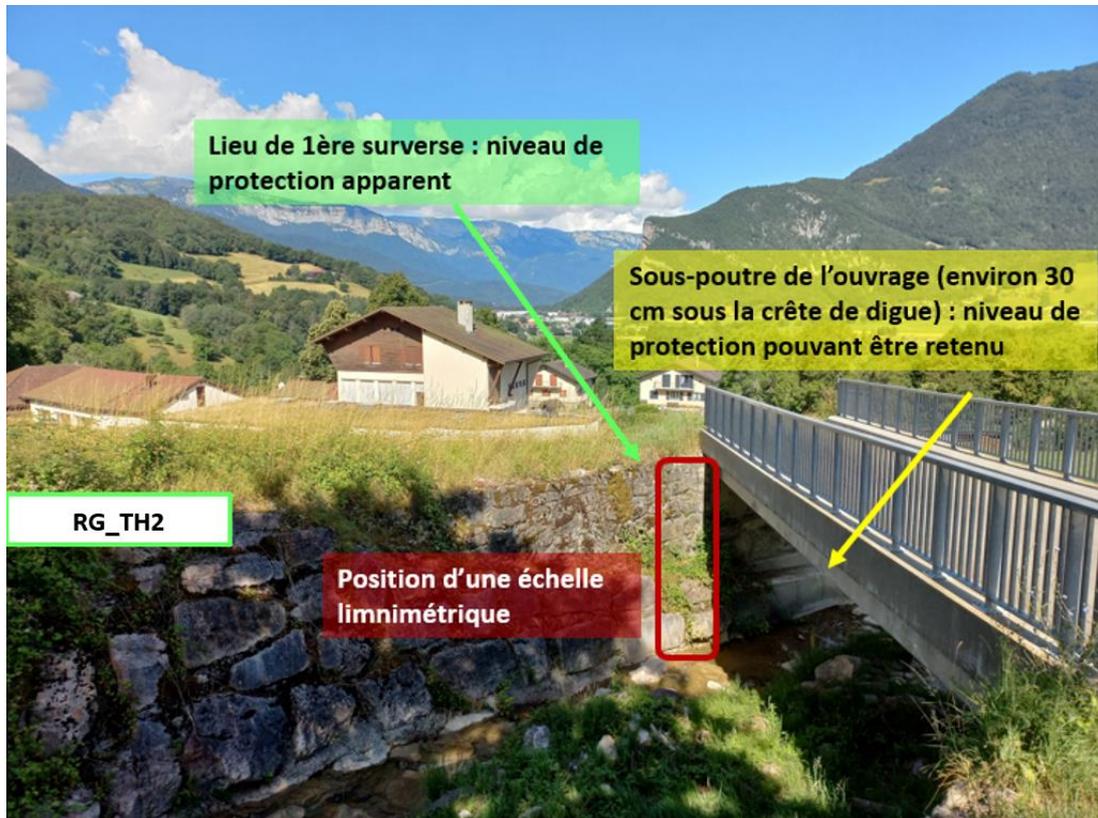


Figure 13 : vue depuis la rive droite du lieu de référence n°1, positionnement schématique du niveau de protection à 563.5 mNGF

- Lieu de référence n°2 (1.5 m de revanche par rapport au niveau de crête de l'ouvrage RG_TH3, 2 m en aval du pont de la route départementale) : **551.1 mNGF**.

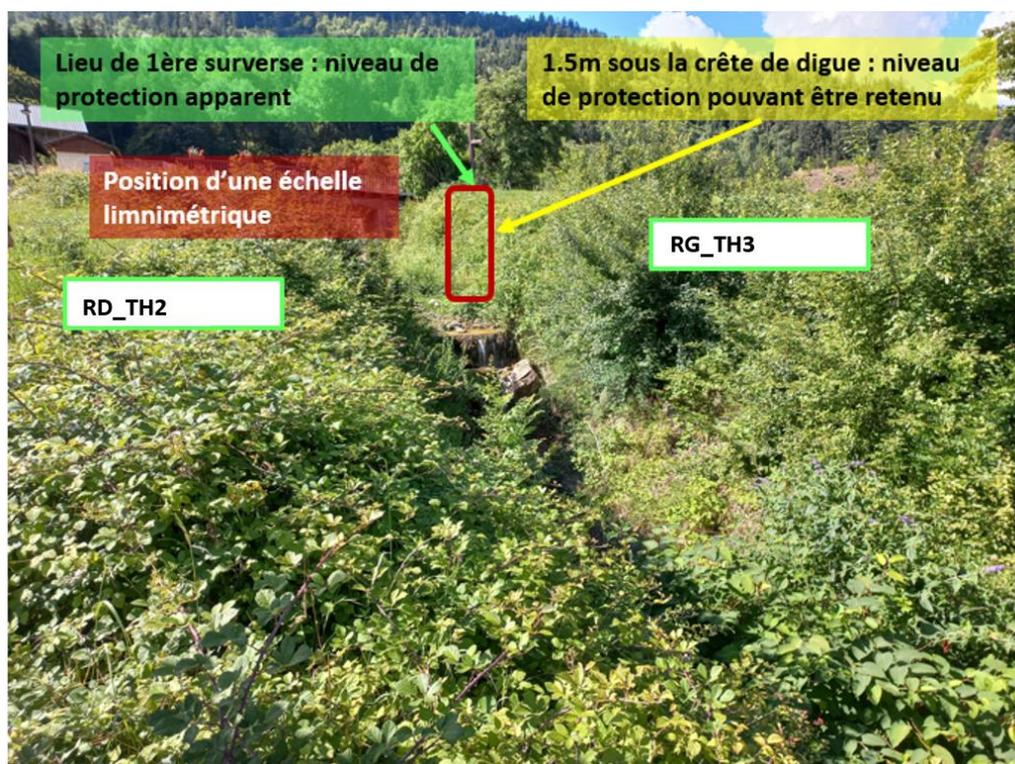


Figure 14 : vue depuis la rive droite du lieu de référence n°2 (2 m en aval de la face aval du pont départemental), positionnement du niveau de protection à 1.5m sous la crête de digue, soit 551.1 mNGF

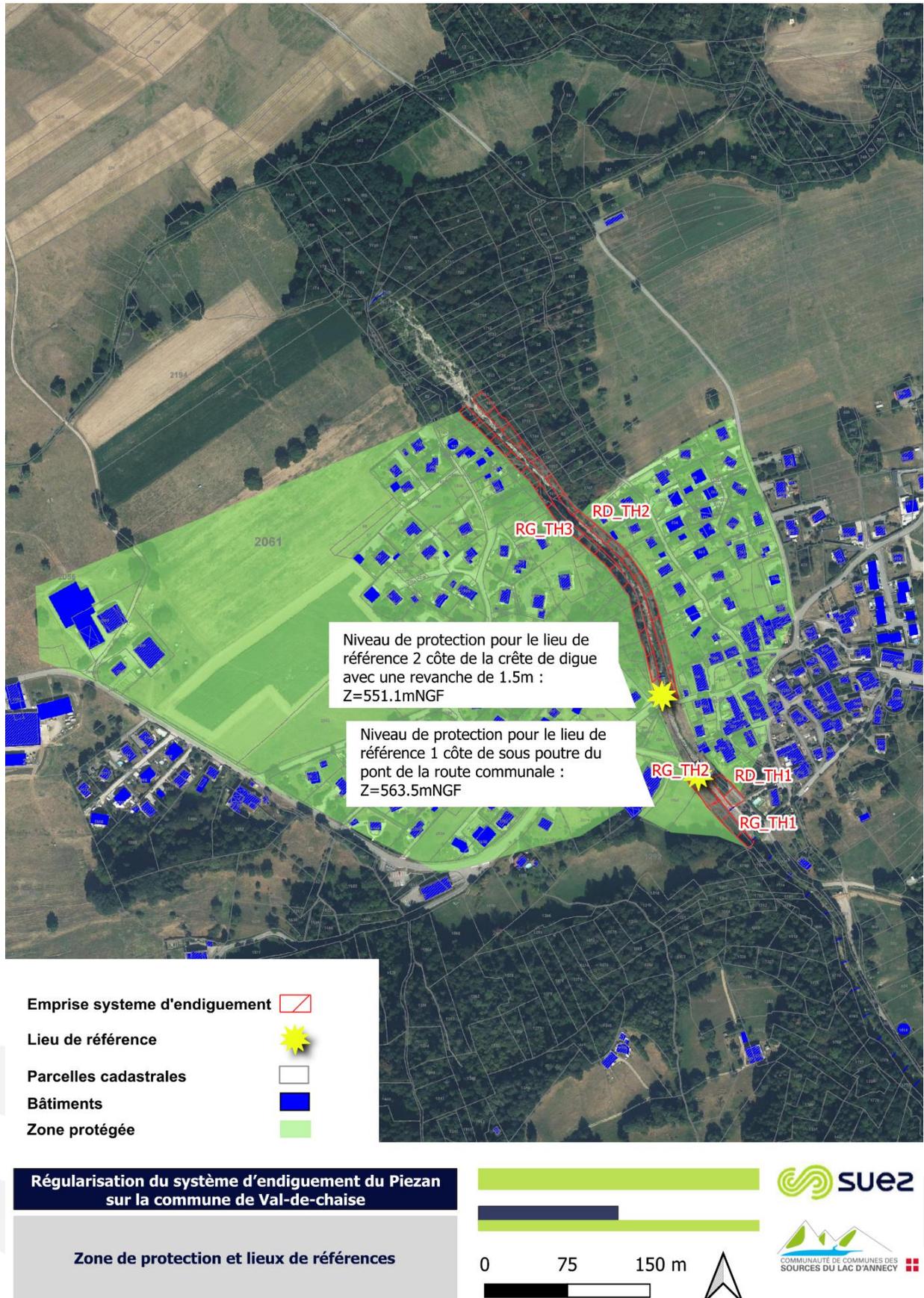


Figure 15 : Zones protégée et niveau d'eau de protection aux deux lieux de référence

3.1.3 Enjeux sur la zone protégée

Les populations qui résident et travaillent dans la zone protégée, en incluant notamment les populations saisonnières, sont estimées en prenant en compte :

- Les populations ayant leur résidence dans la zone protégée,
- Les salariés,
- Les campings,
- Les établissements scolaires,
- Les établissements sanitaires et sociaux,
- Certains ERP recensés dans les bases de données.

Le tableau ci-dessous indique, pour chaque type d'enjeu, les sources de données mobilisées et les hypothèses effectuées dans les calculs.

Tableau 12 : Sources de données mobilisées pour le dénombrement des enjeux

Type d'enjeu	Source de données	Hypothèses
Population résidente	Cartographie + donnée carroyage INSEE 200 mètres	Croisement entre le nombre d'habitant recensé et le contour des bâtiments de la zone protégée
Salariés	Cartographie + donnée Société.com	Croisement entre le nombre de salarié recensé pour chaque entreprise et le contour des lieux d'activités de la zone protégée
Campings	Visite terrain + cartographie	Absence
Etablissements scolaires (maternelle au lycée)	Annuaire de l'éducation + Visite de terrain + cartographie	Ecole sur la partie haute du cône de déjection en rive gauche
Etablissements scolaires (supérieur)	Visite terrain + cartographie	Absence
Etablissements sanitaires et sociaux	Visite terrain + cartographie	Absence
Equipements culturels, touristiques et de loisirs, et autres ERP	Visite terrain + cartographie	Capacité d'accueil des établissements
Population circulant sur les axes structurants	Cartographie	Route départementale et communale traverse le torrent, hypothèse de présence sur ces axes aux abords du torrent pendant l'évènement

Dans cette zone protégée se trouve la population maximale suivante :

Tableau 13: Population estimée dans la zone protégée

	Nombre de personnes maximal
Population en résidence principale	211
Population en résidence secondaire	0
Salariés	5
Etablissement scolaire	47
Equipements culturels, touristiques et de loisirs, et autres ERP	0

	Nombre de personnes maximal
Etablissements importants pour la gestion de crise	0
Population circulant sur les axes structurants	5
Total général arrondi	270

Il est à noter que la zone protégée du système d'endiguement ne concerne pas d'établissements participant à la gestion de crise (casernes de pompiers, gendarmerie, commissariat, etc.), ni d'établissement sensible en termes de risques pour l'environnement (Site SEVESO, ICPE etc...)

3.1.4 Zone protégée et limites administratives du CCSLA

La figure ci-dessous représente la zone protégée du Piésan par rapport à l'emprise de la Communauté de Commune.

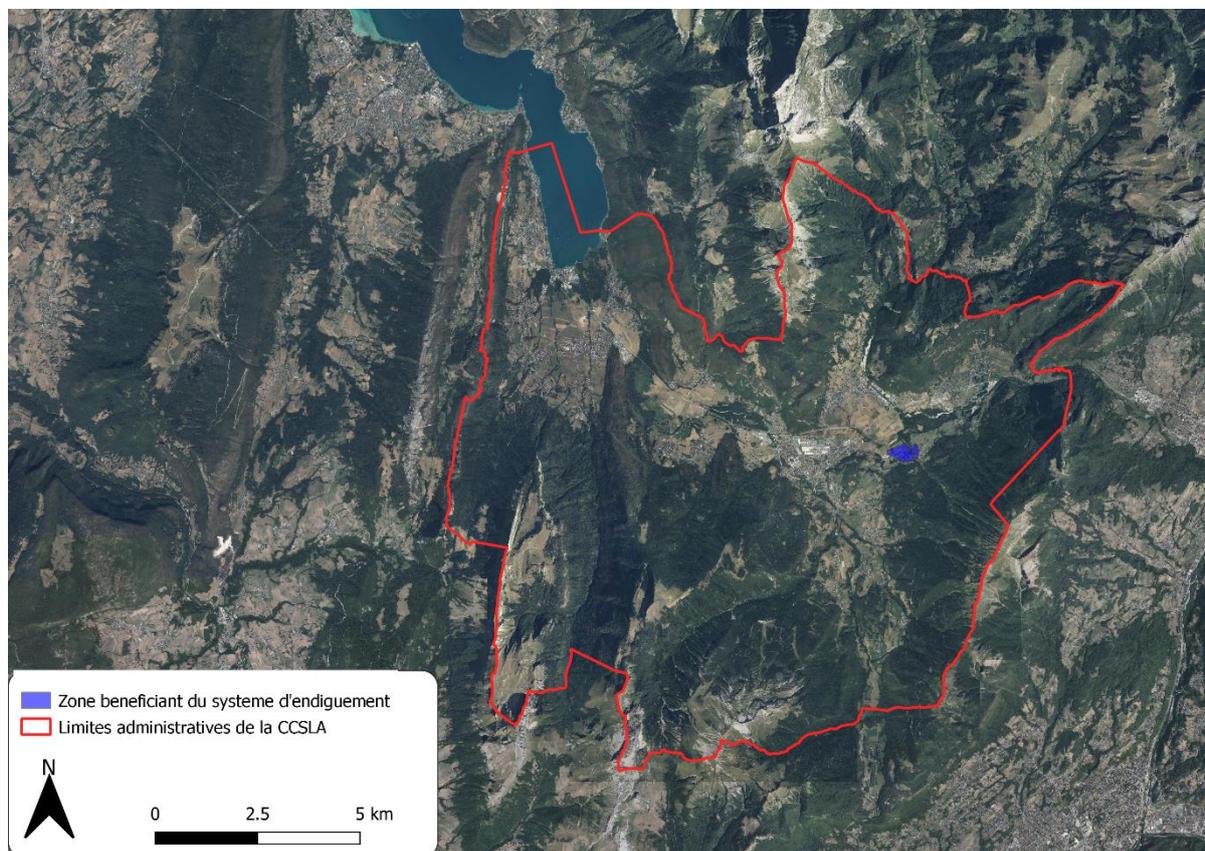


Figure 16 : Limites administratives du CCSLA

La carte ci-dessous localise la zone d'étude à l'échelle de la commune de Val-de-Chaise.

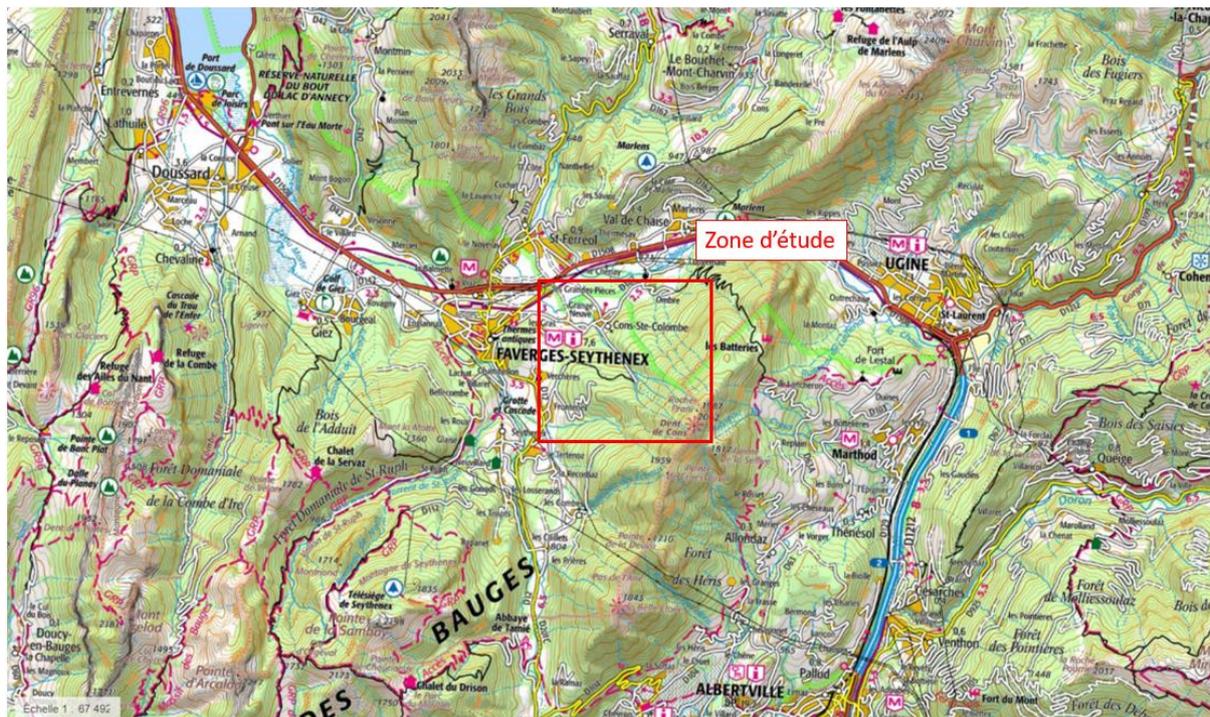


Figure 17 : Localisation de la zone d'étude du Piésan (source : Géoportail IGN)

3.1.5 Communes concernées par la zone protégée

La zone protégée concerne uniquement la commune de **Val-de-Chaise** (74210).

3.1.6 Autres communes qui relèvent de l'autorité compétente pour la prévention des inondations

Les autres communes qui relèvent de l'autorité du CCSLA pour la prévention des risques inondations sont :

- Chevaline,
- Doussard,
- Faverges-Seythenex,
- Giez,
- Lathuille,
- Saint-Ferréol.

3.2 Description des conditions naturelles pouvant conduire à des crues

3.2.1 Description des facteurs naturels déterminant les risques torrentiels

L'étude porte uniquement sur le bassin versant du Piésan pour lequel le système d'endiguement est conçu. Le tracé de ce torrent est positionné sur la figure suivante :

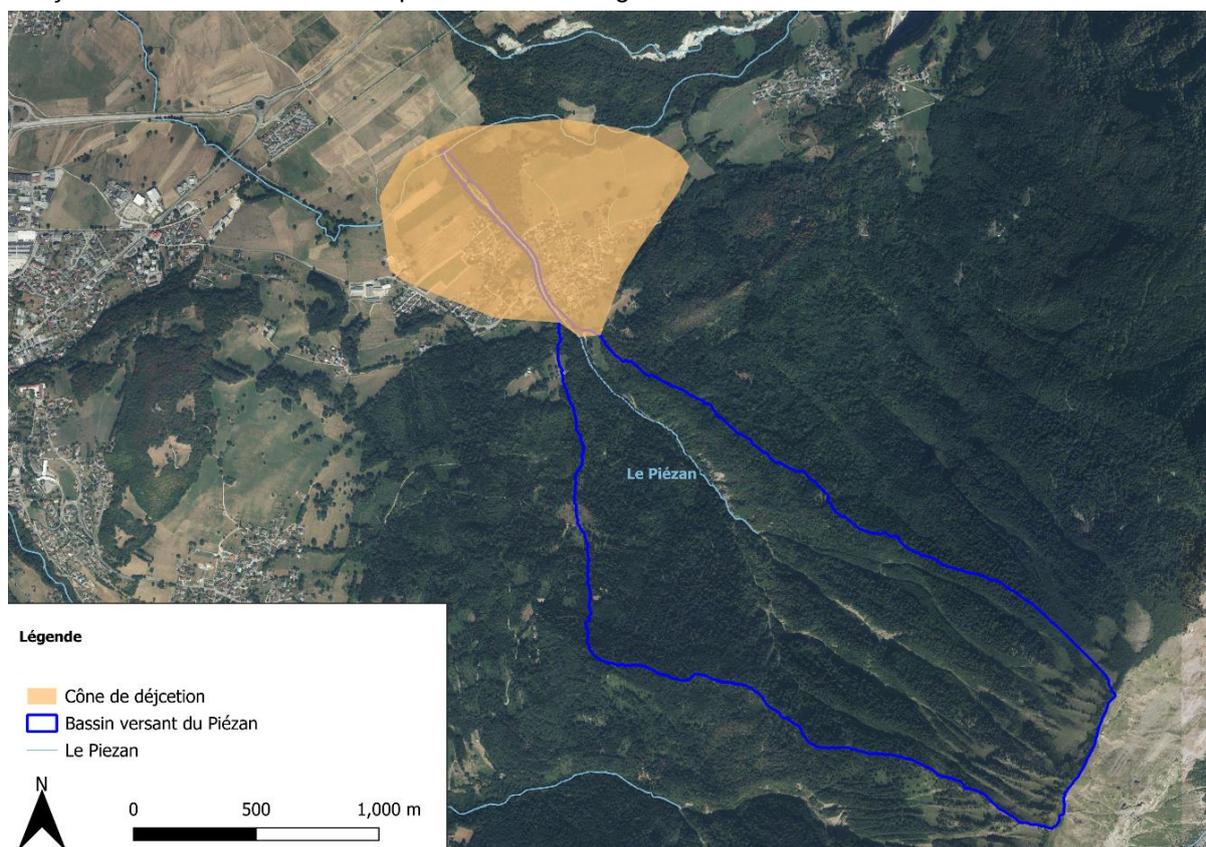


Figure 18 : Localisation du cours d'eau / torrent

Le torrent du Piésan possède un bassin versant torrentiel susceptible de produire des crues avec les caractéristiques suivantes :

Tableau 14 : Caractéristiques généraux du bassin versant du Piésan

Surface du bassin versant (sommet de cône)	2.4 km ²
Altitude maximale	2060 m (Dent de cons)
Altitude de l'exutoire	485 m
Z50	960 m
Longueur du plus long chemin hydraulique	3780 m
Pente moyenne du Piésan	11%

De plus, le bassin versant présente des spécificités supplémentaires :

- Un caractère soudain et imprévisible,
- Une forte charge solide (pouvant varier d'un épisode à l'autre) qui peut conduire à des évolutions morphologiques importantes du lit (engravement ou au contraire affouillement, érosions latérales...),
- La présence de flottants issus du bassin versant à forte couverture forestière.

L'analyse des crues historiques est essentielle dans la détermination des phénomènes torrentiels à étudier et ensuite l'analyse du comportement torrentiel pour ces phénomènes, les paragraphes suivants présentent de manière générale les phénomènes de laves torrentielles et de charriage.

Ce type de crues, spécifiques aux torrents à fortes pentes, induit des sollicitations particulières aux ouvrages :

- Risque d'érosion externe (mécanisme de rupture le plus fréquent)
- Risque d'affouillement en pied de berge par incision du lit et déstabilisation de l'ouvrage en surplomb de berge
- Risque d'engravement partiel ou complet de la section d'écoulement pouvant conduire à la surverse d'un ouvrage

La faible mise en charge hydraulique des ouvrages (caractère rapide de la crue) permet d'écarter tout risque d'érosion interne.

Le chapitre 4 vient déterminer de manière plus précise les aléas à étudier dans la présente étude.

La morphologie, ainsi que l'historique des crues, indiquent que la plupart des événements se seraient manifestés sous forme de **laves torrentielles** pour le Piésan, même si des apports solides par charriage peuvent également avoir lieu (torrent à fonctionnement mixte).

Dans le contexte local, avec l'historique connu des crues, les crues de charriage du Piésan sont des phénomènes de moindre ampleur, que l'on peut associer à des épisodes courants à peu fréquents, alors que les laves torrentielles couvrent toutes les gammes de fréquence de retour.

Les laves torrentielles représentent les phénomènes à cibler dans le cadre de l'étude de dangers ; elles induisent probablement les plus fortes sollicitations sur ces digues.

L'occurrence de crues s'accompagnant de phénomènes de charriage n'est évidemment pas à exclure, mais ces événements ne correspondent probablement pas aux situations les plus dommageables (du point de vue de leur ampleur) pour les enjeux directement menacés.

Bien en aval des enjeux du cône de déjection, le Biel (alimenté par une prise d'eau dans la Chaise) n'a aucune capacité de reprise des matériaux pouvant être apportés par le Piésan.

Les laves torrentielles restent les crues susceptibles d'apporter les plus gros volumes de matériaux sur le secteur d'étude, la crue de 2014 en étant un bon exemple (bien que la nature du transport solide ait probablement été mixte). La lave a transité jusqu'à la plage de dépôt sans débordement au niveau du cône de déjection, bien que le niveau de crête des ouvrages ait été atteint ponctuellement au niveau de la digue de l'école (en lien avec la présence du seuil n°5 aujourd'hui arasé) ainsi que plus en aval au droit des ouvrages RD2 et RG3.



Figure 19 : Dépôt de flottants et de matériaux jusqu'au niveau de crête de l'ouvrage de la digue de l'école
au droit de l'implantation du seuil n°5 (Source : RTM)



Figure 20 : Dépôt de flottants sur le tronçon aval en amont de la plage dépôt après la crue de septembre
2014 (Source : RTM)

3.2.2 Références scientifiques permettant de décrire ces facteurs et leur évolution prévisible

La présente étude de danger s'appuie sur des études hydrologique et hydraulique dont les conclusions sont présentées dans le paragraphe 4 du document B de la présente EDD.

Les principales études existantes exploitées sont l'Etude de bassin versant du torrent du Piésan [8], réalisée en 2014 ainsi que l'EDD [7] datant de 2019, toutes deux produites par le service RTM/ONF.

Réalisés pour le compte de l'État dans le cadre de la gestion des ouvrages domaniaux RTM présents sur le bassin versant, ces documents incluent une étude détaillée du torrent comprenant :

- Un état des lieux du bassin versant, des ouvrages et des enjeux,
- Une caractérisation de l'aléa torrentiel à travers une étude des événements historiques, une analyse hydraulique,
- Un diagnostic des ouvrages domaniaux visant à statuer sur l'efficacité des ouvrages existants,
- Des propositions de gestion et d'aménagement.

Le comportement des laves a été appréhendé sur la base de plusieurs sources, notamment les travaux de Coussot [4] ou encore les nombreux documents du RTM/ONF [12], [13], [14].

La riche bibliographie utilisée, que ce soient les références scientifiques, les études locales ou les rapports de constatation des événements récents, est donnée au début du présent rapport.

3.2.3 Données historiques essentielles expliquant l'analyse de ces facteurs

Une analyse de l'historique des crues présentée dans le corps de l'étude a permis de mettre en évidence des informations sur la fréquence et l'intensité des crues, leur mode de formation et leur conséquence en termes de risques.

Les crues majeures de 1937, 2010, 2014 ont constitué une source riche d'enseignements sur le type d'évènement ainsi que leur propagation sur le cône de déjection.

L'historique complet des crues est donné au paragraphe 4.1.2.

3.2.4 Caractéristiques des fondations des ouvrages

Plusieurs types de formations superficielles masquent le substratum sur le territoire de la commune :

- Les moraines wurmiennes et post-wurmiennes sont déposées en placage sur les basses pentes des versants et les fonds de vallées ;
- Les éboulis couvrent localement le versant et les pieds de pentes ;
- Des colluvions, correspondant à l'altération du substratum, peuvent localement couvrir les versants ;
- Les alluvions fluviales récentes sont accumulées dans le fond de la vallée de La Chaise.

Les ouvrages de protection sont assis sur des matériaux torrentiels et généralement uniquement constitués de ces matériaux apportés par les crues du Piésan (Jz – cône de déjection vif). Il n'y a pas de problème particulier sur les fondations pour ce type de matériaux.

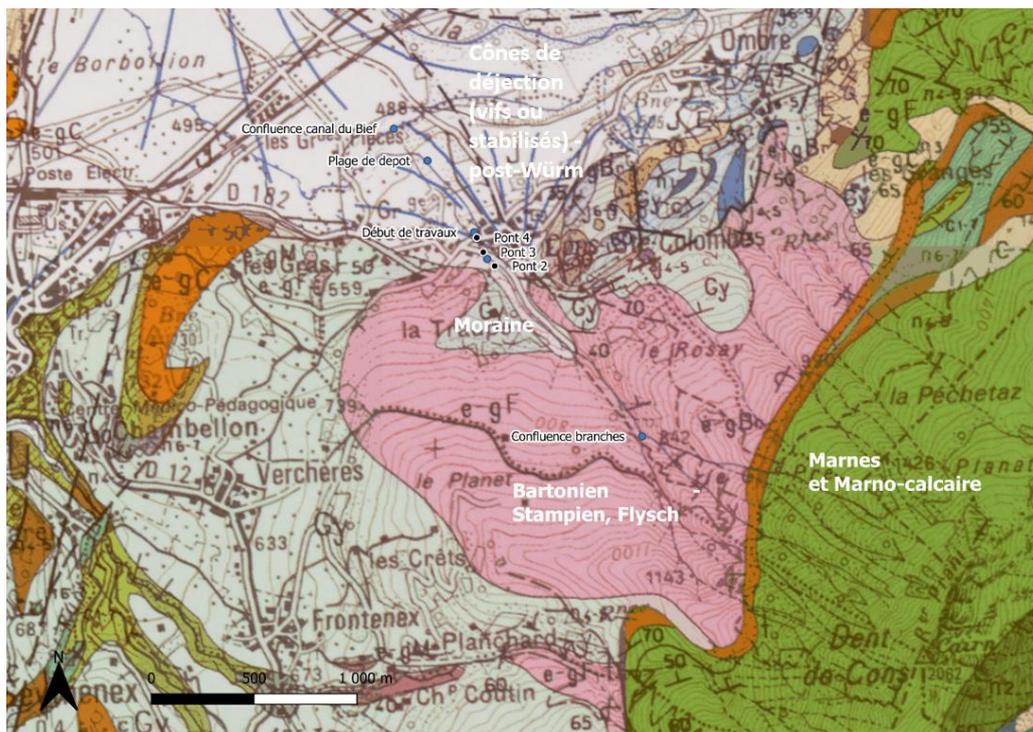


Figure 21 : Extrait de carte géologique 1 : 50 000ème (InfoTerre, BRGM), position des digues entre le pont 2 et la plage de dépôt sur le cône de déjection

3.2.5 Classe sismique

Le décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 a défini un zonage sismique de la France allant de la zone 1 (sismicité très faible) à la zone 5 (sismicité forte).

Les ouvrages Val-de-Chaise se trouvent en **zone de sismicité moyenne (zone 4)**.



Figure 22 : Zonage sismique (Source : Data.gouv)

3.2.6 Les embâcles et les effets possibles

Le bassin versant du Piésan possède un important taux de boisement (70 % selon le PPRN de Val-de-Chaise) ; il est courant de retrouver lors de différentes crues des flottants au sein du lit du torrent.



Figure 23 : Flottants déposés au sein du lit du Piésan (Sources : (a) Visite de terrain, (b) EDD 2019)

Le transport des flottants lors des crues augmente les risques de débordements principalement au niveau des ouvrages de franchissement, en lien avec les risques d'accrochage des tabliers des ponts par les bois (dans le cadre de l'analyse cela a conduit à considérer des revanches au droit des ponts).

L'effet des embâcles sur le système d'endiguement est étudié par le biais du scénario de défaillance.

3.2.7 Avalanches et effets possibles

La commune de Val de Chaise est soumise à un aléa important vis-à-vis des avalanches. Plus localement au niveau du bassin versant du torrent du Piésan, un couloir d'avalanche est identifié. Cette zone est concernée par un aléa important.

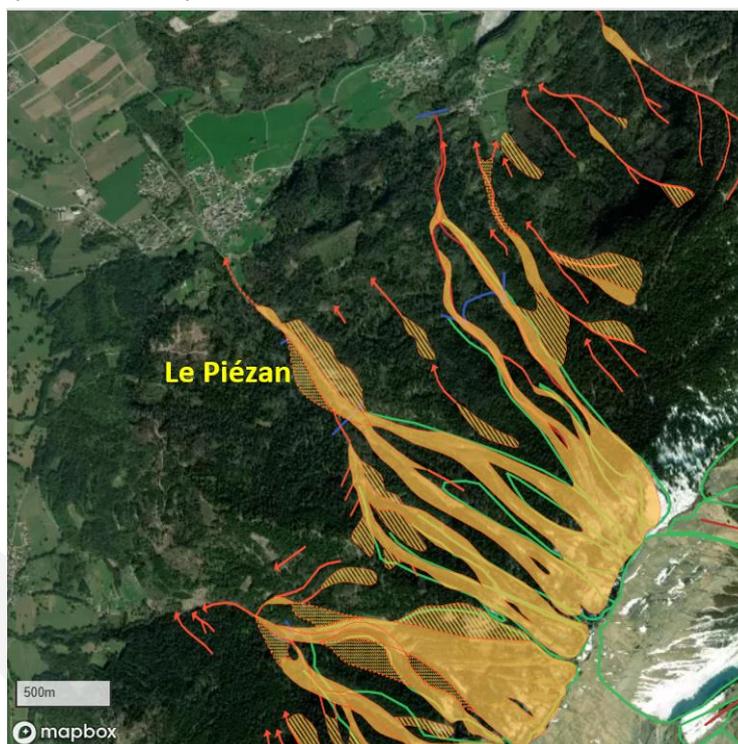


Figure 24 : Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche et recensement Enquête Permanente sur les Avalanches dans la zone du Piésan

L'EDD du RTM/ONF de 2019 [7] indique les éléments suivants :

« L'activité avalancheuse du bassin versant est régulière entre les mois de février et avril. Ces couloirs ont fait l'objet d'un suivi EPA sur la période 1905-2013. Selon cet inventaire et sur cette longue période d'observation, les avalanches les plus courantes atteignent la côte 1000 m, les plus basses descendent jusqu'à 750 m, soit au niveau des premiers ouvrages de correction torrentielle. L'activité avalancheuse est régulière entre les mois de février et avril. Les culots d'avalanche sont généralement chargés de bois de toutes tailles, de pierres et de gros blocs comme l'illustre la photographie ci-dessous (avalanche de 2010). L'activité avalancheuse apparaît comme un phénomène érosif, mais aussi comme un vecteur important de transport des matériaux accumulés dans les différentes branches.



Figure 25 : Avalanche descendue jusqu'au seuil n°40 en mars 2006 - à droite, gros blocs retrouvés dans les dépôts au printemps (source : EDD RTM)

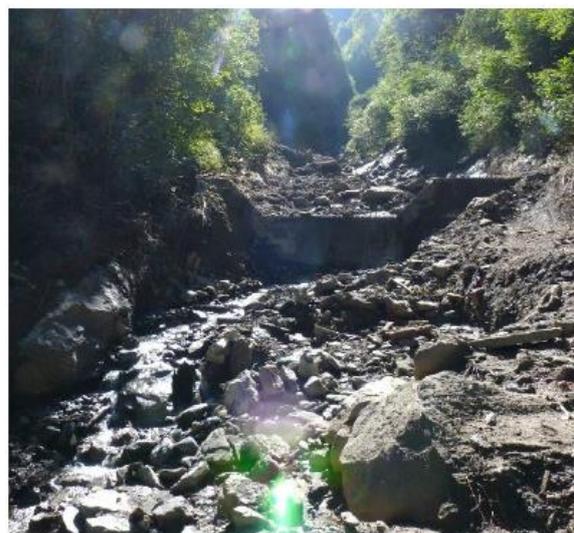
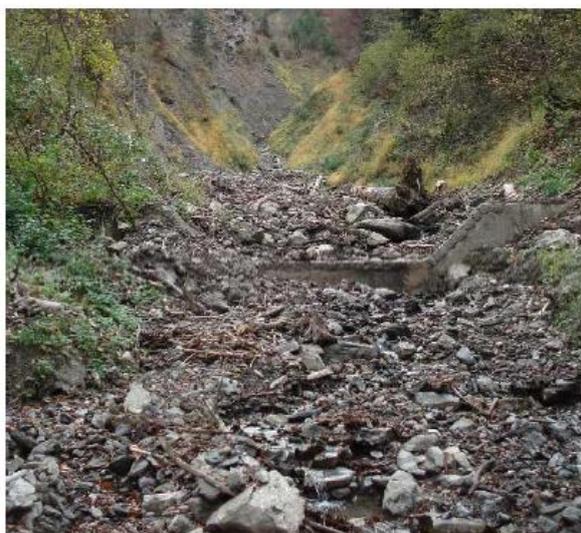


Figure 26 : illustration de la respiration du lit dans la partie supérieure de la correction torrentielle (DDRTM – barrage 40) , source EDD RTM

Le tronçon situé entre la confluence avec les différentes branches et les premiers ouvrages de corrections (entrée dans le vallon, entre 700 et 750 m) constitue une zone de régulation du transport solide. C'est sur ce secteur que se déposent les matériaux issus des avalanches ou des crues modérées pour être repris lors des crues plus importantes du Piésan. »

Les dépôts d'avalanche n'atteignent pas les linéaires endigués du Piésan ; aussi cet aléa ne sera pas étudié spécifiquement dans la présente EDD.

3.2.8 Retrait et gonflement des argiles

La commune de Val de Chaise est soumise à un risque faible à modéré vis-à-vis de l'aléa retrait et gonflement des argiles.

Le bassin versant du Piésan sur la majorité de sa surface est soumis à un aléa faible, une partie réduite est quant à elle en aléa modérée (notamment sur la partie amont du bassin versant)

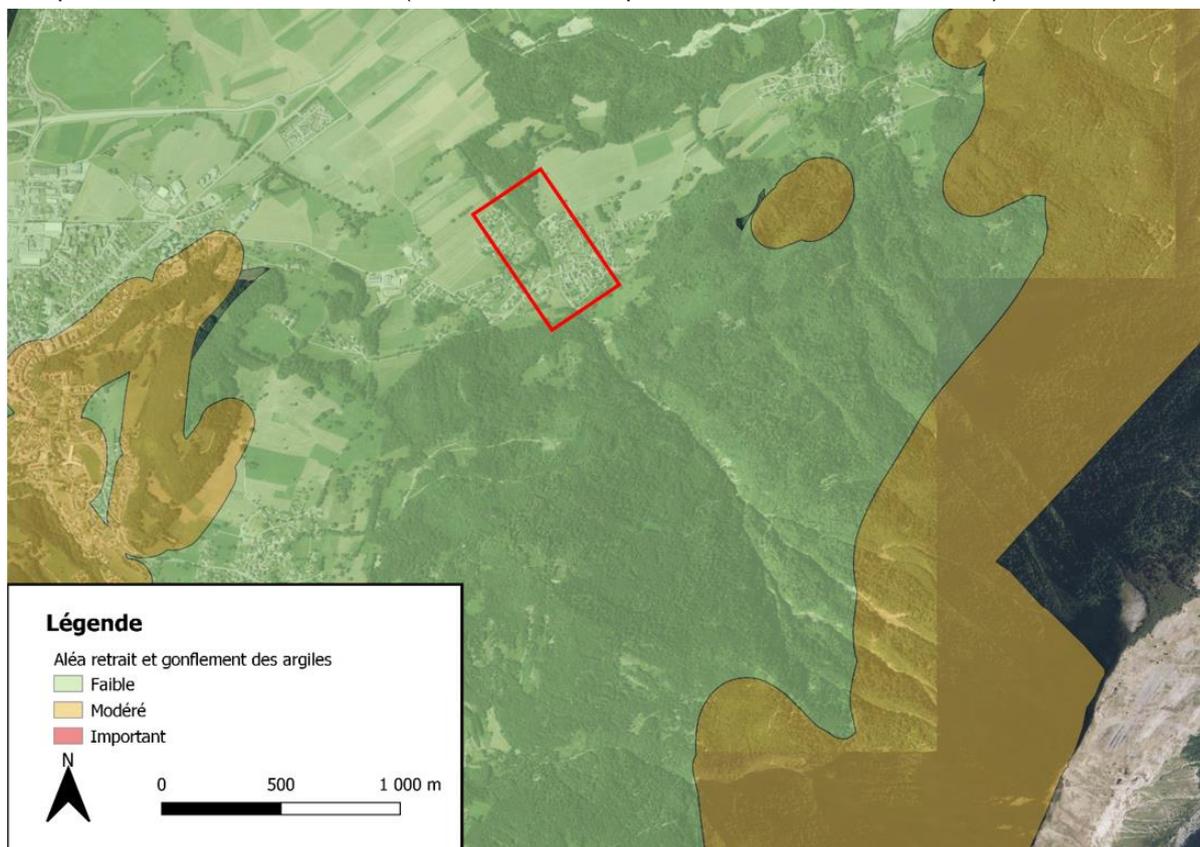


Figure 27 : Cartographie des aléas de retrait et gonflement des argiles sur le bassin versant du torrent du Piésan (source : géorisques)

Les ouvrages étant sur le cône de déjection du Piésan, ce risque est écarté au droit du système d'endiguement.

3.2.9 Cavités souterraines et effondrements karstiques

Le site de Cons Sainte Colombe est classé à risque pour l'aléa et le sous aléas affaissement minier par la direction départementale de Haute-Savoie.

Toutefois, le système d'endiguement ne semble pas être concerné par ces zones ; cet aléa est donc écarté pour le reste de l'étude.

3.2.10 Mouvements de terrain (glissements)

Les descriptions et analyses suivantes sont issues du PPRN de 2019 de Val de Chaise [6] et de l'EDD du RTM/ONF [7] :

- **Glissement de terrain**

Au-dessous de 1200 m d'altitude, les terrains constitués de schistes marno-gréseux friables plus ou moins feuilletés sont sensibles à l'affouillement par les torrents, ce qui se traduit par un encaissement plus prononcé des torrents et de l'érosion de berges qui alimentent ces derniers. Ces affouillements génèrent le glissement des terrains situés à l'amont.



Figure 28 : glissements superficiels (source : EDD RTM [7])

- **Ravinements**

Le ravinement concerne la partie inférieure de la branche principale du Piésan, ainsi que celle du Nant Droit et du Perchet, avec une incision progressive de ravins dans les Flyschs. Ces ravins apportent des matériaux de granulométrie fine à grossière.



Figure 29 : Ravinement dans la branche principale du Piésan (vers 1200 m) (source : EDD RTM [7])

- **Chute de blocs**

Sur la commune, la partie sommitale de la Dent-de-Cons se caractérise par la présence d'affleurement ou de petits éperons rocheux pouvant générer la chute de blocs. Ces derniers peuvent être remobilisés au cours des avalanches pour venir alimenter les torrents. D'autres chutes de blocs se manifestent également dans les talwegs des torrents qui entaillent le versant.



Figure 30 : vue sur la gorge du Piésan, en aval de la réunion des différentes branches du réseau hydrographique, montrant les éboulements affectant les Flysch situés en rive droite (vue vers l'aval) (source : EDD RTM [7])

3.2.11 Sources d'agression anthropique

A proximité de la zone protégée et du système d'endiguement, il n'y a pas de site type SEVESO, d'installations nucléaires de base (INB) ou de modes de transport de marchandises dangereuses, Barrage/retenue d'eau et site ICPE à proximité du site (Source : géorisques.gouv.fr).

Le système d'endiguement n'est pas soumis à un risque d'agression anthropique.

3.3 Description des éléments composant le système de protection et fonctions hydrauliques associées

3.3.1 Identification du cours d'eau

Le Piésan est un torrent situé en Haute-Savoie descendant de la Dent de Cons. Il génère des crues qui s'accompagnent d'un transport solide très important.

Historiquement, les crues du torrent venaient librement se déposer et s'étaler sur le cône de déjection. Ce dernier conflue avec le Biel en rive droite qui possède une section hydraulique réduite avant de rejoindre la Chaise.

Il détient un bassin de 2.4km² au niveau de l'Apex du cône de déjection.

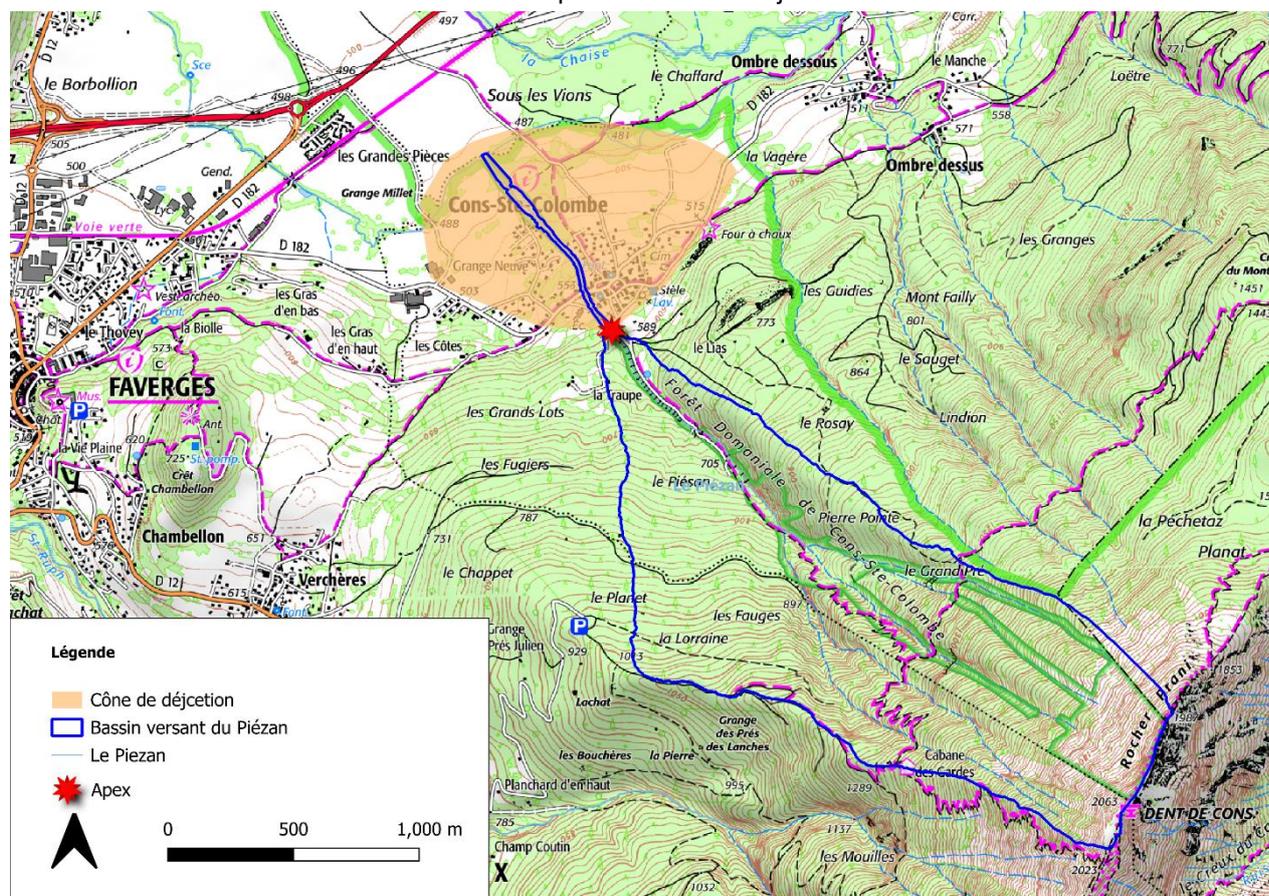


Figure 31 : Localisation du bassin versant du Piésan

3.3.2 Localisation des éléments constituant le système d'endiguement

Les ouvrages du système d'endiguement sont situés sur la commune de **Val-de-Chaise (74210)**.

Le système d'endiguement se situe en bordure du torrent du Piésan. Ce torrent se situe sur la commune de Val de Chaise (74), à l'extrémité Nord-Est du massif des Bauges (Sud du département de la Haute Savoie). Il s'agit d'un affluent de la Chaise qui est, elle-même, un affluent de l'Arly.

Les digues sont constituées des produits de curage issus des charriages et laves, en particulier celle de 1938. Les matériaux de curages, peu à peu entreposés sur les berges, ont conduit à une situation d'endiguement en surélevant la crête des berges par rapport au terrain naturel. Même si, à l'origine, ces cordons de matériaux ne sont pas des ouvrages construits dans les règles de l'art, ils jouent

aujourd'hui un rôle de protection contre les risques torrentiels (inondation, érosion et dépôt de matériaux) et sont considérés comme des ouvrages constituant un système d'endiguement.

Le chenal en amont du pont départemental (pont 4) a été aménagé depuis plusieurs décennies par le service RTM/ONF, en particulier ces dernières années, ce qui n'est pas le cas du chenal en aval du pont départemental. Le projet de travaux intègre la réfection du chenal en aval du pont départemental.

Le système d'endiguement est composé de 5 tronçons homogènes tous répartis sur le cône de déjection du Piésan. Les tronçons sont dénommés par rive et numérotés d'amont en aval (par exemple : RG_TH1) :

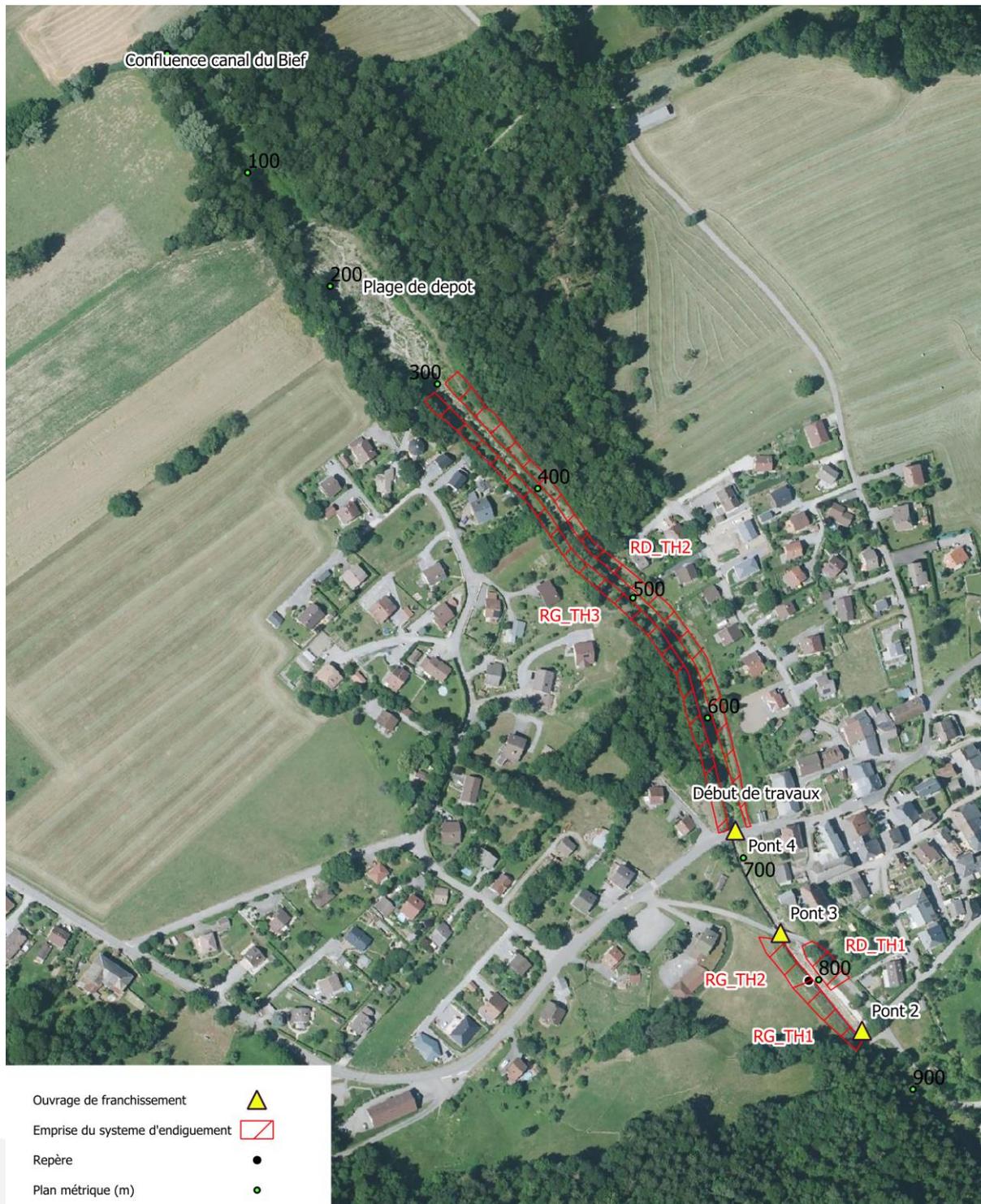
Tableau 15 : Caractéristiques des tronçons de digues constitutifs du système d'endiguement

Dénomination du tronçon	Etat actuel ou projet	Longueur des tronçons
RG_TH1	Etat actuel	55 m
RG_TH2	Etat actuel	35 m
RD_TH1	Etat actuel	35 m
RD_TH2	Etat projet	375 m
RG_TH3	Etat projet	375 m

En plus des digues précédemment présentées, on notera la présence des ouvrages associés suivants liés au caractère torrentiel du Piésan, ouvrages qui permettent le bon fonctionnement le système d'endiguement :

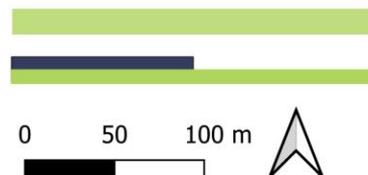
- Plusieurs seuils de correction torrentielle qui permettent de stabiliser le profil en long et de limiter l'incision tout en régulant l'apport de matériaux en aval,
- Radiers en enrochement aux droits des tronçons de digues qui permettent de limiter l'affouillement en pied des ouvrages,
- Enrochement de berges qui limite les risques d'érosions.

La figure suivante situe les tronçons le long du torrent :



Régularisation du système d'endiguement du Piézan sur la commune de Val-de-Chaise

Localisation du système d'endiguement du Piézan



 suez



Figure 32 : Localisation des éléments du système d'endiguement

3.3.3 Présentation des différents éléments du système d'endiguement

Globalement, les ouvrages sont anciens ; leur configuration géométrique globale date des travaux menés suite à la crue de 1938.

Leur pérennisation par des travaux de correction torrentielle (enrochement, seuil) a été réalisée par le RTM/ONF ces dernières décennies, en amont du pont départemental.

Ce n'est pas le cas en aval où des travaux sont prévus dans le cadre du présent projet.

Les autres caractéristiques à citer sont les suivantes :

- Les ouvrages sont en remblais, constitués des matériaux du torrent, et localement protégés par des enrochements ;
- Un certain nombre d'ouvrages associés jalonne le linéaire :
 - Deux seuils jalonnent le linéaire, en aval du ponceau agricole (pont 2) puis en aval du pont communal (pont 3) ;
 - La protection de berge en enrochements, en rive droite en amont de l'ouvrage RD_TH1 ;
 - Le radier et les protections de berges entre le pont communal (pont 3) et le pont départemental (pont 4) ;
- Les ouvrages constitutifs sont circulables en crête, excepté l'ouvrage « digue de l'école » et ses 2 tronçons référencés RG_TH1 et RG_TH2 ;
- Les ouvrages sont tous facilement accessibles sans barrière ou autre élément infranchissable.

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques des ouvrages constitutifs du système d'endiguement.

Tableau 16 : Principales caractéristiques des tronçons de digues constitutifs du système d'endiguement

Dénomination du tronçon	Etat considéré	Type d'ouvrage	Date de construction	Protection berge du torrent au droit de l'ouvrage	Accès	Longueur du tronçon	Hauteur par rapport au terrain en arrière de l'ouvrage	Largeur en crête
RG_TH1	Etat actuel	Remblai enherbé, présence d'enrochement bétonné en parement côté rivière	Au cours du XXeme siècle, derniers travaux datant de 2018	Radier et berge en enrochement bétonné	Accès par route communal ou ponceau agricole et circulaire en pied	55 m	1 à 2 m	≈5m
RG_TH2		Remblai enherbé, présence d'enrochement libre en parement côté rivière		Radier bétonné et berge en enrochement libre	Accès par route communal ou ponceau agricole et circulaire en en pied	35 m	1 à 2 m	≈5m
RD_TH1		Remblai enherbé avec route en crête, présence d'enrochement libre en parement côté rivière		Radier bétonné et berge en enrochement libre	Accès par route communal	35 m	1 à 2 m	≈7m
RD_TH2	Etat projet	Remblai enherbé, présence d'enrochement libre en parement côté rivière sur le 1/3 inférieur de la berge	Au cours du XXeme siècle, travaux prévus 2025	Radier en enrochement et sur les 1/3 inférieurs de la berge (talus 3/2 côté rivière)	Accès par la route départementale et circulaire en crête	375 m	0.5 à 1.5 m	≈3m
RG_TH3		Remblai enherbé, présence d'enrochement bétonné en parement côté rivière sur les 2/3 de la berge		Radier en enrochement et sur les 1/3 inférieurs de la berge (talus 3/2 côté rivière)	Accès par la route départementale et circulaire en crête	350 m	1 à 1.5 m	≈3m

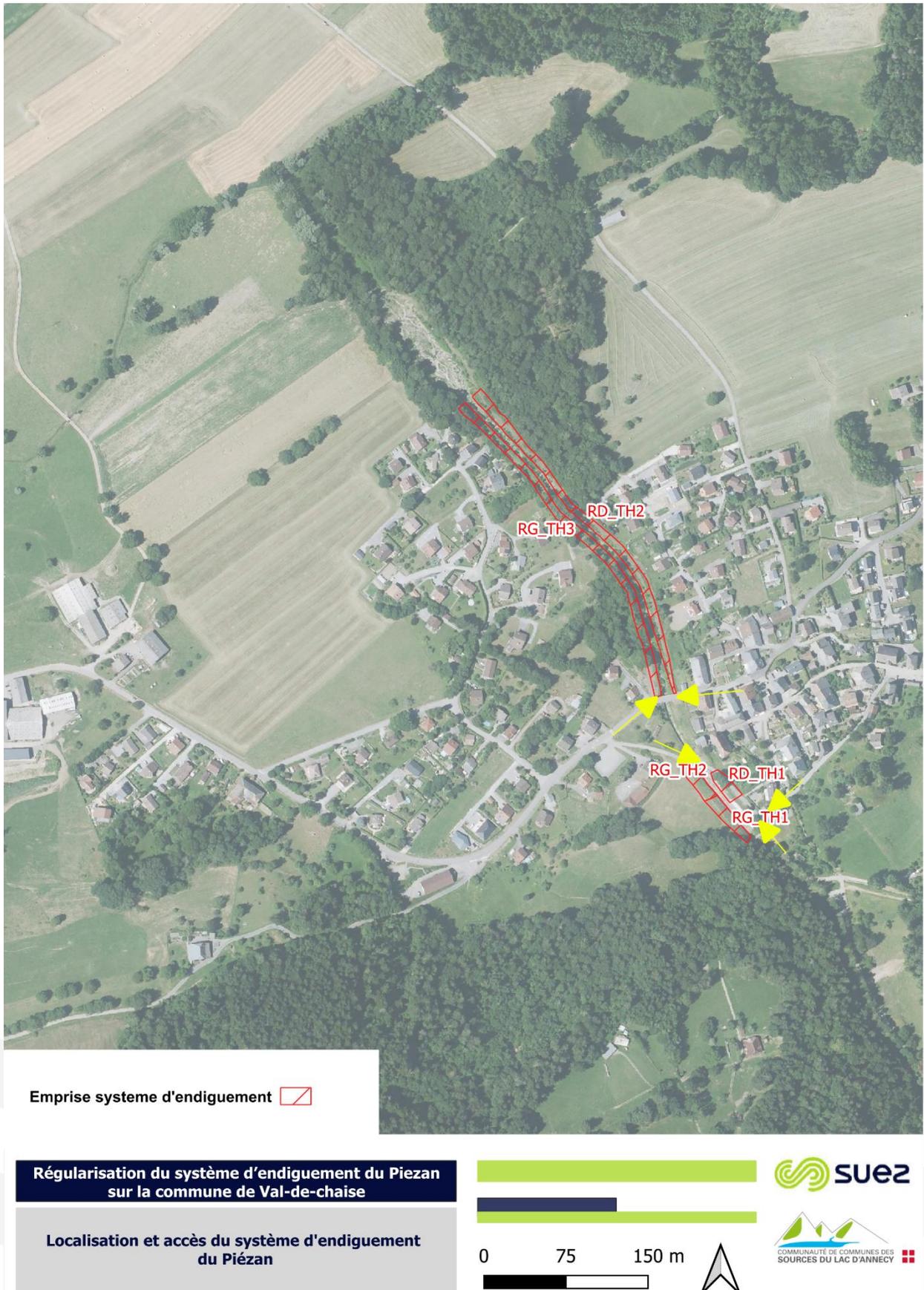


Figure 33 : Cartographie des accès aux ouvrages composants le système d'endiguement

3.3.4 Cartographie, profils en travers et profil en long avec mention du niveau de protection

Les données topographiques utilisées dans le cadre de l'étude sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Différentes sources de données topographiques à disposition

Dénomination	Date	Précisions/Remarques
Lever LIDAR 2012	2012	MNT au pas de 1 m Ne représente pas l'évolution du lit suite à la crue de 2014 et aux travaux réalisés depuis. Le cône de déjection n'est couvert que sur une bande de 100 m de part et d'autre du torrent.
Lever LIDAR 2018	2018	MNT au pas de 1 m N'intègre pas les derniers travaux réalisés en 2018 au niveau du tronçon 1 en rive gauche (suppression du seuil n°5 et terrassement digue)
Lever LIDAR 2021	2021	MNT au pas de 0.3 m Intègre les derniers travaux réalisés au niveau du tronçon de la digue de l'école. L'emprise du lever est relativement restreinte (lit du torrent et parfois berges)
Plan Projet des travaux 2024	2024	Représente l'état projeté de la partie aval du torrent, entre le pont de la route départementale et l'entrée de la plage de dépôt.

La construction du modèle numérique de terrain s'est alors établie de la sorte :

- Le lit du torrent est représenté par le Lidar de 2021 ;
- Le Lidar de 2012 complète et encadre l'emprise de celui de 2021 ;
- Afin d'avoir une plus grande surface couverte, le MNT de 2018 a été rajouté pour représenter le cône de déjection au-delà des emprises couvertes par les deux précédents Lidar ;
- Le plan du projet des travaux a finalement été intégré afin de pouvoir représenter l'état projeté à l'issue des travaux.

Les niveaux sont relativement comparables sur les zones où le torrent n'a pas eu de modification majeure entre les sources de données qui se recoupent (le torrent étant relativement bien aménagé avec un lit plutôt fixé).

Les données topographiques, et les plans projet, sont de qualités suffisantes pour l'exploitation qui en est faite dans le cadre de cette étude.

Ces sources présentent une bonne résolution nécessaire pour la présente étude et représentent donc une topographie du lit du Piésan fidèle à la topographie à la date de dépôt de l'EDD.

Le choix de retenir cette configuration (combinaison de MNT et plan travaux) topographique est une hypothèse de la présente EDD.

Le profil en long des ouvrages, avec crête, pied aval, niveau de fond du cours d'eau au droit de la digue, sous-poutre d'ouvrages traversants, et niveau de protection au lieu de référence est présenté ci-après.

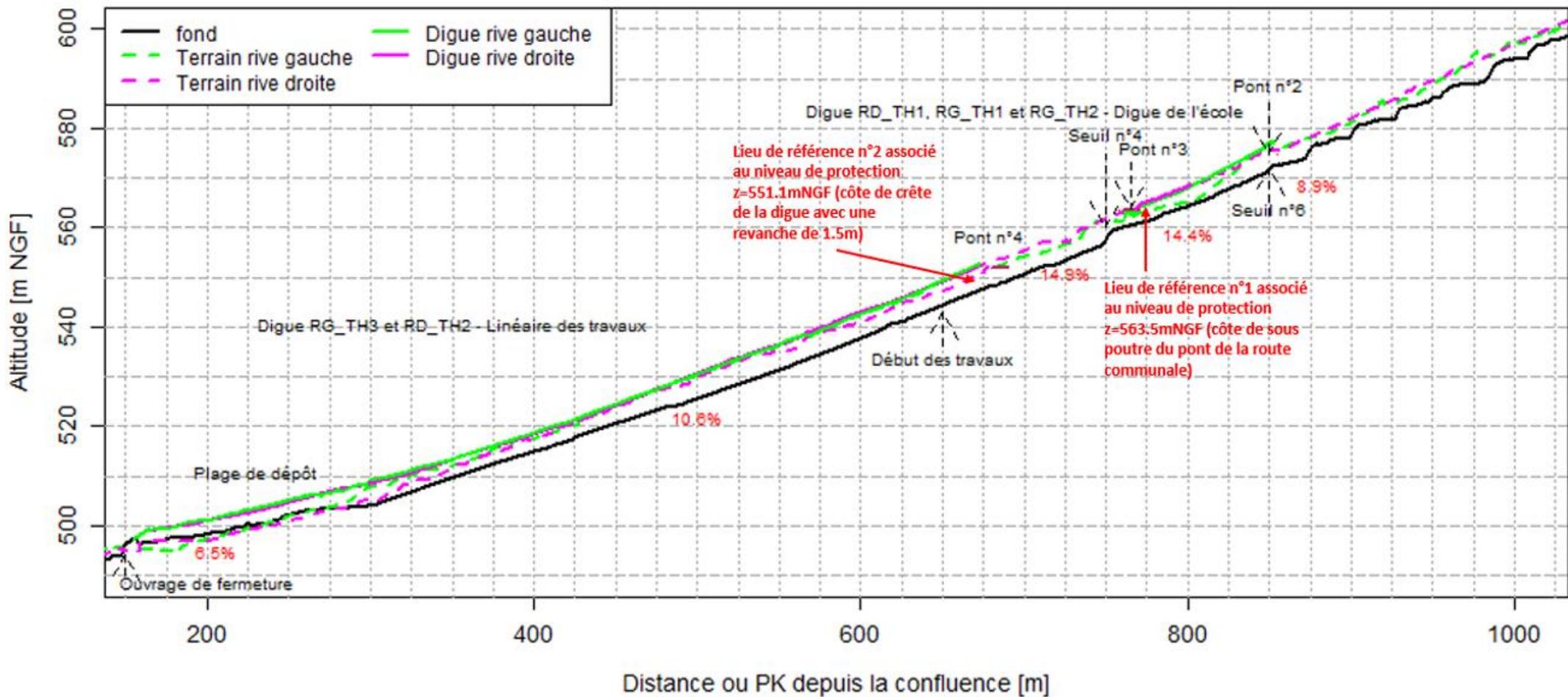


Figure 34 : Profil en long du système d'endiguement avec les lieux de référence

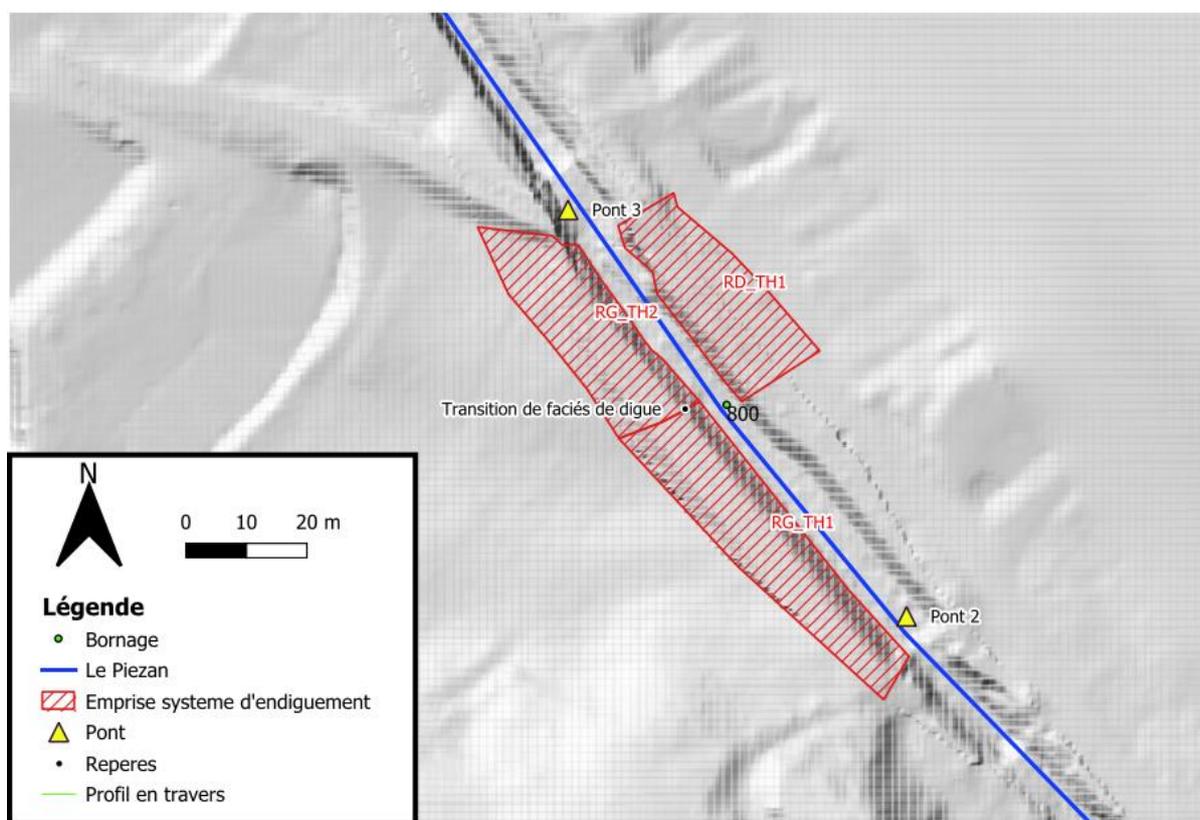
3.3.5 Description des ouvrages constitutifs du système d'endiguement

3.3.5.1 RG_TH1 et RG_TH2

Ce dispositif d'endiguement est implanté au niveau de l'apex du cône de déjection entre les PK 850 et 760. Il est encadré en amont par le ponceau agricole et en aval par le pont de la route communale.

Il est découpé en deux tronçons homogènes :

- Le premier tronçon a été l'objet de travaux en 2018, dans lesquels un enrochement bétonné a été installé sur la berge en rive gauche.
- Le second possède une configuration similaire à la différence de la protection de berge qui est en enrochement libre et date de 2012.



Le profil en long permet d'identifier que le terrain en rive gauche au droit de la digue est relativement bas vis-à-vis du lit du torrent, notamment entre les PK 810 à 750. De ce fait, la digue est assez vite mise en charge lors des crues.

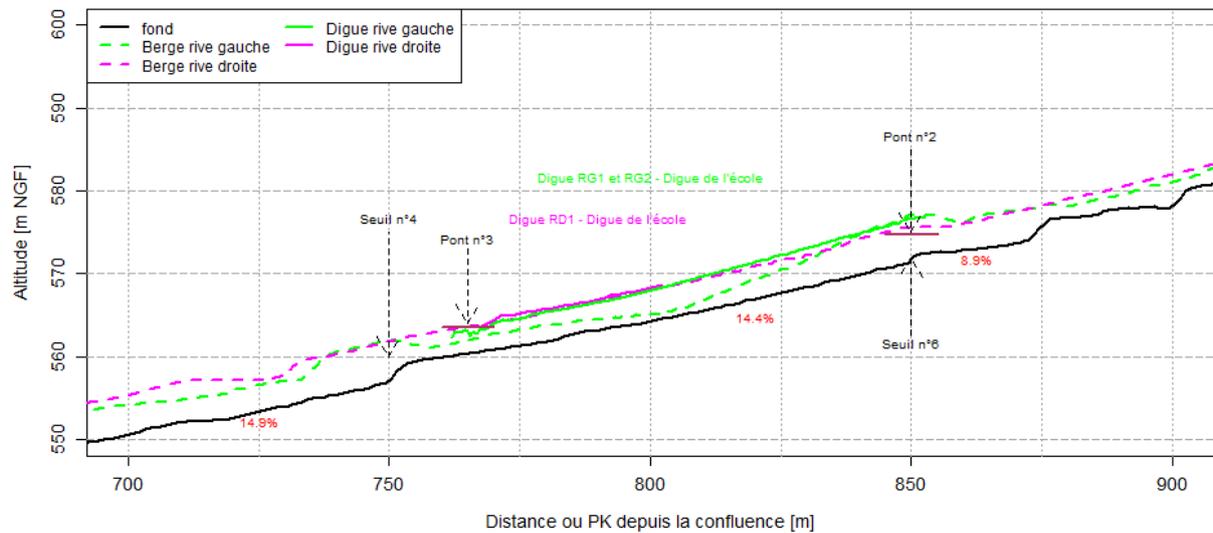


Figure 36 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH1 et RG_TH2

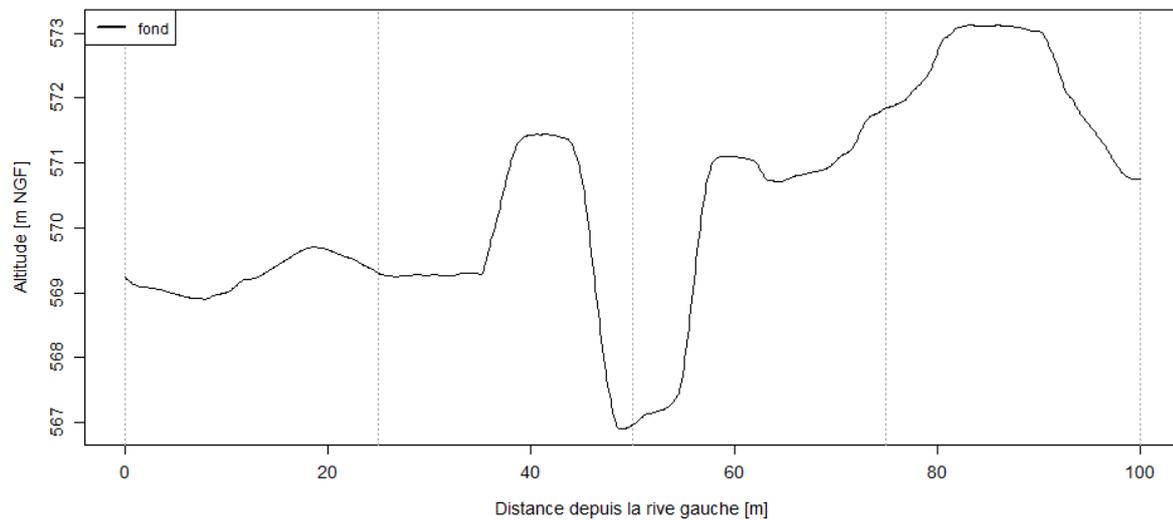


Figure 37 : Profil en travers du tronçon RG_TH1 au niveau du PK820

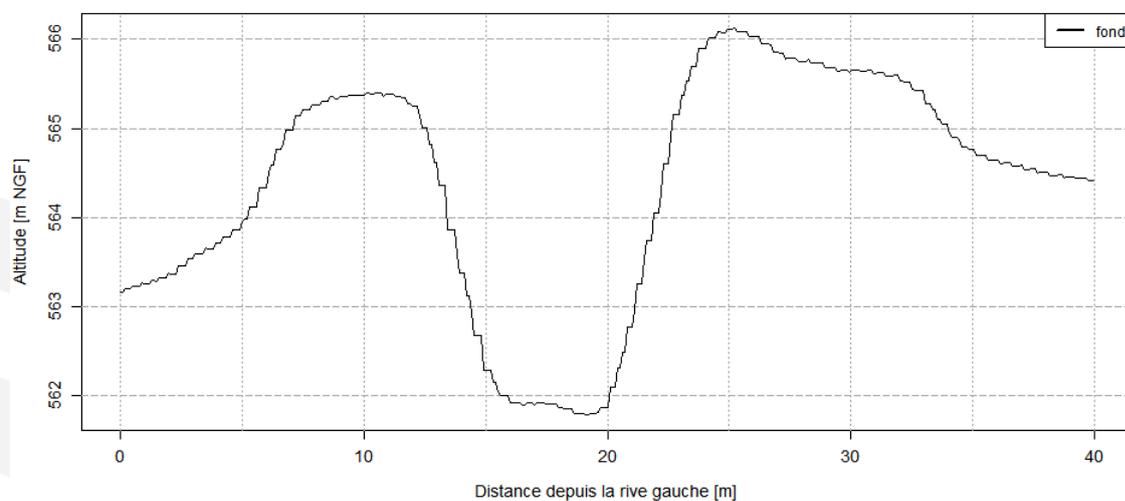


Figure 38 : Profil en travers du tronçon RG_TH2 au niveau du PK780

Tableau 18 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH1

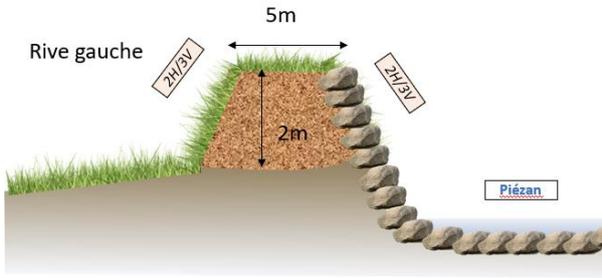
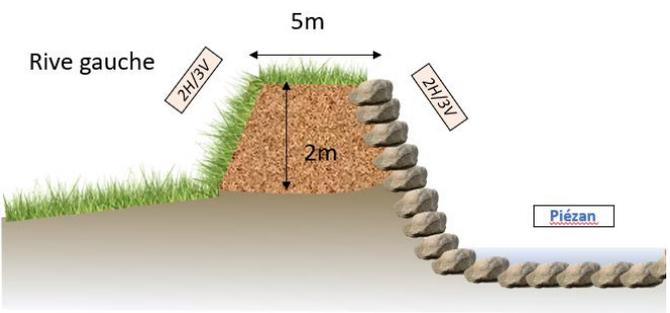
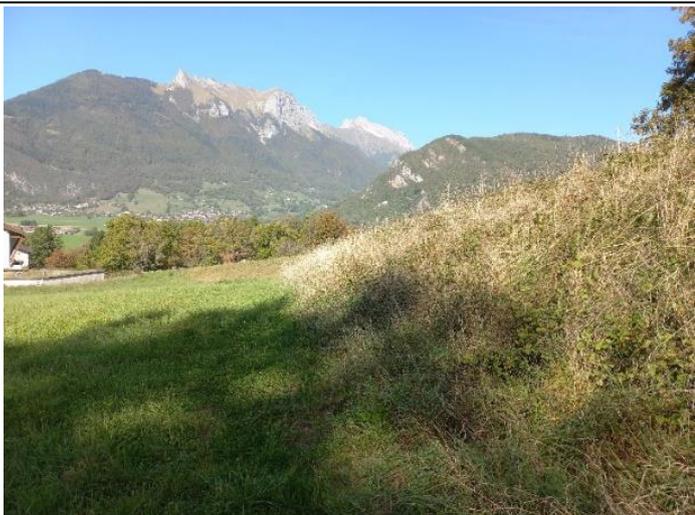
RG_TH1		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 2 m</p> <p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Largeur en base : 12 m</p> <p>PM : 850-800</p> <p>Longueur : 55 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochement bétonné.</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 2H/3V</p>	<p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau et lit mineur enrochement bétonné.</p> <p>Présence de tuyau</p> <p>Pente 2H/3V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piésan
		

Tableau 19 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH2

RG_TH2		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 2 m</p> <p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Largeur en base : 12 m</p> <p>PM : 800-760</p> <p>Longueur : 35 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochement libre.</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 2H/3V</p>	<p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau en enrochement libre.</p> <p>Présence de végétation.</p> <p>Pente 2H/3V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

3.3.5.2 RD_TH1

Ce dispositif d'endiguement est implanté en rive droite entre les PK 800 et 760.

Cet ouvrage est probablement apparu avec la création de la route qui a généré une surélévation par rapport au terrain naturel au moment de son aménagement. Il est borné en aval par le pont de la route communale.

Ce tronçon possède une protection de berge qui est en enrochement libre et datant de 2012.

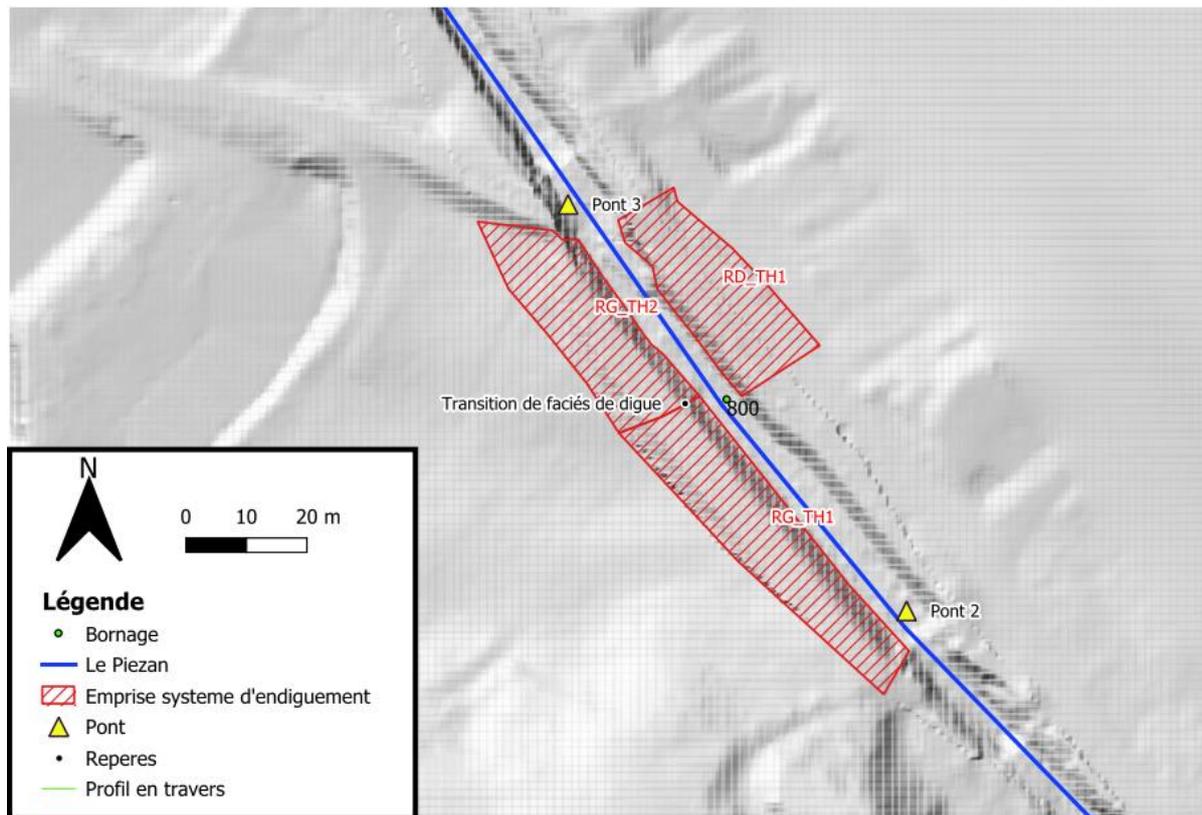


Figure 39 : Emprise du système d'endiguement au niveau du tronçon RD_TH1

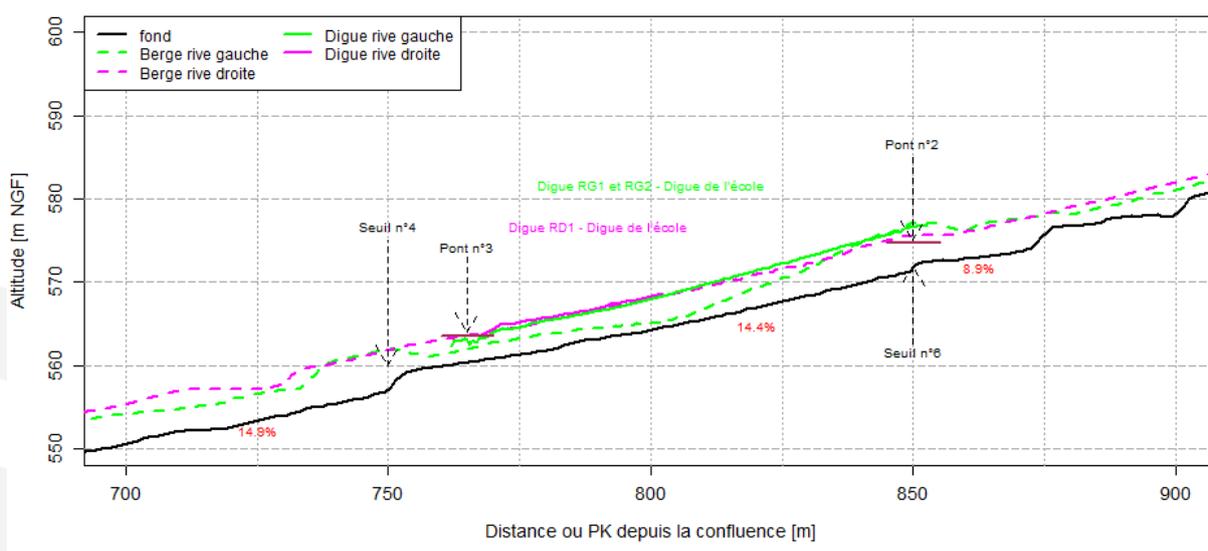


Figure 40 : Profil en long au droit du tronçon RD_TH1

Le profil permet de constater que l'ouvrage en rive droite se met vraisemblablement en charge après l'ouvrage en rive gauche (l'écart avec le terrain naturel semble plus limité)

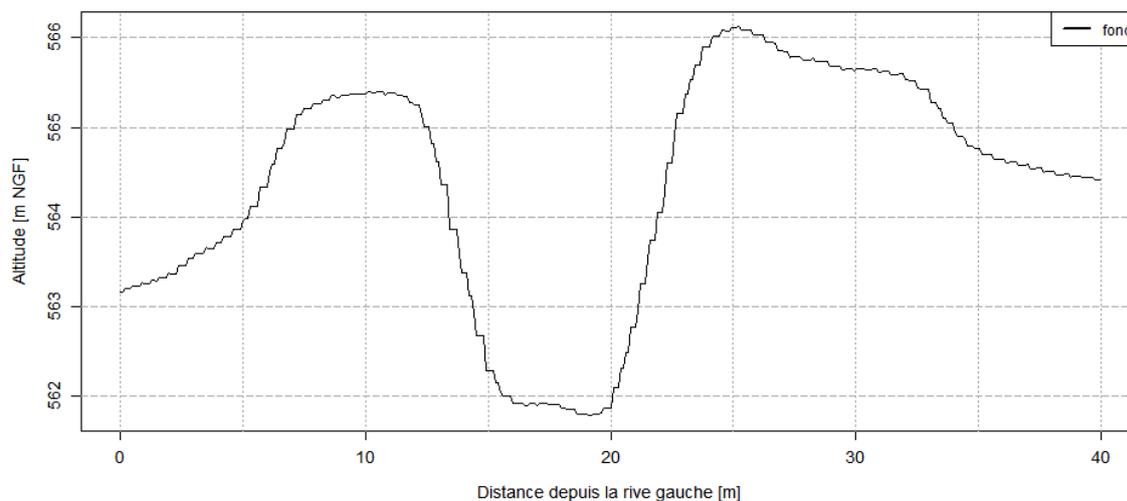
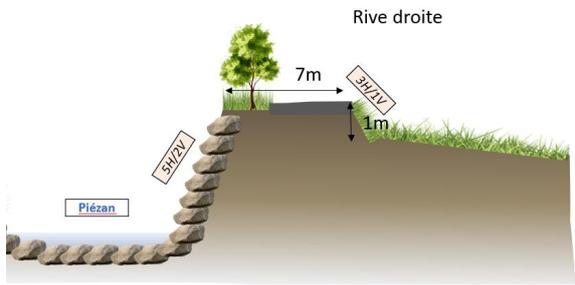


Figure 41 : Profil en travers du tronçon RD_TH1 au niveau du PK780

Le profil en travers permet de préciser les caractéristiques de l'ouvrages (qui sont par ailleurs repris dans le tableau suivant), l'ouvrage rive droite est très épais avec la présence de la chaussée en crête.

Tableau 20 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD-TH1

RD_TH1		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 m</p> <p>Largeur en crête : 7 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 800-765</p> <p>Longueur : 35 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochements libres</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 3H/1V</p>	<p>Largeur en crête : 7 m</p> <p>Présence de végétation et chaussée.</p>	<p>Berge du cours d'eau en enrochement libre.</p> <p>Présence de tuyau</p> <p>Pente 5H/2V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

3.3.5.3 RG_TH3 et RD_TH2

Sur cette partie, le système d'endiguement n'est protégé ni en fond ni en berge pas des enrochements. En outre, on observe de nombreuses anses d'érosions (cf. 5.1.3.4) en berges qui menacent l'intégrité de ces tronçons. Ces tronçons vont faire l'objet de travaux de confortement via une stabilisation des talus et du fond du lit par enrochement.

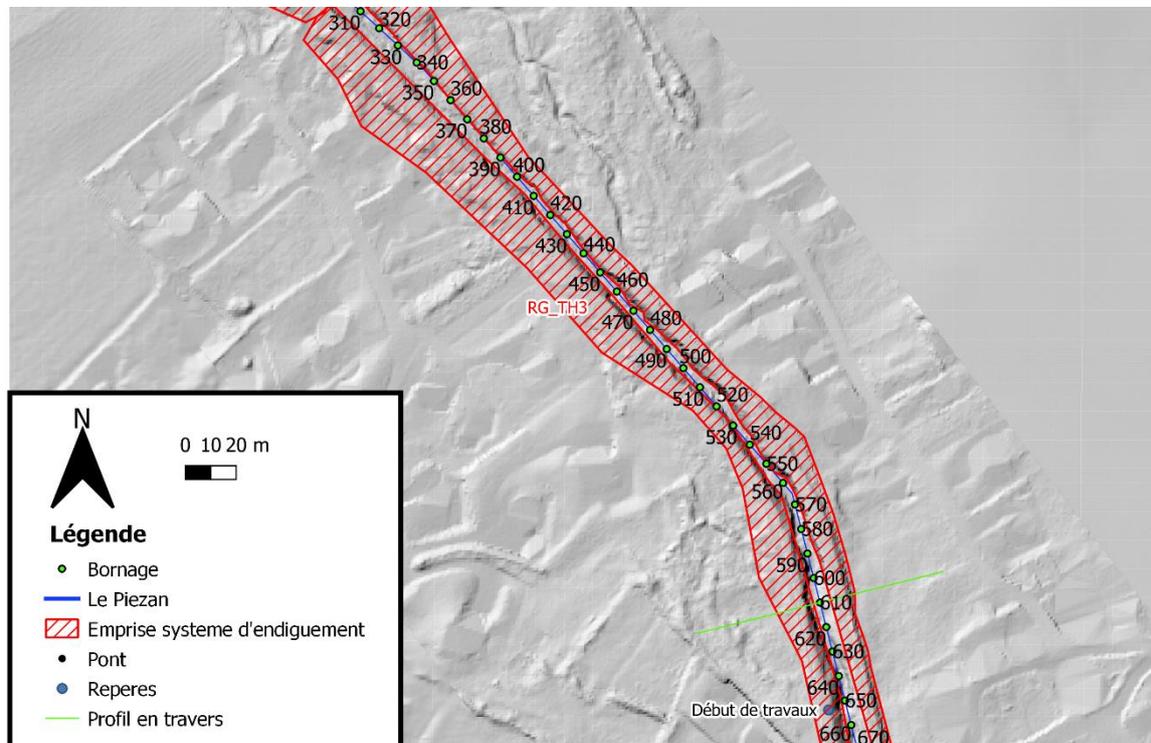


Figure 42 : Emprise du système d'endiguement au niveau des tronçon RG_TH3 et RD_TH2

Les profils complètent et confirment la description du faciès du torrent faite plus haut :

- Les berges du torrent sont hautes par rapport au fond du lit (tout du moins sur la première partie du tronçon ; en aval, on entrevoit l'influence de la plage de dépôt) ;
- On observe un raidissement des pentes des talus du torrent ;
- La largeur du lit semble rétrécir.

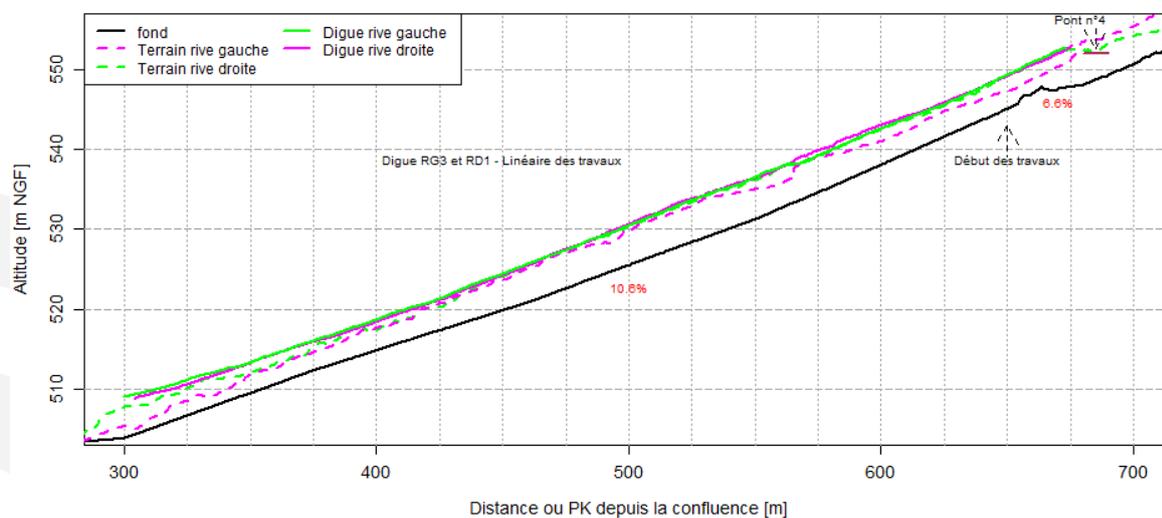


Figure 43 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH3 et RD_TH2

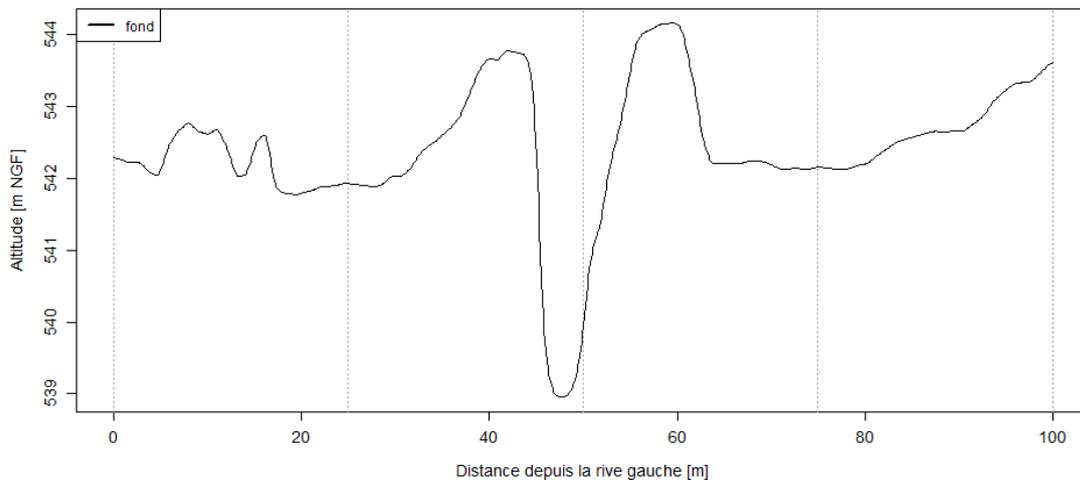


Figure 44 : Profil en travers des tronçons RG_TH3 et RD_TH2 au niveau du PK610

Toutes ces observations contribuent à dégrader et menacer l'endiguement sur ces tronçons. Les tableaux suivants reprennent les principales caractéristiques des digues RG_TH3 RD_TH2 :

Tableau 21 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH3

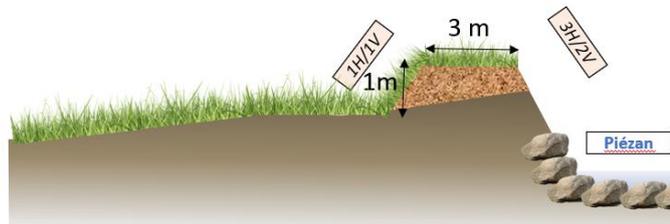
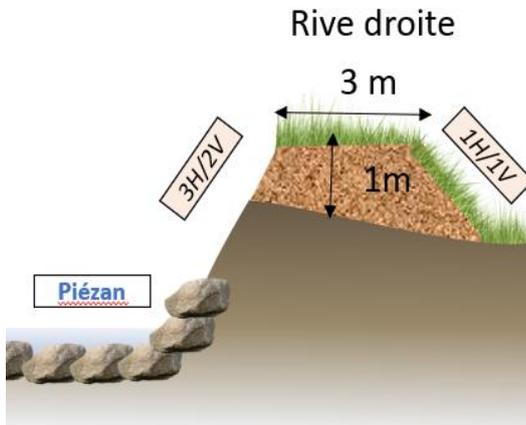
RG_TH3		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 1.5 m</p> <p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 650-300</p> <p>Longueur : 375 m</p>	Digue en levée.	<p>Rive gauche</p> 
Côté protégé	Crête	Côté rivière
Enherbé.	Largeur en crête : 3 m	Berge du cours d'eau naturelle.
Pente 1H/1V	Présence de végétation.	Pente 3H/2V
Photographie coté protégé		Photographie coté Piésan
		

Tableau 22 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH2

RD_TH2		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 1.5 m</p> <p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 650-300</p> <p>Longueur : 375 m</p>	Digue en levée.	 <p>Rive droite</p> <p>3 m</p> <p>1 m</p> <p>3H/2V</p> <p>1H/1V</p> <p>Piézan</p>
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 1H/1V</p>	<p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau naturelle.</p> <p>Présence de végétation.</p> <p>Pente 3H/2V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

3.3.6 Localisation et description des éventuels aménagements hydrauliques complétant le système d'endiguement

Aucun aménagement hydraulique complétant le système d'endiguement n'est présent sur le cône de déjection du Piézan.

3.4 Analyse du fonctionnement du système d'endiguement

3.4.1 Données historiques sur le comportement structurel

3.4.1.1 Données historiques sur les digues du Piésan

Il n'y a pas eu à notre connaissance de crue significative sur le Piésan depuis 2018 (la dernière crue significative datant de 2014), date à laquelle les derniers travaux ont eu lieu sur le tronçon du torrent concerné par le système d'endiguement.

L'évènement de 2014 a probablement vu se succéder plusieurs modes de transport (temporellement et spatialement) : des dépôts de laves ainsi que de charriage ont été observés. Une quantité importante de bois a été mobilisée pendant la crue et a transité jusqu'en aval du cône.

La succession des différents seuils en amont de l'apex du cône de déjection a retenu une quantité non négligeable de matériaux. Les ouvrages de franchissement n'ont pas été bloqués mis à part le ponceau agricole dont les gardes corps ont été endommagés et ont généré de légers débordements.

Les principales détériorations relevées se situent en aval du pont de route départementale : le chenal s'est enfoncé d'environ 2 mètres jusqu'à la plage de dépôt. Il est probable que des bois ont été transportés sur un front de lave particulièrement important, qui a dépassé le ponceau agricole puis encombré l'ensemble de la section du chenal en aval du pont départemental, comme en témoigne les dépôts de bois sur les berges sur les photos suivantes. Il est possible que l'incision du chenal se soit produite ensuite, avec des écoulements d'eaux plus claires, moins chargés en matériaux et bien plus érosifs.



Figure 45 : Photo post crue 2014 au niveau du chenal en amont de la plage de dépôt (haut de berge atteint et marqueur d'incision du fond du lit)

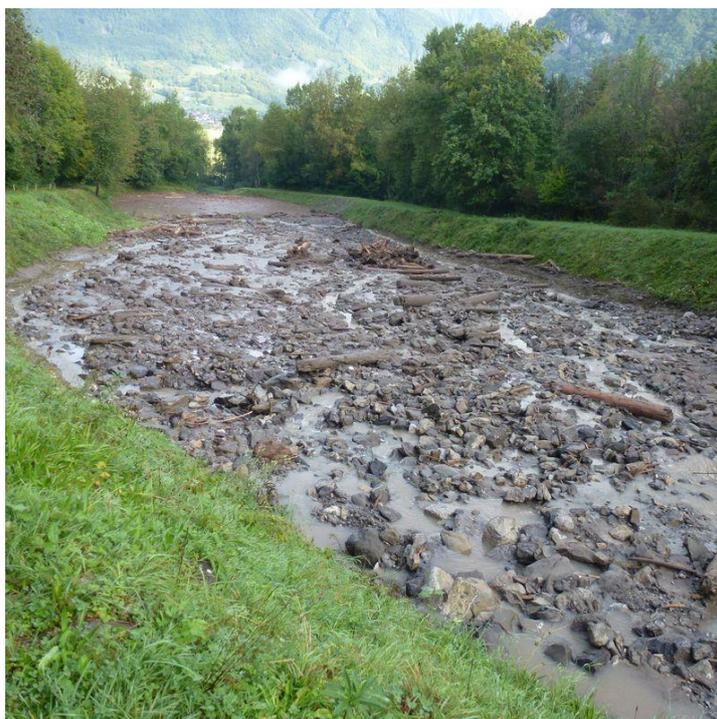


Figure 46 : Photo post crue 2014 au niveau du chenal en amont de la plage de dépôt

Le volume de matériaux déposé dans la plage de dépôt aval avait été évalué à 2500 m³ avec la moitié de ce volume provenant certainement de l'incision du tronçon amont.

3.4.1.2 Éléments historiques généraux sur les digues sur des torrents à laves

Au-delà des spécificités torrent du Piésan, il est tenté d'établir un retour d'expérience sur les modes de rupture des digues vis-à-vis des aléas torrentiels pour établir l'analyse comparative des niveaux de résistance et de contrainte, étapes permettant de qualifier les probabilités de défaillance.

Il est à noter qu'à l'initiative du RTM/ONF, une étude accidentologique des digues en contexte torrentiel, pour des EDD mieux adaptées à ce contexte singulier, a été lancée fin avril 2024, avec une première phase de recueil de données lancée auprès des GEMAPIens.

En effet, à ce jour, nous n'avons pas connaissance de rupture d'ouvrage dans une situation comparable à celle de l'endiguement du Piésan, à savoir des remblais épais canalisant des laves torrentielles.

Nous pouvons néanmoins mettre en évidence quels mécanismes sont les plus susceptibles de dégrader ces ouvrages.

Les digues sont doublement menacées d'érosion avec les écoulements d'eaux claires et le charriage, par affouillement latéral, ou par érosion suite à une surverse.

Dans le cas de laves torrentielles comme sur le Piésan, les phénomènes sont radicalement différents dans la mesure où les risques de rupture les plus improbables sont liés à l'érosion, l'affouillement ou la surverse. Les risques de rupture restent cependant assez faibles et une éventuelle rupture n'entraîne pas de sur-aléa pour des écoulements de lave torrentielle car :

- L'érosion latérale est généralement de faible ampleur ;
- En cas de surverse : comme visible sur la photo ci-dessous, la réduction de la hauteur d'écoulement au droit de la surverse engendre un arrêt de la lave, même avec une forte pente en aval de la digue. Également, les photos qui suivent montrent que l'écoulement d'une lave sur un talus de digue n'engendre que peu d'érosion sur ce talus.



Figure 47 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : ETRM)



Figure 48 : Exemple de déversement de lave sur digue, avec pas/peu d'érosion (surverse sur digue de fermeture du torrent de Saint Antoine à Modane – source ETRM)

Cette relativement faible érosion est particulièrement vérifiée en l'absence de particularité topographique susceptible d'entraîner une très forte sollicitation (coude marqué, contraction brutale, chute de seuil, ...):

- Les risques de rupture par glissement d'ensemble sont très peu probables et seraient liées à un défaut de conception. Le diagnostic approfondi conduit au chapitre 7 viendra étudier puis écarter ce risque.
- Enfin, les risques de rupture par érosion interne sont écartés pour des phénomènes de lave torrentielle car les écoulements rapides ne permettent pas de saturer suffisamment les remblais pour permettre le départ de matériaux.

Sur le Piésan, ce sont les ponts qui engendrent une contraction du lit et sont susceptibles de générer des embâcles. De ce fait ils constituent des points de surverses privilégiés, ils feront donc l'objet de toute l'attention.

3.4.1.3 Synthèse de la Visite Technique Approfondie

En l'absence de classement, les ouvrages constitutifs du système d'endiguement du Piésan n'ont fait l'objet d'aucune VTA (au sens réglementaire du terme), quand bien même ils sont visités annuellement par le service RTM/ONF en tant que gestionnaire des ouvrages domaniaux pour le compte de l'Etat.

Dans le cadre de la présente étude, une visite de terrain a été menée en octobre 2023 par Suez, et a permis d'établir l'état des différents tronçons homogènes.

Il est à noter que les tronçons RG_TH3 et RD_TH2 ont été considérés neuf pour tenir compte de leur état après travaux.

Tableau 23 - Synthèse des désordres et état retenu des ouvrages du système d'endiguement à l'état projet

Rive	Désordres ponctuels	Désordres linéaires		Etat visuel général (à dire d'expert) des désordres			Etat retenu du tronçon
	Nombre	Nombre	Linéaire (ml)	1	2	3	
RG_TH1	0	1	55	-	-	-	Bon état
RG_TH2	0	1	35	-	-	-	Bon état
RD_TH1	0	1	35	-	-	-	Bon état
RG_TH3	0	0	-	-	-	-	Etat projet - neuf
RD_TH2	0	0	-	-	-	-	Etat projet - neuf

Les désordres linéaires relevés sur les ouvrages RG_TH1, RG_TH2 et RD_TH1 sont considérés comme étant faiblement urgent et correspondent à la présence de végétations gênantes ne compromettant pas la structure des ouvrages.

3.4.2 Description des fonctions structurelles des éléments du système d'endiguement et description du fonctionnement d'ensemble du système d'endiguement

L'ensemble du système d'endiguement du Piésan est composé de digues en remblai, renforcées pour certaines (en amont du pont de la route départementale) par des enrochements.

Leur disposition contre le lit du torrent ainsi que leur dimension imposante (combinés au gabarit du lit) leur permettent d'assurer le transit de lave torrentielle sans débordement connu à ce jour.

Pour chaque tronçon du système d'endiguement, le tableau suivant décrit les composants structurels des ouvrages et leur fonction.

Tableau 24 : Description structurelles des ouvrages de protection constitutif du système d'endiguement

Tronçon	Elément de l'ouvrage	Fonction
RG_TH1	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement bétonné	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
RG_TH2	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement

Tronçon	Elément de l'ouvrage	Fonction
	Parement en enrochement libre	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
RD_TH1	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement libre	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
	Enrobé en crête	Pas de fonction structurelle, route communale en crête
	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
RD_TH2	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement libre sur une partie des berges et sur le fond du lit	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage
RG_TH3	Couverture herbacée entretenue	Protéger le remblai des érosions par ruissellement
	Parement en enrochement libre sur une partie des berges et sur le fond du lit	Protection contre l'érosion des écoulements torrentiels et l'affouillement de la digue
	Remblai graveleux	Empêcher les entrées d'eau dans la zone protégée Canaliser les laves torrentielles et crues avec charriage

Une analyse a été menée pour les modes de rupture réalistes dans le contexte torrentiel du Piésan, à savoir :

- Rupture par instabilité au glissement,
- Rupture par surverse,
- Rupture par érosion externe.

Pour chaque risque de défaillance étudié, l'analyse a été réalisée selon la grille suivante qui croise niveau de contrainte et niveau de résistance.

Probabilité de défaillance		Niveau de sollicitation					Probabilité conditionnelle de défaillance	
		Très Faible	Faible	Moyenne	Fort	Très Forte	En pourcentage	Qualification subjective
Niveau de résistance	Très Forte	Très Faible	Très Faible	Faible	Faible	Moyen	P < 1%	Très Faible
	Forte	Très Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen	1% < P < 5%	Faible
	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Fort	5% < P < 50%	Moyen
	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Fort	Fort	50% < P < 95%	Fort
	Très Faible	Moyen	Moyen	Fort	Fort	Très Fort	P > 95%	Très Fort

Figure 49 : Tableau de croisement des niveaux de résistance des digues avec les niveaux de sollicitation pour qualifier le risque de défaillance (Présentation France Digue ONF/RTM Méthodologie de diagnostic approfondi et analyse de risques)

Le diagnostic approfondi des ouvrages (voir chapitre 7) montre que **le système d'endiguement du Piésan garantit les conditions structurelles suffisantes permettant d'assurer un risque de rupture inférieur à 5% à la crête de chaque tronçon, ce qui fixe le niveau de sureté.**

La présence des ouvrages de franchissement génère cependant une limitation du niveau de protection apparent du système.

3.4.3 Présentation du fonctionnement d'ensemble du système d'endiguement constitué avec ses composants

Le fonctionnement détaillé du système d'endiguement est présenté dans les chapitres 4, 7 et 8 de cette étude.

Tant que les laves (ou crue de charriage, de manière moins probable) ne surversent pas sur les digues, ou quittent le lit du Piésan au niveau des ponts sous-capacitaires, il n'y a pas de débordement sur l'ensemble des digues ni de venues d'eau depuis l'amont dans la zone protégée.

Au regard de l'historique de crue, il semble aussi important de tenir compte de la potentielle influence de la plage de dépôt sur les écoulements (dépôt régressif). En effet, la crue de 2014 met en évidence des hauteurs d'écoulements (notamment liées à des dépôts importants) susceptible d'atteindre le niveau de crête, dans la zone aval du chenal d'écoulement (potentielle influence du remous solide). Ces niveaux ont alors été qualifiés de niveau de protection apparent, c'est-à-dire niveaux jusqu'auxquels la digue est fonctionnelle sans considération d'éventuelles défaillances.

La présente étude montre que les risques de rupture restent faibles (<5%) pour tout niveau de lave jusqu'au niveau de crête des ouvrages.

3.4.4 Présentation du niveau de protection

3.4.4.1 Lieux de référence

Deux lieux de référence sont définis au droit du système d'endiguement :

- **Lieu de référence n°1** : Au niveau de la sous-poutre du pont de la route communale, ce lieu de référence est lié à la protection de la partie amont du cône de déjection où des entrées d'eau pourraient survenir notamment par le biais d'obstruction d'ouvrage traversant ;
- **Lieu de référence n°2** : Au niveau de la crête moins une revanche de 1m50 de l'ouvrage en aval de la route départementale en rive gauche (RG_TH3), ce qui permet de garantir l'absence d'entrée d'eau sur la partie aval de la zone protégée (comportement observé dans l'historique avec la crue de 2014). Cette revanche est ici considérée pour tenir compte des différentes spécificités du contexte torrentiel (embâcle, front de lave) et des incertitudes des modèles.

Ces derniers sont facilement accessibles et visibles en crue à partir des ponts communal et départemental qui devront être équipés d'échelles limnimétriques.

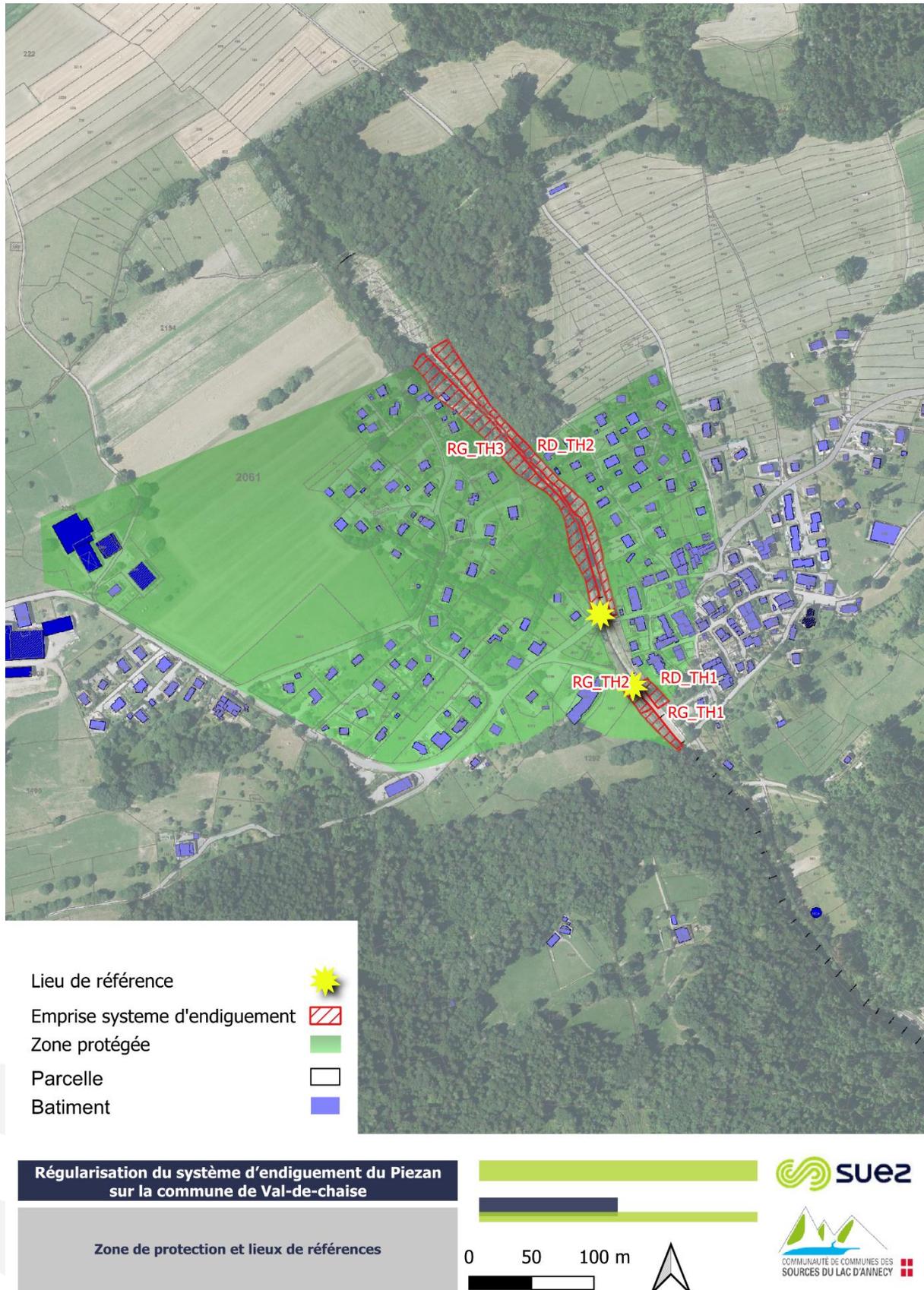


Figure 50 : Localisation des deux lieux de référence du système d'endiguement du Piézan

3.4.4.2 Niveau de protection

Au regard des analyses de défaillance, le niveau de protection peut être fixé théoriquement jusqu'au niveau de protection apparent du système d'endiguement.

L'entrée d'eau, notamment par influence des ouvrages traversants, peut se produire pour un aléa fréquent dans le cas d'un accrochage à une pile de pont ; cet évènement représente une lave de quelques milliers de mètres cubes. Cependant, il n'est pas exclu qu'une lave d'ampleur plus importante (de l'ordre de l'évènement rare) puisse tout de même transiter jusqu'au tronçon aval sans obstruction des ouvrages traversants et que le niveau de crête des ouvrages RG_TH3 et RD_TH2 soit atteint (comportement observé lors de la crue de 2014).

Aussi, en synthèse, ce niveau de protection :

- Correspond à la sous-poutre du pont de la route communale au droit du premier lieu de référence;
- Correspond à la limite de surverse des digues RD_TH2 et RG_TH3, 2 m en aval du pont de la route départementale, avec une revanche de l'ordre de 1.5 m pour tenir compte des incertitudes associés aux phénomènes torrentiels en jeu (notamment des fronts de laves denses ainsi que de l'influence du dépôt régressif depuis la plage de dépôt) ;
- Traduit donc un non-débordement de l'ensemble des digues et donc une zone protégée « pieds au sec ».

Le niveau de protection retenu correspond aux niveaux d'eau et de matériaux à chaque lieu de référence, comme suit :

- Lieu de référence n°1 (Sous-poutre pont communal) : 663.5 m NGF,
- Lieu de référence n°2 (1.5 m de revanche vis-à-vis de la crête de l'ouvrage RG_TH3, 2 m en aval du pont de la route départementale) : 551.1 m NGF.

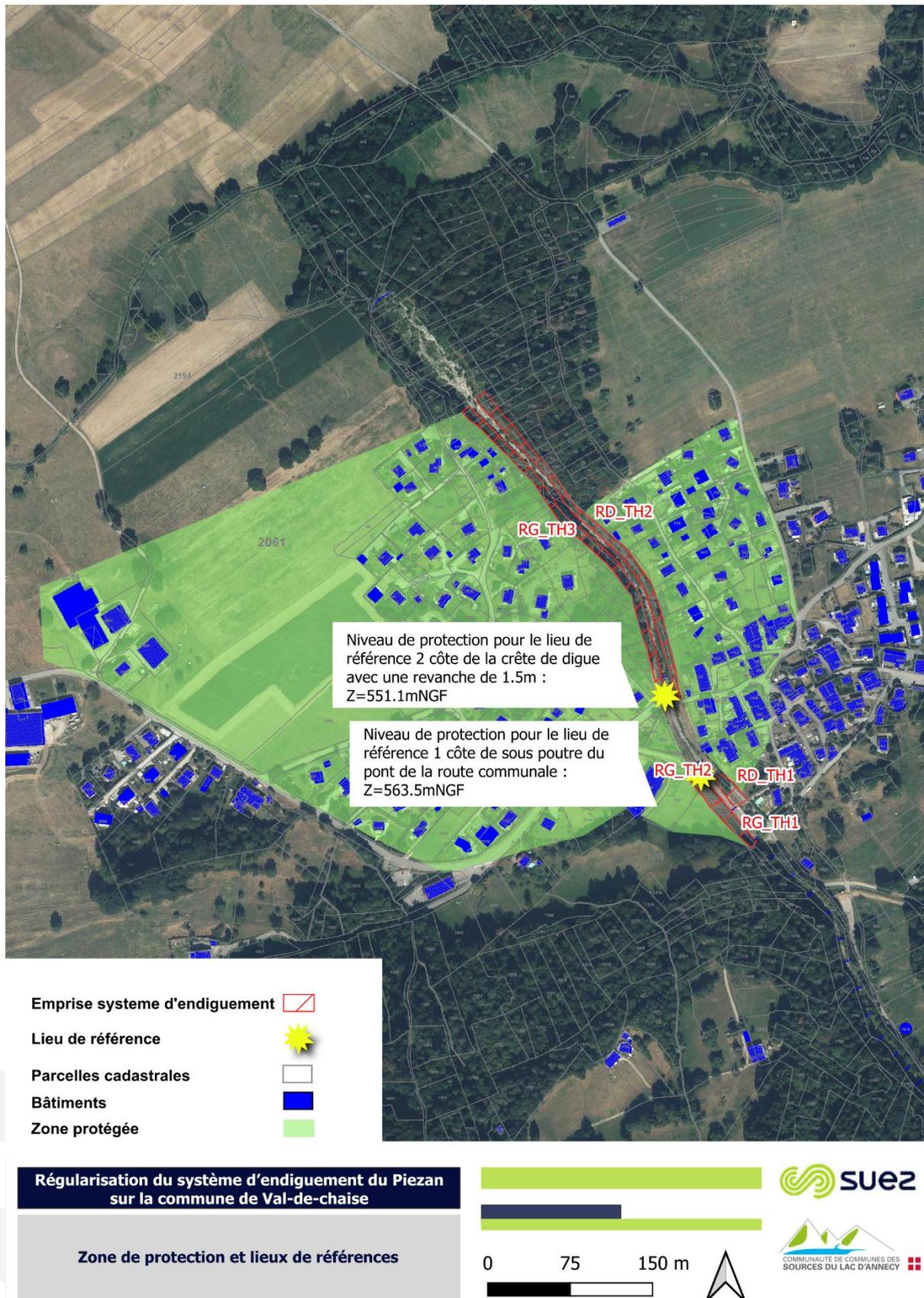


Figure 51 : Zone protégée et niveau d'eau de protection aux deux lieux de références

3.4.4.3 Scénario 1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement

La méthode conduit donc à définir des emprises maximales d'extensions de crues, qui ne vont pas correspondre à l'emprise des débordements d'une seule crue, mais correspondent à toutes les zones susceptibles d'être atteinte au cours d'au moins un évènement, selon le caractère aléatoire des crues torrentielles.

En d'autres termes, les zones délimitées par cette méthodologie représentent une enveloppe maximale d'extensions des crues qui pourraient apparaître, dans la gamme d'aléa retenu en termes de période de retour.

Pour tenir compte de cet aspect aléatoire et de toutes les incertitudes liées aux aléas torrentiels, il est proposé d'associer un niveau de probabilité d'atteinte aux zones concernées : probabilités d'atteinte très probable, probable et peu probable.

L'atteinte d'une zone concernée par une faible probabilité sera liée à un phénomène exceptionnel, largement supérieur au siècle ; à l'inverse, un secteur estimé impacté dès dépassement de la crue de protection sera concerné par un risque d'atteinte très probable.

Pour des débordements de lave torrentielle avec étalement, l'intensité de l'aléa diminue avec l'éloignement du torrent. Ce ne serait pas forcément le cas pour un changement total du lit, où le niveau d'aléa peut rester élevé dans un « nouveau lit » s'éloignant pourtant de l'axe initial d'écoulement.

Le cas présent, un changement de lit du Piésan vers la zone protégée paraît complètement improbable. Aussi, les secteurs présentant les probabilités d'atteintes les plus faibles sont aussi concernées par les niveaux d'intensité (hauteur de dépôt, vitesses) les plus faibles.

Dans le cas du Piésan, la probabilité d'atteinte est la plus élevée dans le lit avec une décroissance de cette dernière d'amont en aval. La dangerosité est très élevée compte tenu de la vitesse, de la charge de matériaux des laves, et également des hauteurs de dépôts excédant le mètre.

La carte suivante a été établie sur la base d'interprétations faites sur le modèle hydraulique et présente les probabilités d'atteintes d'un évènement apparenté à une lave fréquente sur le secteur pour le scénario 1, avec donc une absence de débordement dans la zone protégée.

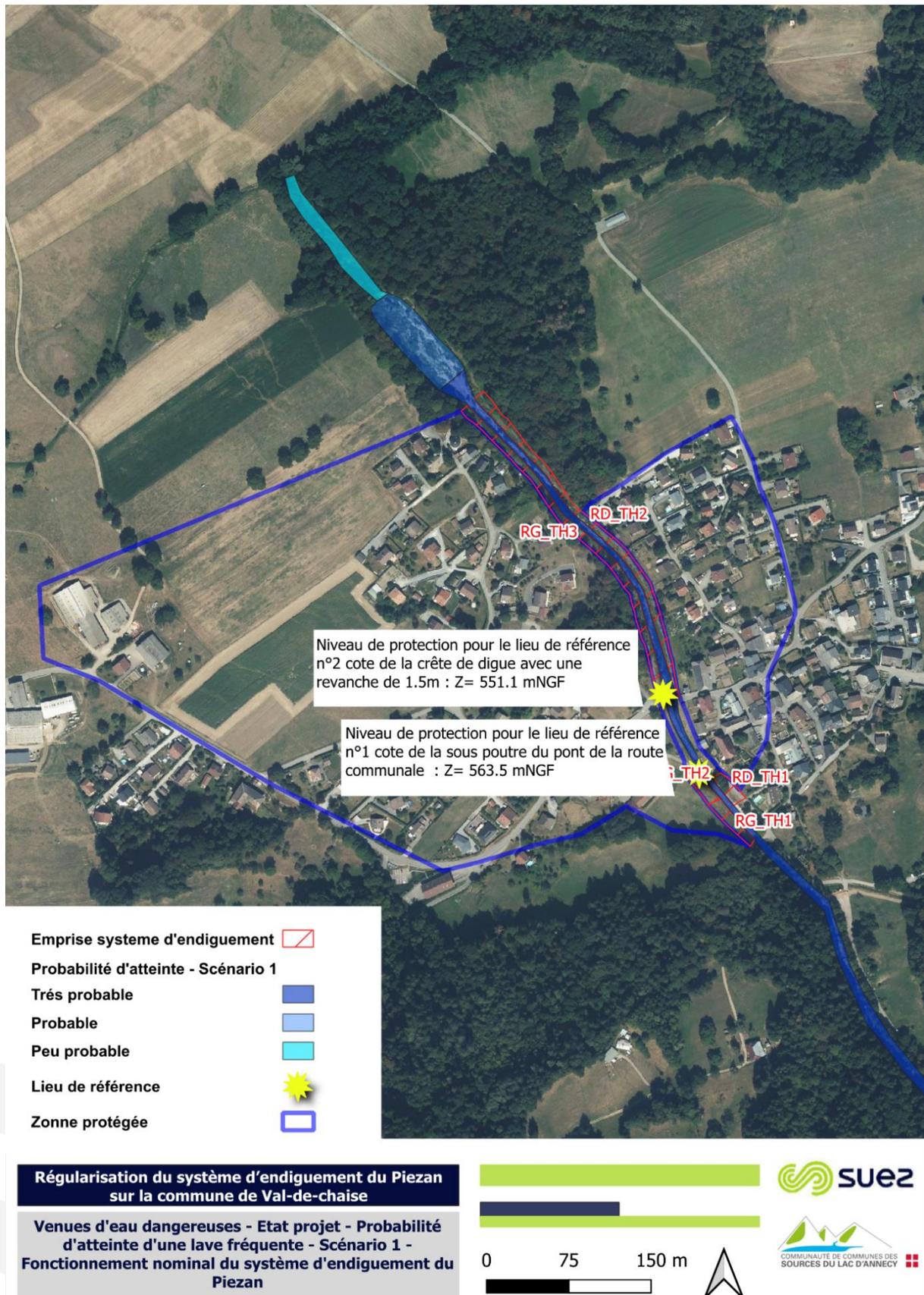


Figure 52 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement

3.5 Présentation des situations pouvant survenir pour des niveaux dépassant les performances du système

Ce chapitre résume les défaillances structurelles étudiées au chapitre 8.3 du document B.

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019, les phénomènes pouvant être à l'origine d'une défaillance d'un système d'endiguement sont :

- Une crue d'occurrence supérieure au niveau de protection ;
- Une défaillance fonctionnelle d'un ou plusieurs ouvrages hydrauliques du système d'endiguement (étudiée classiquement dans le cadre du scénario 2 de l'étude de dangers) ;
- Une défaillance structurelle d'un ouvrage du système d'endiguement (étudiée classiquement dans le cadre du scénario 3 de l'étude de dangers).

Compte tenu des caractéristiques des aléas, des ouvrages du système d'endiguement, et du croisement sollicitation des ouvrages/résistance des ouvrages, et conformément aux échanges préalables avec l'instructeur du service de contrôle des Ouvrages Hydrauliques de la DREAL, dans le cas de la présente étude, les scénarios suivants sont étudiés :

- Scénario 2, défaillance fonctionnelle du système d'endiguement : aucun scénario n'est proposé puisque le torrent du Piésan n'est pas équipé d'ouvrage de régulation.
- Scénario 3, défaillance structurelle du système d'endiguement : une crue fréquente à rare de lave torrentielle venant obstruer le pont de la route communale et/ou du pont de la route départementale et engendrant une surverse par-dessus les tronçons RG_TH2 et RD_TH1. En considérant le tronçon RG_TH2 abaissé (risque de défaillance qualifié au plus de moyen).

3.5.1 Scénario 2 - Défaillance fonctionnelle du système d'endiguement

L'arrêté d'avril 2017 prévoit l'étude d'une deuxième famille de scénarios « représentatifs d'une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection ».

Ce scénario ne s'accompagne pas d'une défaillance structurelle, il s'agit bien d'une défaillance liée au dysfonctionnement d'un dispositif de régulation des écoulements. Étant donné qu'il n'y a pas d'ouvrage de régulation sur le Piésan, aucun scénario réaliste ne peut être proposé.

Une crue chargée en matériaux pouvant entraîner des surverses et survenant après un engrèvement du lit (défaut de curage) est peu probable puisqu'il impliquerait une disponibilité en matériaux importante dans un intervalle de temps rapproché. **Ce scénario a donc été écarté.**

3.5.2 Scénario 3 – Défaillance structurelle du système d'endiguement

L'arrêté d'avril 2017 demande l'étude d'une troisième famille de scénario « représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement. Pour que ce scénario reflète une situation de terrain réaliste et porteuse d'enseignements pour les services en charge des secours aux personnes, le niveau d'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture d'au moins un ouvrage supérieur à 50% ».

Ce scénario ne représente pas un événement en particulier mais une combinaison d'événements possibles. Elle est basée sur une interprétation d'un ensemble de modélisations d'étalement de lave torrentielle et de l'interprétation de la géomorphologie locale.

Le scénario n°3 intègre une combinaison des situations suivantes :

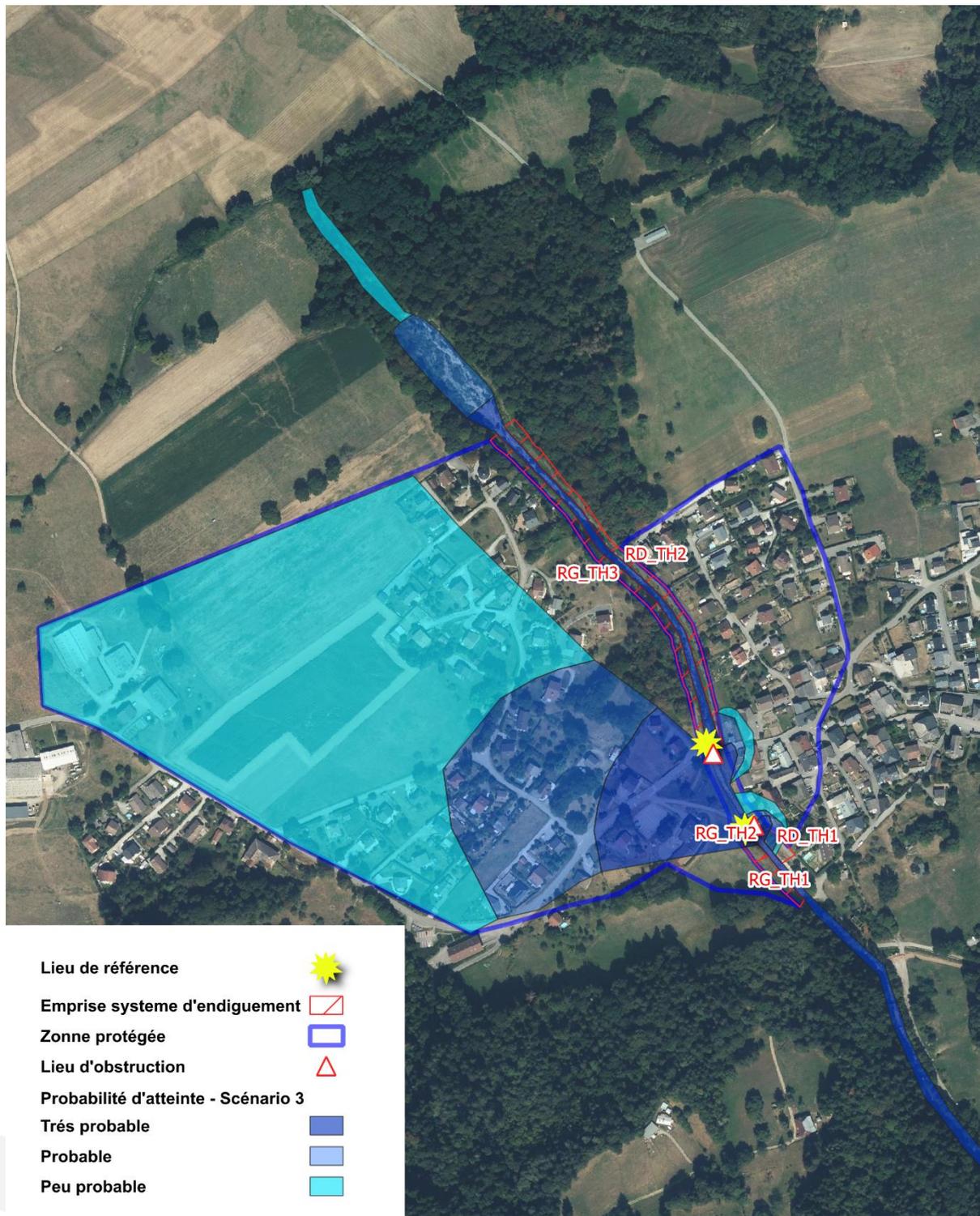
Etude de dangers du système d'endiguement du Piésan

- Crue correspondant à la borne haute des scénarios fréquents de lave, avec obstruction des ponts de la route communale et de départementale et tronçon de digue RG_TH2 abaissé (risque de défaillance qualifié au plus de moyen) ;
- Crue correspondant à la borne haute des scénarios rares de lave, avec obstruction des ponts de la de la route communale et de départementale et tronçon de digue RG_TH2 abaissé (risque de défaillance qualifié au plus de moyen) ;

Les conséquences prévisibles sont les suivantes :

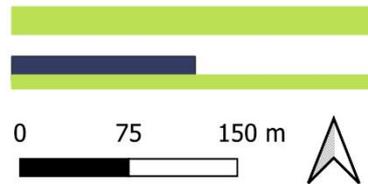
- Les laves surversent en grande partie en rive gauche avec des dépôts solides qui décroissent en quantité avec l'éloignement aux différents lieux d'obstruction, en rive droite des débordements locaux sont aussi attendus dans une moindre mesure. Compte tenu des incertitudes associées à ce type de simulation numérique dans un tel contexte, la surverse sur les ouvrages reste possible sur ce type d'évènement, mais resterait assez localisée, sans risque de propagation d'une lave sur une grande distance en arrière des ouvrages.
- Un volume de la lave est potentiellement toujours attendu au sein du lit du Piésan avec un arrêt probablement contenu dans la plage de dépôt ou son amont immédiat.
- Une grande partie de la rive gauche du cône de déjection est concernée par ces venues d'eau, notamment par des écoulements moins chargées en matériaux (fin de crue plus liquides/ dépôt de matériaux).

La dangerosité des venues d'eau décroît avec la probabilité d'atteinte. Pour ces scénarios, au droit des enjeux, on obtient des venues d'eau très dangereuses pour l'école élémentaire et les résidences situées relativement proche des ponts de la route communale et départementale.



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-chaise

Venues d'eau dangereuses - Etat projet - Probabilité d'atteinte d'une lave fréquente à rare - Scénario 3 - Défaillance fonctionnel du système d'endiguement du Piésan liée à l'obstruction des ponts de la route communale et départementale



 SUEZ



Figure 53 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan

3.6 Organisation du gestionnaire

L'organisation de la CCSLA est fournie en annexe. Cette organisation a été rédigée conformément à l'arrêté de 2022.

Document B

Analyse des risques et justification des performances

4. CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS

Le système d'endiguement s'inscrit dans un environnement qui est soumis à des aléas naturels, que ce soient les crues des cours d'eau principaux, les crues des affluents ou les séismes. Afin d'appréhender le comportement de ces endiguements lors de ces différentes situations ainsi que la sensibilité du site à ces aléas, ce chapitre a pour finalité d'évaluer les caractéristiques physiques les plus extrêmes de ces phénomènes naturels.

4.1 Aléa crue torrentielle – diagnostic torrentiel

Ce chapitre a pour vocation de qualifier et de tenter de quantifier, autant que possible, les aléas torrentiels susceptibles d'entrer en interaction avec le système d'endiguement.

Pour cela, il s'articule autour de trois axes :

- L'historiques des crues, essentielle pour acquérir de la connaissance du fonctionnement des torrents et cadrer les phénomènes à étudier,
- La description de la morphologie du bassin versant et de ses conséquences sur l'aléa torrentiel,
- Différentes approches de qualification de l'aléa torrentiel, et de tentative de quantification.

4.1.1 Description géomorphologique du Piésan

4.1.1.1 Grandeurs caractéristiques des bassins versants

Le bassin versant du Piésan est un bassin torrentiel de taille réduite (2.4 km²), d'altitude élevée (2060 m), et de pente forte sur la branche principale (42%). Le torrent est alimenté par 5 branches à fortes pentes qui drainent la face nord-ouest du massif de la Dent de Cons.

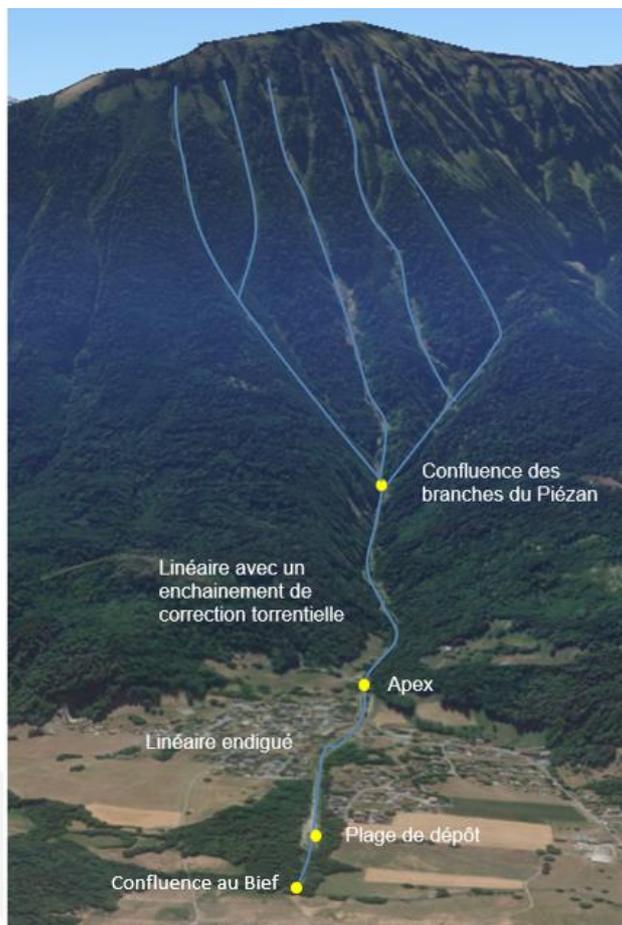


Figure 54 : Bassin versant du Piésan (Source : Google Earth)

Les principales caractéristiques du bassin versant sont les suivantes :

Tableau 25 : Caractéristiques généraux du bassin versant du Piésan

Surface du bassin versant (sommet de cône)	2.4 km ²
Altitude maximale	2060 m (Dent de cons)
Altitude de l'exutoire	485 m
Z50	960 m
Longueur du plus long chemin hydraulique	3780 m
Pente moyenne du Piésan	42%

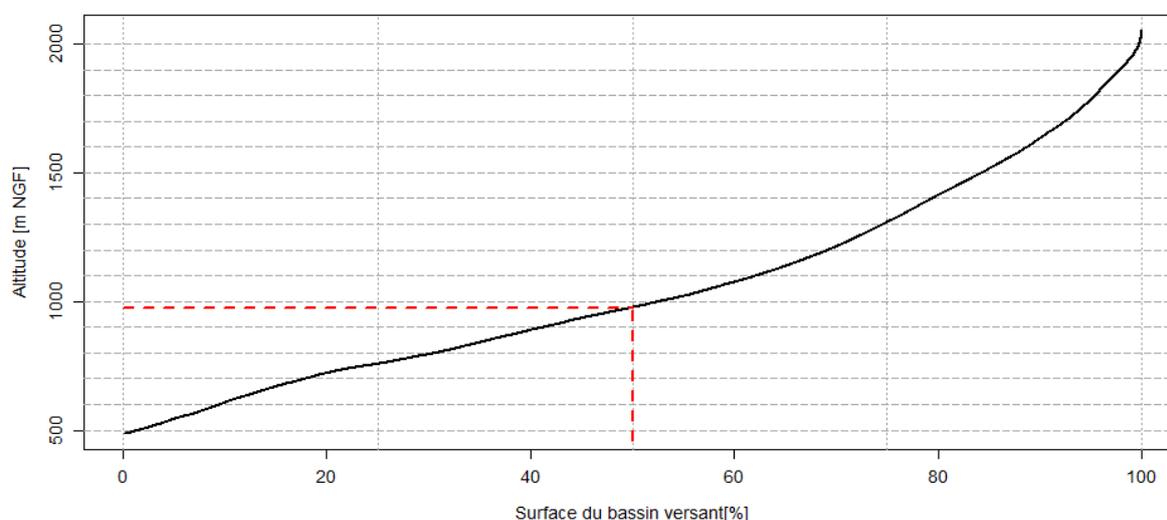


Figure 55 : Courbe hypsométrique du torrent du Piésan

Ces caractéristiques montrent que le torrent du Piésan réagit aux épisodes de pluies courtes et intenses (type orage) et connaît des crues rapides (de l'ordre de quelques heures tout au plus).

Du fait de son altitude plutôt faible (cf. Figure 55), il est sujet aux phénomènes de redoux intervenant en hiver ou au printemps (accélération de la fonte nivale).

Enfin, l'importance du couvert forestier sur de fortes pentes, avec des phénomènes avalancheux présents au niveau des différentes branches du torrent, a pour conséquence de fournir du bois mort qui vient s'accumuler dans les chenaux et qui peut être remobilisé sous forme de flottants durant les crues.

4.1.1.2 Géomorphologie et description du torrent du Piésan

La description géomorphologique qui suit est effectuée d'amont en aval.

4.1.1.2.1 Partie haute du bassin versant (en amont de l'apex du cône)

Au-delà de 1200 m, les roches (marnes et marno-calcaires) sont peu sensibles à l'érosion, cela se traduit par un faible encaissement des talwegs des branches du Piésan.



Figure 56 : Seuils rocheux dans la branche du Piésan (marno-calcaire) – altitude 1200 m (Source : EBR RTM 2014[8])

En dessous de cette altitude la nature géologique de la roche (schistes gréseux) est plus friable, ce qui induit un changement de faciès des talwegs qui sont plus encaissés.

Vers 800 m, nous retrouvons la confluence des branches du torrent. C'est à cette altitude que la principale rupture de pente est observée (début du chenal d'écoulement). Par ailleurs c'est la limite amont du dispositif de correction torrentielle, qui a pour but de stabiliser le lit du Piésan. Sur ce tronçon il faut s'attendre à une importante respiration du torrent, selon le remplissage des différents tronçons entre chaque seuil (phénomène de stockage puis reprise).

Progressivement jusqu'au droit de l'apex du cône de déjection (vers 600 m), le vallon est moins pentu et moins profond, le torrent s'écoule dans un fond de vallée de plus en plus large. Cette partie du bassin versant est sujette aux chutes de blocs et aux avalanches (1000 et 750m d'altitude), il y demeure une grande proportion d'arbres. C'est une zone de réception de matériaux qui seront disponibles pour être remobilisés lors de crues.



Figure 57 : (a) Lit engravé sur la partie supérieure de la correction torrentielle (seuil n°40 – Source EDD 2019 [7]), (b) Aval du pont de route forestière

4.1.1.2.2 Analyse morphologique locale du torrent sur le cône du Piésan

L'entrée sur le cône de déjection s'effectue vers 600 m d'altitude. Le torrent traverse le chef-lieu et est historiquement très chenalisé jusqu'à la plage de dépôt. C'est sur ce linéaire que se situe la plupart des éléments constitutifs du système d'endiguement ainsi que les principaux enjeux (notamment l'école en rive gauche). Il réside sur ce tronçon une plus faible quantité de seuils.



Figure 58 : (a) Linéaire de la digue de l'école, (b) linéaire entre le pont de la route départementale et la plage de dépôt

Ce paragraphe décrit le linéaire qui s'étend de l'amont du pont de la route forestière (660 m NGF) jusqu'à la confluence au Biel (487m NGF).

4.1.1.2.2.1 Analyse du profil en long local

La partie amont est marquée par une succession de seuils qui ont pour objectif de stabiliser le profil en long (zone historiquement sujette à l'incision) et de recentrer les écoulements du Piésan. Les seuils espacés régulièrement (un tous les 20 mètres environ sur un linéaire de 400 m avec des hauteurs variables mais globalement faibles, de quelques mètres) donne une pente moyenne relativement régulière aux alentours de 16% (i).

Le ponceau agricole marque l'entrée sur le cône de déjection qui se matérialise par une légère réduction de la pente ainsi que du nombre de seuils. Se succèdent deux ouvrages de franchissement

qui marquent une diminution locale du profil en long (notamment au droit du pont communal où un seuil marque l'aval de l'ouvrage de franchissement) (ii).

Dans la situation projetés (i.e. après travaux), le lit et les berges sont enrochés jusqu'au niveau de la plage dépôt avec une pente de l'ordre de 11%. En aval du pont de la route départementale, le tronçon a historiquement tendance à s'inciser sur sa partie amont, tandis que sa partie aval est plutôt sujette à l'exhaussement sous l'influence aval de la plage de la plage de dépôt.

La réduction de pente en entrée de plage de dépôt combinée avec l'élargissement du lit favorise un dépôt massif dans celle-ci (iii). En aval de la plage de dépôt, la diminution de pente (< 1%) se poursuit jusqu'au Biel, ce dernier n'a pas une capacité suffisante de transit pour les matériaux (iv).

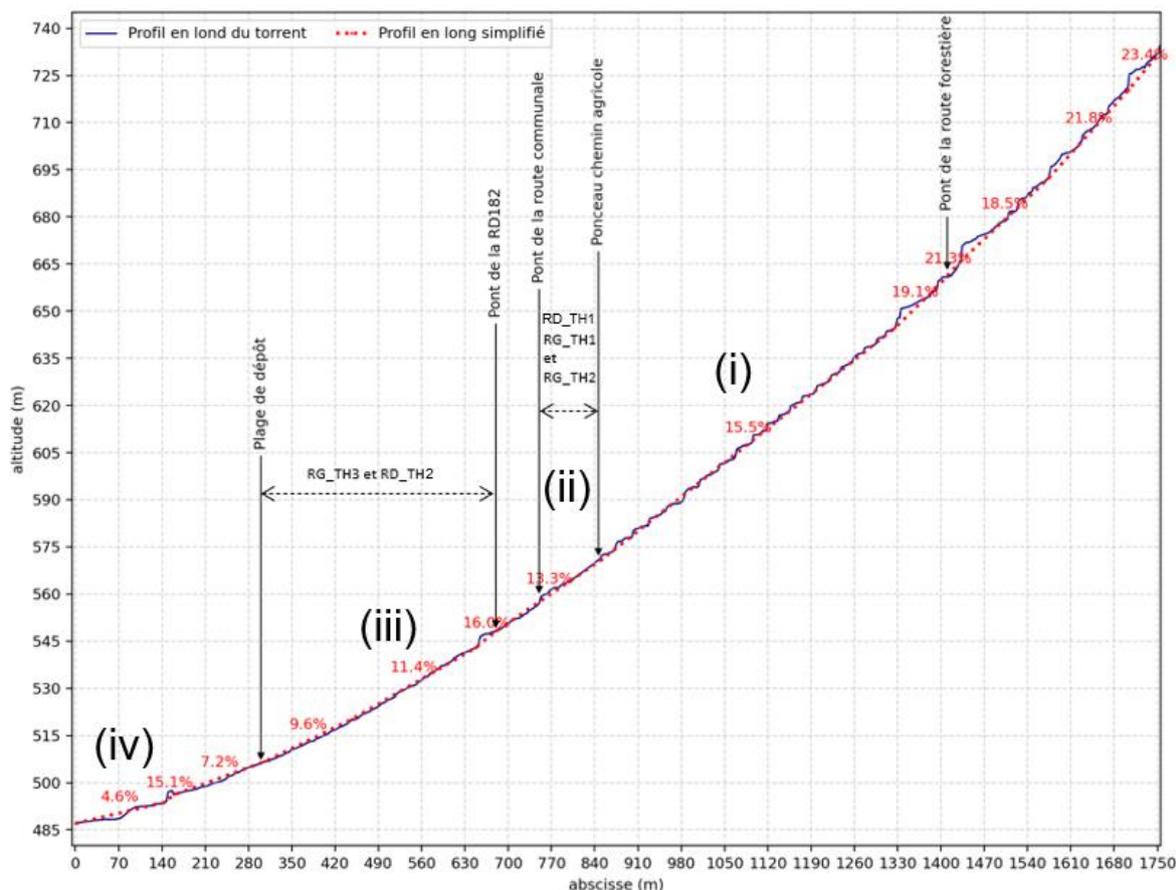


Figure 59 : Profil en long de la zone d'étude du Piésan depuis la confluence avec le Biel

Afin de caractériser les tendances de l'évolution du fond de lit au droit du système d'endiguement, il est proposé d'analyser une soustraction de MNT (état de 2021 auquel on soustrait celui de 2012). Plusieurs éléments corroborent les observations faites sur le terrain :

- On observe un équilibre global sur la partie amont du système d'endiguement (cohérent avec la protection des berges et les différents seuils qui viennent fixer l'ensemble du chenal du Piésan), excepté entre les ponts 2 et 3 où l'abaissement d'un seuil réalisé en 2018 (après le LIDAR) est bien visible ;
- En aval du pont de la route départementale, au niveau du chenal aval concerné par les futurs travaux, on observe une tendance à l'incision avec des patch plus marqués (notamment au niveau du pied de seuil n°2) ;
- Au droit de la plage de dépôt, on relève une tendance au dépôt (ce qui est logique et cohérent avec la nature de l'ouvrage et les observations des événements qui transitent jusqu'à l'aval du cône de déjection).

Il faut tout de même garder à l'esprit que cette approche reste grossière et ne permet pas de quantifier ces évolutions de manière précise. Par ailleurs, cette comparaison s'appuie sur des états respectifs de 2022 et 2012 pour témoigner d'une tendance morphologique du lit, cette tendance ne sera pas forcément celle observée post travaux notamment sur le tronçon aval (à priori plus de possibilité d'incision).

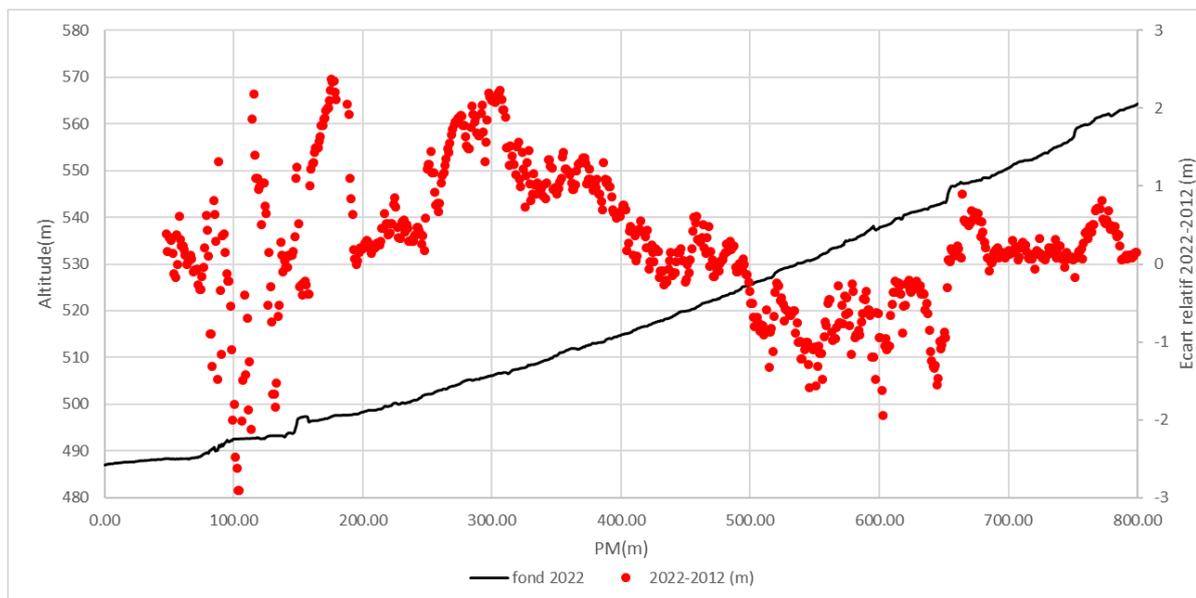


Figure 60 : Profil en long de l'écart altimétrique relatif entre le niveau de fond de lit de 2022 et 2012

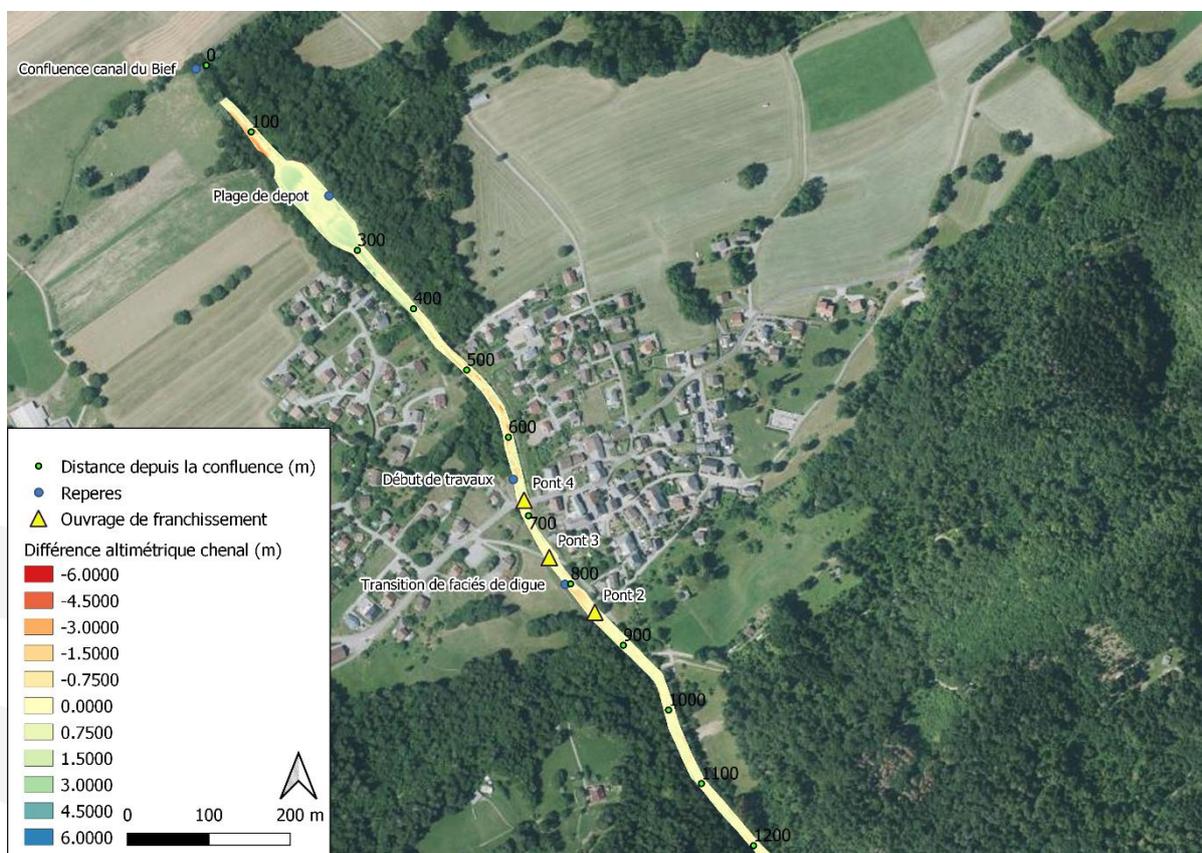


Figure 61 : Différence altimétrique entre les MNT de 2021 et de 2012

4.1.1.2.2 Description du chenal d'écoulement et des ouvrages de franchissement

La zone d'étude est largement contrainte et aménagée. Le lit est relativement encaissé et encadré sur une partie de son linéaire par un système d'endiguement. La largeur du lit varie globalement entre 3 et 7 mètres avant d'arriver au droit de la plage de dépôt où l'on observe un important élargissement (environ 30 m) qui favorise le dépôt de matériaux.

Il est en outre dénombré 4 ouvrages de franchissement sur la zone d'étude :

- Le pont n°1 (pont de la route forestière) à l'extrémité amont du linéaire étudié. La route en aval en rive droite a été reprofilée en 2020 pour faciliter le retour au lit de potentiels débordements pouvant apparaître au niveau du pont ;
- Le pont n°2 (ponceau agricole) au sommet du cône de déjection, et à l'extrémité amont du système d'endiguement ;
- Le pont n°3 (pont de la route communale). Cet ouvrage ainsi que le seuil placé au droit de ce dernier ont été l'objet de travaux entre 2011 et 2012 (seuil abaissé pour augmenter le tirant d'air) ;
- Le pont n°4 (pont de la route départementale).

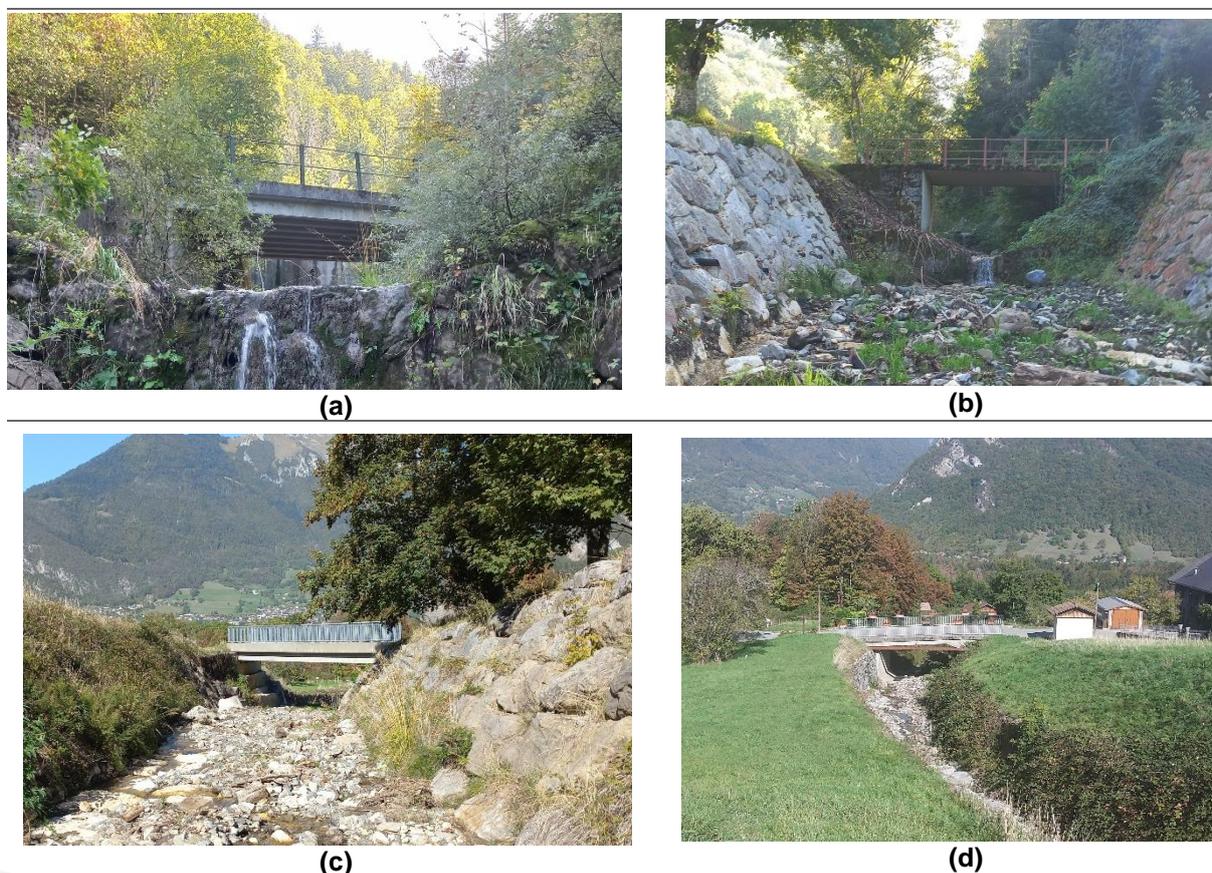


Figure 62 : Ouvrages de franchissement sur la zone d'étude, (a) pont de la route forestière, (b) ponceau agricole, (c) pont communal, (d) pont de la route départementale

A titre informatif, les dimensions des ouvrages de franchissement sont dans le tableau suivant :

Tableau 26 : Caractéristique des ouvrages de franchissement sur le torrent du Piésan

Ouvrages	Dimensions	Section
Pont n°1 - Pont de la route forestière	H=3 m // L=5.3 m	15.9 m ²
Pont n°2 - Ponceau agricole	H=3.1 m // L=5.5 m	17.6 m ²

Ouvrages	Dimensions	Section
Pont n°3 - Pont de la route communale	H=3.2 m // L=8 m	25.6 m ²
Pont n°4 - Pont de la route départementale	H=3.15 m // L=7 m	22 m ²

4.1.1.2.3 Confluence avec le Biel

Sur ce dernier tronçon, il apparait une rupture de pente en sortie de la plage de dépôt ; la capacité de transport des matériaux s'en retrouve réduite et devient nulle au droit de la confluence au Biel.



Figure 63 : Tronçon en aval de la plage de dépôt faisant la jonction avec la confluence au Biel

4.1.1.3 Profil en long du Piésan

En conclusion pour cette partie, l'interprétation de ce profil en long permet d'expliquer, sans usage préalable d'outil de calcul quelconque ou de recours à l'historique, les secteurs favorables à des dépôts plus ou moins massifs. Le torrent du Piésan peut ainsi être découpé en 4 sous-entités :

- **La zone de réception** correspond à la zone au-delà des 800 m d'altitude (zone de confluence des différentes branches). Cette entité est caractérisée par des thalwegs à forte pente (entre 40 et 90%) qui s'encaissent progressivement en aval. (a)
- **La zone comprise entre 800 et 600 m d'altitude est très active et voit se succéder des phénomènes de dépôt et de reprise.** Cette zone est fortement marquée par la présence de nombreux ouvrages de correction torrentielle. La pente moyenne reste élevée (supérieur à 20% au début puis décroît progressivement jusqu'à 16% au niveau de l'apex du cône) (b)
- **Le cône de déjection concentre les ouvrages du système d'endiguement.** En dessous de 600 m et jusqu'à la sortie de la plage de dépôt, on se situe sur une section fortement contrainte et historiquement endiguée. La pente décroît progressivement de 16% à l'amont jusqu'à environ 8% au sein de la plage de dépôt, la tendance est plutôt au dépôt sur ce linéaire, bien que des phénomènes d'érosion et d'incision ne soient pas exclus (c)
- La zone de confluence au Biel est un secteur se situant aux alentours des 480 m d'altitude et voit une forte diminution de la pente avec une capacité de transport quasiment nulle à l'aval (au niveau du Biel). (d)

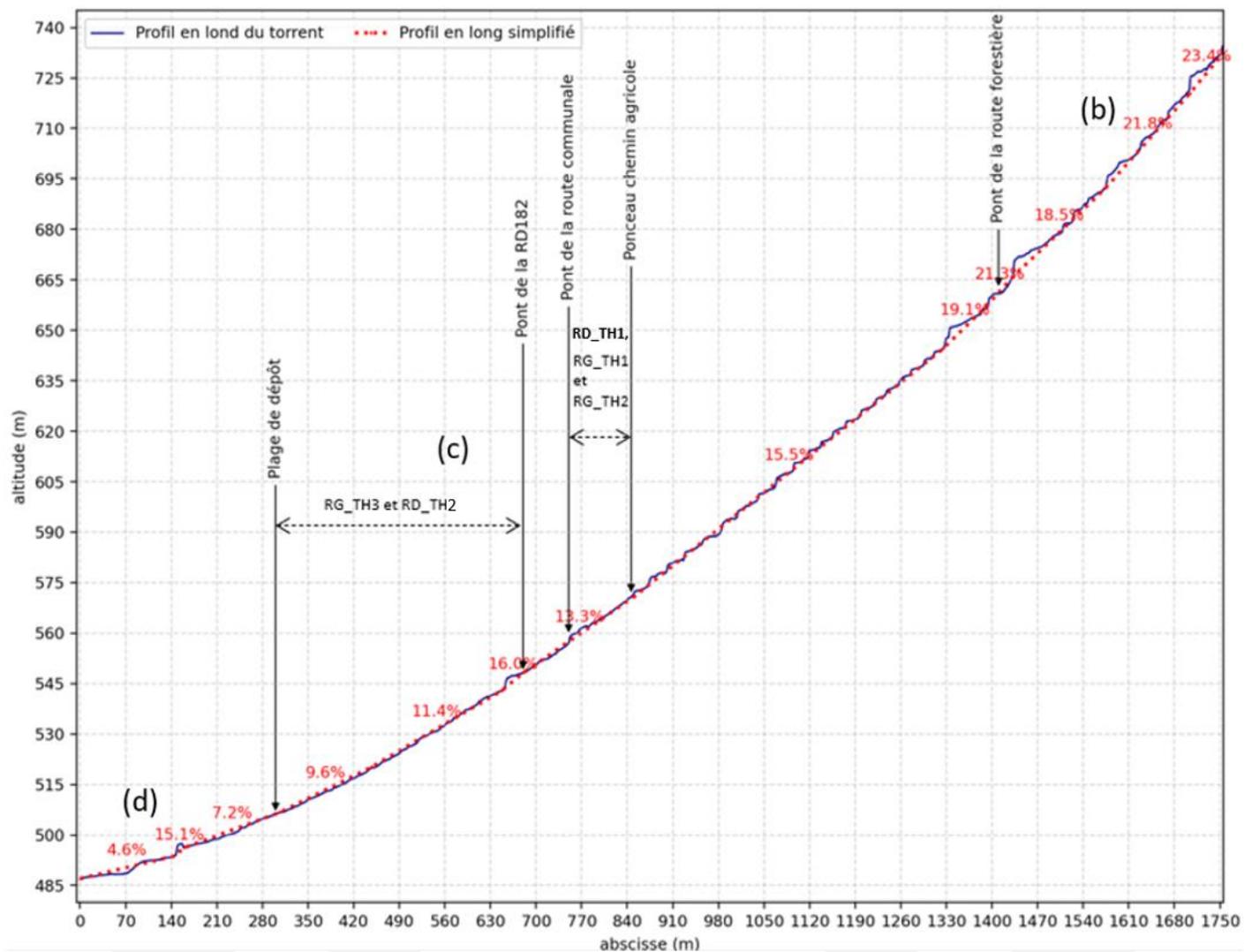


Figure 64 : Profil en long du torrent du Piésan

4.1.2 Historiques des crues

4.1.2.1 Synthèse des crues recensées

Un historique de crue a été établi lors de l'EDD de 2019 [7] ; ce dernier permet de rendre état des types de crue rencontrés sur le torrent ainsi que de potentielle zone à risque au sein du bassin versant.

Le tableau ci-après synthétise les connaissances des principales crues historiques du Piésan.

Tableau 27 : Inventaire des principales crues connues du Piésan (Source : EDD Piésan 2019 RTM)

Date	Description
14/09/1733	Le "Nant de Cons" sort de son lit et emporte diverses terres.
17/11/1812	Les grandes pluies d'automne ont amené le débordement du torrent du Piésan qui a causé de grands dommages aux propriétaires riverains.
05/1822	Les matériaux charriés par les crues du Piésan ont fait divaguer les eaux qui se sont ouvert un nouveau lit au milieu des cultures.
01/11/1859	Une violente crue du Piésan entraîne une femme et la recouvre de ses déjections.
30/07/1892	Un orage accompagné d'une trombe d'eau provoque une lave épaisse qui a été s'étaler sur les barrages rustiques construits dans le lit.
05/08/1896	Une crue provoquée par une pluie orageuse amène l'éboulement de terrain situé au confluent du Piésan et du ravin des Lanches. D'abondants dépôts sont laissés au milieu des atterrissements des barrages construits en aval de ce pont (?).
12/07/1897	Un très violent orage provoque une lave qui détruit complètement 2 barrages et en endommage 32 autres. Les propriétés à l'aval de Cons sont envahies ou engravées.
11/02/1904	Un orage accompagné de pluies abondantes provoque le débordement du Piésan et des dépôts dans les champs et les prés de Cons (34 mm d'eau le 10/02 à Faverges ; 39 mm le 11/02).
06/07/1905	Un orage éclate à 18 h (25 mm d'eau à Faverges) et provoque une lave du Piésan qui endommage 2 barrages rustiques et cause de sérieux dégâts sur les rives jusqu'à la plaine.
18-20/01/1910	De fortes pluies accompagnées de la fonte des neiges engendrent des débordements du Piésan dans les propriétés riveraines (dépôts de graviers). Les dégâts sont évalués à 2.000 Frs.
17/07/1915	Une crue se produit sur le Piésan après de fortes pluies, dont les effets sont aggravés par la fonte des coulées de neige rémanentes des combes. Les dégâts sur la correction existante sont considérables puisqu'il ne reste après la crue que 12 ouvrages intacts, les barrages en pierres sèches ayant été détruits.
01/04/1922	Des pluies diluviennes produisent de forts écoulements sur les torrents qui descendent de la Dent de Cons.
08 et 20/04/1927	Crue du Piésan sans dégâts significatifs.
11/06/1937	Un orage violent éclate sur toute la région (hauteurs d'eau relevées de 80 à 100 mm). Il provoque la formation de laves sur le Piésan et son affluent des Lanches entre 900 et 1000 m, où demeurent les culots des avalanches descendues de la Dent de Cons après un hiver particulièrement enneigé. L'obstruction du pont du chemin vicinal n°1 provoque l'inondation des propriétés riveraines, menaçant le village de Cons et le hameau de Grange Neuve. Le torrent couvre 2 ha de jardins et de près de déjections. Sur son cône, il dépose plusieurs milliers de m3 de cailloux et de blocs (ce volume est estimé sommairement à 5000 m3 par analogie avec l'événement qui a affecté le torrent voisin du Bruant, sur la commune de Marlens, où une lave engrava 4 ha de vignes et de jardins et déposa plus de 10 000 m3 de matériaux). La coulée transite dans le chenal du Piésan et atteint une hauteur de 3 m à la traversée de Cons avant de se déposer sur le cône de déjection. Elle est constituée

Date	Description
	en majeure partie de petits éléments. Les plus gros, arrêtés par les barrages, semblent provenir de dépôts anciens remaniés.
31/07/1937	A la suite d'une journée orageuse, le Piésan déborde une seconde fois dans Cons Sainte Colombe.
24/07/1970	Une crue du Piésan provoquée suite à un orage détruit en partie un ouvrage à l'amont de Cons.
18/07/1971	Un violent orage éclate à 15 h 30 et provoque une crue du Piésan surtout chargée par des bois arrachés aux berges ou trouvés dans le lit. Un ouvrage de correction en construction dans le lit du Piésan ne peut résister à la lame d'eau boueuse.
10/10/1988	De fortes pluies (72 mm à Cons entre 1 h 30 et 20 h 30) provoquent une crue du torrent qui vient remplir la plage de dépôt (réalisée 5 ans plus tôt) de "pierres, vieilles souches et boues".
16/06/1990	Crue du Piésan avec transport solide suite aux pluies diluviennes du 13 au 16 février (crues généralisées à l'ensemble du département) - la plage de dépôt amont est remplie par la crue et sera curée
08/06/1996	Une lave torrentielle atteint l'ouvrage-grille de la plage de dépôt. Quelques centaines de m3 sont dégagés des poutres.
02/07/2010	Crue à la suite d'un orage (durée estimée à 3/4 heures) - hypothèse d'une embâcle/débâcle - la bouffée est arrivée jusqu'à la confluence en traversant le Biel. Dépôts constitués principalement de bois puis de matériaux terreux et pierreux. Obstruction de l'ouvrage grille de la plage de dépôt amont nécessitant une extraction des bois
08/09/2014	Crue d'orage à la suite d'un été très pluvieux. Purge des matériaux stockés dans les différents couloirs du bassin de réception. Ecoulement de lave torrentielle fluide. Quelques dégâts sur les ouvrages et débordements mineurs. Dépôt important de bois dans la plage de dépôt aval (volume de matériaux environ 2500m3).

4.1.2.2 Retour sur les événements les plus marquants

4.1.2.2.1 Crue du 11 juin 1937

Un violent orage (80 à 100 mm de précipitations) provoque la formation d'une lave torrentielle à une altitude comprise entre 1000 et 900 m où on relève la présence de culot d'avalanche provenant de la dent de Cons.

La coulée transite dans le chenal et atteint 3 m de hauteur. L'obstruction du pont du chemin vicinal entraîne l'inondation des propriétés riveraines. Il dépose dans son lit et en dehors de celui-ci un volume de matériaux estimé à 5000 m³. Les dépôts retrouvés sur le cône sont relativement fins, les plus gros matériaux, qui semblent provenir d'anciens dépôts qui auraient été remobilisés, ont été arrêtés plus en amont par des barrages.



Figure 65: Canal d'écoulement creusé à la pelle mécanique par l'administration des Ponts et Chaussées - juin 1938 - Archives RTM (Source PPRN – Val-de-Chaise)

4.1.2.2.2 *Crue du 2 juillet 2010*

Le 2 juillet 2010, un orage (d'une durée approximative de 45 minutes) a engendré une lave torrentielle. La bouffée est arrivée jusqu'à la confluence en traversant le Biel et inondant la parcelle agricole se trouvant rive gauche et en face de l'arrivée du Piésan. La lave a provoqué la mobilisation d'un important stock de bois jusqu'à la confluence avec Le Biel et qui a en passant comblé les deux plages de dépôts (il a été fait l'hypothèse d'une rupture d'embâcle dans le versant pour expliquer cet apport en bois important). Aucun dégât sur les ouvrages ni de débordement n'a été observé.



Figure 66 : Dépôt ligneux et de matériaux fin dans la plage de dépôt à la suite de la crue du 2 juillet 2010
(Source : RTM)

4.1.2.2.3 Crue du 8 septembre 2014

La crue du 8 septembre 2014 fait suite à un été particulièrement pluvieux, avec des sols saturés en eau ; l'événement intervient après un épisode orageux localisé d'une intensité de précipitations de 78 mm/h. Des quantités importantes de bois ont transité dans le chenal et sont venues se déposer dans la plage de dépôt aval.

Plusieurs modes de transport sont vraisemblablement intervenus au cours de la crue. Il n'y a pas eu d'obstruction au niveau des ouvrages de franchissement, hormis sur le pont le plus en amont (route forestière) dont les garde-corps ont été particulièrement endommagés. En aval du pont de la route qui traverse le hameau, le chenal s'est incisé sur une profondeur d'environ 2 m jusqu'à la plage de dépôt. Les écoulements ont atteint par endroit les sommets de berges. Le volume de matériaux déposés dans la plage de dépôt avant la confluence avec Le Biel a été évalué à 2500 m³.



Figure 67 : Dépôt au sein de la plage à la suite de la crue du 8 septembre 2014 (Source : RTM)



Figure 68 : Dépôt chenal amont de la plage (Source : RTM)

4.1.2.3 Synthèse des connaissances historiques : types de transport solide prépondérants connus, et analyse rhéologique

L'analyse de l'historique indique que les crues principales se sont manifestées sous forme de coulées assimilables à des laves torrentielles avec une forte proportion de flottants. Cette hypothèse est en accord avec la morphologie générale du bassin versant et les observations de terrain.

A partir de l'historique des crues, l'EDD de 2019 du RTM/ONF [7] avait tenté de relier une rhéologie des laves torrentielles apparues sur le Piésan par rapport aux descriptions (notamment les hauteurs atteintes) des différentes crues :

Tableau 28 : Estimation de la valeur du coefficient T_c/ρ à partir des hauteurs relevées dans l'historiques (Extrait EDD 2019)

Evènement	Localisation	Hauteur d'écoulement évaluée	Evaluation du rapport T_c/ρ
Crue de 1937	Traversée du chef-lieu	« la lave atteint une hauteur de 3 m » Hypothèse pour le calcul : chenal trapézoïdale de largeur 5m, pente du chenal $\approx 12\%$	≈ 1.4
Crue de 2014	Aval traversée RF (pont n°1)	3m (pente 10% - section rectangulaire base 5 m)	≈ 1
	Seuil n°7 (apex du cône)	Écoulement qui atteint le sommet de la berge en rive droite (surélévation possible lié à la cuvette du seuil ?). Hauteur 2 m – section trapézoïdale largeur 4 m	≈ 0.8
	Digue rive gauche secteur école (digue 1RG)	Écoulement qui atteint le sommet de la berge en rive gauche et rive droite ($h=2.3$), au niveau du seuil 5 (ouvrage supprimé dans le cadre des travaux de 2018) Section trapézoïdale largeur 4 m – pente chenal 11%	≈ 0.9
	Plage de dépôt	Épaisseur moyenne de dépôt de l'ordre de 0.5 à 1 m dans la plage de dépôt.	0.4 à 0.8

Au regard de l'historique il semble que les crues importantes du Piésan se manifestent sous forme de laves torrentielles (coulée plutôt fluide). Cette caractéristique sera à retenir dans la caractérisation des aléas.

L'occurrence de crues s'accompagnant de phénomènes de charriage n'est évidemment pas à exclure. Mais ces événements ne semblent pas correspondre aux situations les plus dommageables pour les enjeux directement menacés, comme on le constate sur les crues de 1937, 2010 et 2014.

4.1.3 Caractérisation de l'aléa crue torrentielle

4.1.3.1 Les laves torrentielles

Selon Bardou (2002) [1], les laves torrentielles sont « des écoulements subaériens granulaires lubrifiés, d'apparence cinématiquement monophasique ». Cette définition courte fait ressortir 3 traits caractéristiques des laves torrentielles :

- **Une forte concentration en matériaux.** Dans les laves torrentielles, les matériaux représentent généralement plus de 50 % du volume total [5]. Les gammes de variations varient (y compris selon les auteurs) entre 53 à 90 % [4]. A titre comparatif, un écoulement par charriage torrentiel n'excède pas les 40% [3].
- **Un mouvement d'apparence monophasique.** Contrairement aux écoulements avec transport solide par charriage, caractérisés par 2 phases distinctes d'écoulement, l'écoulement de laves torrentielles ne comporte au niveau macroscopique qu'une seule phase. L'aspect monophasique est dû à la forte teneur en matériaux grossiers ainsi qu'à la présence en quantité suffisante d'une matrice fine (cf. ci-après).
- **Une lubrification des contacts entre les grains via la présence d'une matrice fine** (particules de taille de 0,001 à 20 mm). La fraction fine joue un rôle primordial sur le comportement mécanique des écoulements (rhéologie, distance d'arrêt). Lorsque la fraction fine est présente en quantité suffisante, les contacts entre les particules grossières sont lubrifiés par la matrice : le comportement rhéologique est alors viscoplastique. A l'inverse, lorsque la fraction fine diminue, les particules grossières sont directement en contact les unes avec les autres (sous forme de frictions sèches) et le comportement devient alors granulaire.

Par ailleurs, l'écoulement d'une lave torrentielle est transitoire ; en effet, cette dernière est composée de différentes entités se faisant suite par « bouffées » successives et indépendantes. Elles possèdent des vitesses d'écoulement en moyenne comprises entre 1 et 15 m/s (dans les Alpes, supérieur dans certains cas et dans d'autre pays : Chine...), pour des hauteurs d'écoulement de l'ordre de quelques mètres au niveau du front de lave [3]. Ci-dessous un tableau récapitulatif des ordres de grandeur des caractéristiques discutées est proposé :

Tableau 29 : Ordre de grandeur des paramètres physiques et mécaniques d'un écoulement de lave torrentielle typique. (Source : Chambon et Laigle, 2013)

Paramètre	Valeur typique	Gamme de valeur
Hauteur au niveau du front (m)	3	0,5 - 10
Vitesse (m/s)	3	0,5 - 15
Volume (m ³)	50 000	1000 - 1 000 000
Masse Volumique (kg/m ³)	2300	1900 - 2500
Nombre de « bouffée »	-	1- 10

Une lave torrentielle est constituée de quatre entités distinctes [4] :

- **Le front de lave**, correspond à la partie la plus chargée en particules grossières. La concentration solide y est plus importante que dans le reste de l'écoulement du fait des processus de ségrégation et de migration. Il peut également être composé de corps extérieurs tels que des flottants ou des parties d'ouvrage. Ce dernier représente en générale la plus grande section d'écoulement d'une lave.

- **Le corps de lave** présente une quantité inférieure en blocs (ils sont noyés dans la matrice fine). Cette entité représente la plus grande partie du volume de la lave [3].
- **La queue de lave**, quant à elle, est moins chargée et la granulométrie qui la compose est plus fine, l'écoulement fait sa transition vers un état plus biphasique et turbulent [3].
- **Les bourrelets latéraux** sont de compositions assez proches du front de lave, ils encadrent de part et d'autre le corps de lave.

La concentration solide décroît spatialement d'aval en amont et il y a une évolution progressive vers un écoulement plus fluide depuis le front jusqu'à la queue de la lave. Une représentation schématique reprenant les entités évoquées est proposée ci-dessous :

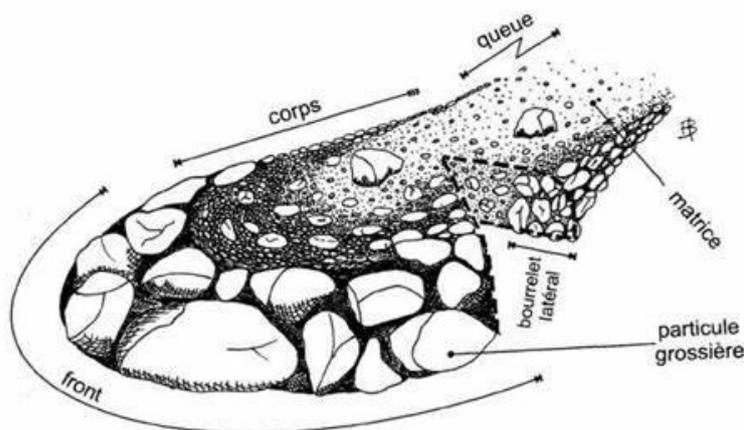


Figure 69 : Entités fonctionnelles d'une lave torrentielle (extrait de Bardou 2002 [1])

Les laves peuvent entraîner des débordements notamment au droit de sections aux capacités hydrauliques réduites (réduction de pente, section insuffisante) ou encore au niveau d'ouvrage de franchissement. Elles sont notamment susceptibles d'engendrer des obstructions locales (liées à la présence de blocs ou de flottants) accompagnées de débordements. Elles ont la particularité de pouvoir s'autochanaliser et peuvent détériorer des ouvrages par chocs avec le front de lave ou les bourrelets ; en revanche, elle possède un faible pouvoir érosif.



Figure 70 : Plage de dépôt du Piésan remplie suite à la lave de 2014

De ces différentes caractéristiques découlent des comportements physiques différents des écoulements d'eau claires, avec ou sans charriage. En effet dans le cas d'un torrent à lave, la hauteur d'écoulement atteinte au niveau d'une section est généralement peu dépendante du débit et de la période de retour de l'évènement. Ceci implique que le raisonnement habituel qui consiste à relier un niveau de protection à une hauteur d'écoulement, à un débit et à une période de retour, n'a pas de sens dans ce cas. En effet, la hauteur d'écoulement est beaucoup plus dépendante des caractéristiques intrinsèques de l'écoulement (comportement plus ou moins fluide/visqueux) : c'est la rhéologie des laves.

La principale caractéristique des laves torrentielles découle de leur caractère non Newtonien, c'est-à-dire qu'au contraire de l'eau, il n'y a pas de relation linéaire entre la vitesse de cisaillement et la contrainte de cisaillement.

De plus, les lois de comportement (relation entre vitesse et contrainte de cisaillement) font apparaître un seuil de début de mouvement. Le seuil de contrainte correspond à la contrainte nécessaire pour que le mouvement débute : on peut donc avoir une épaisseur importante de lave sur une pente significative, sans qu'il y ait de mouvement des matériaux.

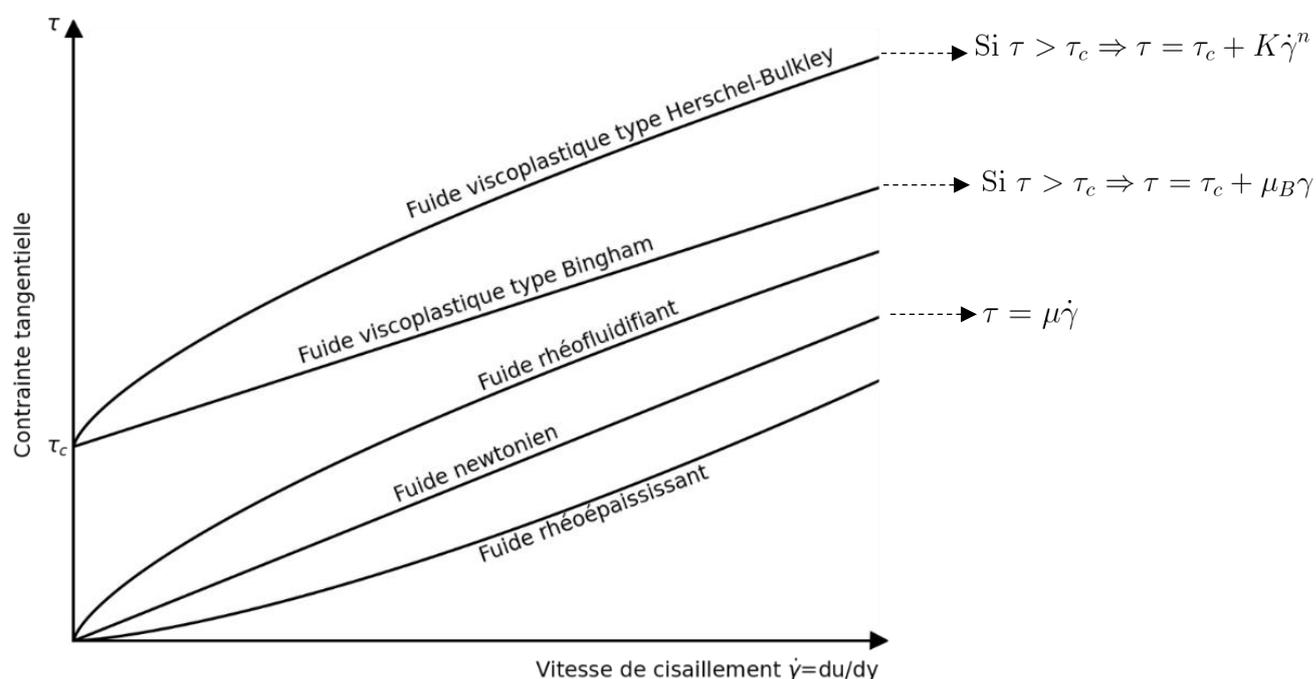


Figure 71 : Représentation graphique des principales lois de comportement des laves torrentielles (extrait de HEC-RAS Mud and Debris Flow Manual, 2020)

Les lois « hauteur = f(vitesse) » conduisent à une remarque essentielle : la hauteur de lave ne dépend quasiment pas du débit car la vitesse augmente très vite avec la hauteur. Le débit n'est alors pas un paramètre prépondérant, au contraire d'un écoulement d'eaux claires, avec ou sans charriage.

Des approches basées sur les lois de comportement des écoulements chargés en matériaux ont été développés notamment par Coussot [4] pour décrire l'écoulement des laves torrentielles.

Ainsi, les laves boueuses peuvent être représentées par un modèle de HERSHEY & BULKLEY :

$$\tau = \tau_c + K \frac{v^{1/3}}{y}$$

Avec

τ	Contrainte de cisaillement	K	Coefficient caractéristique du matériau
v	Vitesse de lave à la cote y	y	Distance depuis le fond
τ_c	Seuil de contrainte dépendant du matériau		

Ce type d'équation n'est valable que pour un mélange boueux avec une faible proportion de matériaux grossiers. On peut donc l'employer pour le corps de la lave. Par contre, il est sans signification pour le bourrelet frontal, composé de matériaux beaucoup plus granulaires et où la matrice d'éléments fins a un rôle nettement plus réduit.

L'ensemble de ces caractéristiques correspond aux laves torrentielles boueuses, avec une matrice fine très développée. Cependant, les laves torrentielles couvrent une large gamme de phénomènes avec notamment la formation de laves torrentielles granulaires. Ce phénomène est beaucoup plus rare dans les Alpes et n'est pas rencontré ici. Dans ce cas, un développement méthodologique spécifique est nécessaire.

Les laves « classiques » sont constituées d'une matrice fine bien plus importante que les écoulements de charriage ainsi des conditions géologiques particulières doivent être réunies pour permettre la formation des laves (présence de fines en quantité). Les matériaux plus grossiers sont extrêmement divers en granulométrie et sans aucun tri.

Une fois déposé, les laves sont donc très difficilement remobilisables car le mélange se cimente avec la matrice fine bloquant les matériaux grossiers.

4.1.3.2 Le charriage

Le charriage est un mode de transport solide régulièrement rencontré dans les rivières torrentielles et les torrents. Il correspond à un déplacement des sédiments par roulement et petits sauts des particules sur le fond du lit (écoulement biphasique contrairement au cas des laves torrentielles, décrit précédemment).

La capacité de transport solide d'un écoulement est directement liée à la taille des particules transportées, au débit et surtout à la pente du lit. Ceci implique que toute variation de pente sur le profil en long a des répercussions importantes sur les mécanismes de dépôt et d'incision.

Un seuil de contrainte de cisaillement doit être atteint pour la mise en mouvement des matériaux de fond. Le phénomène de charriage nécessite beaucoup d'énergie transportée par l'eau, il faut donc des conditions hydrologiques exceptionnelles qui ne se produisent que quelques jours par an.

Lors des crues, le profil en long et la morphologie du lit peuvent être rapidement modifiés (enfouissement, exhaussement, divagation ...). Ces évolutions morphologiques du lit ont donc une importance prépondérante dans la définition de l'aléa torrentiel, aussi bien pour déterminer les points de débordements (qui ont généralement lieu dans les secteurs d'engravement), mais aussi pour prendre en compte les phénomènes d'érosion et d'affouillement qui peuvent impacter les enjeux/ouvrages proches du lit.



Figure 72 : Illustration de crue torrentielle - Torrent de Morte à Tende (06) – Crue Alex 10/2020, (Source : RTM)



Figure 73 : Illustration de crue torrentielle - Tempête Alex – Commune de St-Martin Vésubie (06), (Source : RTM)

Pour résumer, les désordres dus aux crues avec charriage sont donc :

- Liés aux phénomènes d'engravement, avec des débordements (réduction de la section d'écoulement disponible, obstruction d'ouvrages) et de la divagation,

- Liés, au contraire, à des phénomènes d'affouillement lorsque les écoulements ne sont plus chargés à leur capacité maximale de transport solide, avec pour conséquence, des déstabilisation/érosions de berges et d'ouvrages.

Dans le cas de crues avec charriage, encore une fois, le lien entre hauteur d'écoulement et débit n'est pas évident, puisque celle-ci dépend généralement des niveaux d'engravement et donc de la concentration solide ainsi que de la durée de la crue.

4.1.3.3 Phénomène prépondérant

La morphologie du Piésan est caractéristique des bassins versants torrentiels avec des zones de fourniture en tête de bassin versant, des zones de transfert médianes et une zone de dépôt en aval (cône de déjection).

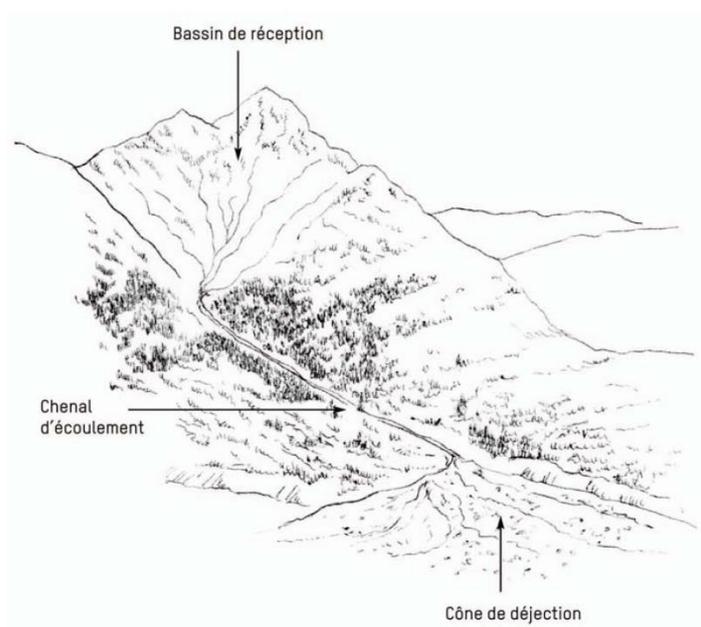


Figure 74 : décomposition schématique d'un bassin versant torrentiel (dessin N. Sardat. Source : Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement. A. Recking, D. Richard, G. Degoutte, coordinateurs)

Afin de caractériser la production sédimentaire du bassin versant, une approche permettant de qualifier le mode de transport est proposée :

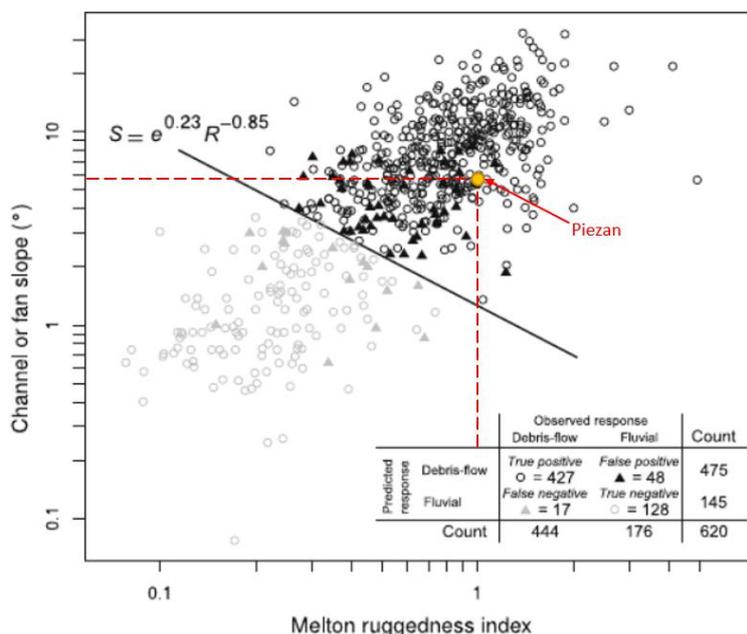


Figure 75 : Classification des torrents à laves et à charriage (Extrait de Debris-flow susceptibility of upland catchments M.Bertrand-F. Liébault-H.Piégay) [2]

La pente du Piésan sur son cône est en moyenne de 11% soit environ 6°, et l'indice de Melton est de l'ordre de 1. Ces chiffres positionnent très clairement le Piésan dans le domaine des torrents à laves d'après la classification de Bertrand [2].

Cependant, le mode de transport par charriage n'est pas à écarter totalement, comme cela a été vu dans l'historique des crues. Il est possible que les deux modes de transport se succèdent pendant une même crue. En outre, le charriage peut être marqué pour des crues de faible ampleur mais assez longues. De ce fait, les apports par charriage seront développés dans le paragraphe suivant.

4.1.3.4 Caractérisation des crues de charriage du Piésan

4.1.3.4.1 Hydrologie des crues de charriage

L'hydrologie est très bien caractérisée dans l'étude de 2010 [9] ; par ailleurs, l'EBR de 2014 [8] et l'EDD datant de 2019 [7], réalisées par le RTM/ONF, se basent sur ces mêmes résultats.

L'idée n'est donc pas de refaire les mêmes calculs mais plutôt de compléter l'analyse critique pour vérifier la cohérence de l'hydrologie retenue.

4.1.3.4.1.1 Débits de pointe retenus pour les crues par charriage

L'estimation des débits de pointe liquides des torrents et rivières de montagne est toujours un exercice délicat avec de très fortes incertitudes. En contexte torrentiel, et à la différence du domaine fluvial, il est très difficile de relier une période de retour à une valeur de débits de pointe donnée. L'aléa ne se réduit pas à un débit liquide mais à des multiples scénarios de débits liquides, solides (transport solide) et de flottants/gros blocs pouvant mener à des obstructions.

Pour nous adapter à cette difficulté, nous travaillons sur des fréquences d'apparition verbales auxquelles nous proposons de relier des périodes de retour approximatives n'ayant pas le même poids théorique qu'en contexte fluvial où chaque point d'un domaine d'étude peut être caractérisé par un couple hauteur/vitesse en fonction d'une période de retour donnée.

Etude de dangers du système d'endiguement du Piésan

Il ne s'agit pas de décliner tous les scénarios possibles de façon matricielle ce qui conduirait à une complexité trop grande et inexploitable dans le cadre des études à venir. Il faut que ces aléas aient une pertinence locale.

La détermination des aléas les plus pertinents pour la caractérisation du système d'endiguement se fait d'une part à partir des événements historiques recensés et de la connaissance du terrain, mais également à partir des paramètres physiques qui en sont à l'origine : morphologie du bassin versant, pluviométrie, fourniture sédimentaire...

Ce sont ces aléas qui serviront à construire les scénarios permettant d'évaluer la performance de l'endiguement face aux sollicitations imposées.

Tableau 30 : Fréquences d'événements de crue en contexte torrentiel

Fréquence verbale	Fréquent	Rare
Période de retour approximative	T ≤ 10 ans Généralement : T ≈ 10 ans	T > 50 ans Généralement : T ≈ 100 ans

Le tableau suivant retrace les débits provenant de l'étude RTM/ONF 2010 [9] qui seront conservés.

Tableau 31 : Débits de référence du Piésan

Fréquence	Débit de pointe liquide (Qi en m ³ /s)	Débit spécifique (m ³ /s/km ²)
Fréquent	4	1.6
Rare	10	4.1

Nous verrons par la suite que **les crues par charriage du Piésan ne sollicitent** (en termes de ligne d'eau atteinte) **que très faiblement le système d'endiguement**. Aussi, nous nous intéressons par la suite **uniquement à un événement rare de crue par charriage du Piésan**.

La probabilité de survenue d'un tel épisode est faible, compte tenu de l'historique de crue qui invite plutôt à s'intéresser aux laves torrentielles du Piésan, mais ceci est représentatif d'un événement orageux relativement peu intense mais prolongé survenant alors que le chenal amont du Piésan est encombré de matériaux.

4.1.3.4.1.2 Analyse des durées caractéristiques de crue

L'étude de 2010 du RTM/ONF [9] a décrit l'hydrologie du torrent du Piésan. Cette base a été reprise dans l'EDD de 2019 [7] et a permis de construire des hydrogrammes liquides associées à différentes crues. Le tableau suivant présente les durées de crues caractéristiques qui avaient été retenue dans l'EDD de 2019 [7] :

Figure 76 : Temps caractéristiques des crues dans l'EDD de 2019 [7]

	Crue courte	Crue longue
Temps de montée (h)	1h	3h
Durée de crue (h)	4h	7h

Les temps de montée retenus (paramètres servant à calculer les hydrogrammes) correspondent approximativement à 1/3 de la durée de crue caractéristique maximale calculée. Pour la suite, les résultats de l'EDD de 2019 [7] seront conservés en définissant deux crues respectivement courte et longue.

4.1.3.4.1.3 Hydrogrammes de crue liquide

A partir des éléments précédemment déterminés, il est possible de remonter à la construction d'hydrogramme de crue liquide. Pour ce faire, plusieurs approches sont utilisables ; il est proposé ici d'avoir recourt à la relation établie par le CEMAGREF présentée ci-dessous :

$$Q(t) = \frac{Q_{point\ e} \times 2 \times \left(\frac{t}{D}\right)^\alpha}{1 + \left(\frac{t}{D}\right)^{2\alpha}}$$

Figure 77 : Formule de débit instantanée du CEMAGREF

A partir de cette formule, il est alors possible de calculer la chronique de débit de différentes crues. Afin d'avoir une chronique cohérente avec les crues pouvant apparaître sur le bassin versant il a été considéré différents volumes d'évènement qui ont induit le calage du coefficient α . Les volumes visés sont ceux qui avaient été établis lors de l'EDD de 2019 [7] respectivement 62 000 m³ et 110 000 m³ pour la crue courte et la crue longue.

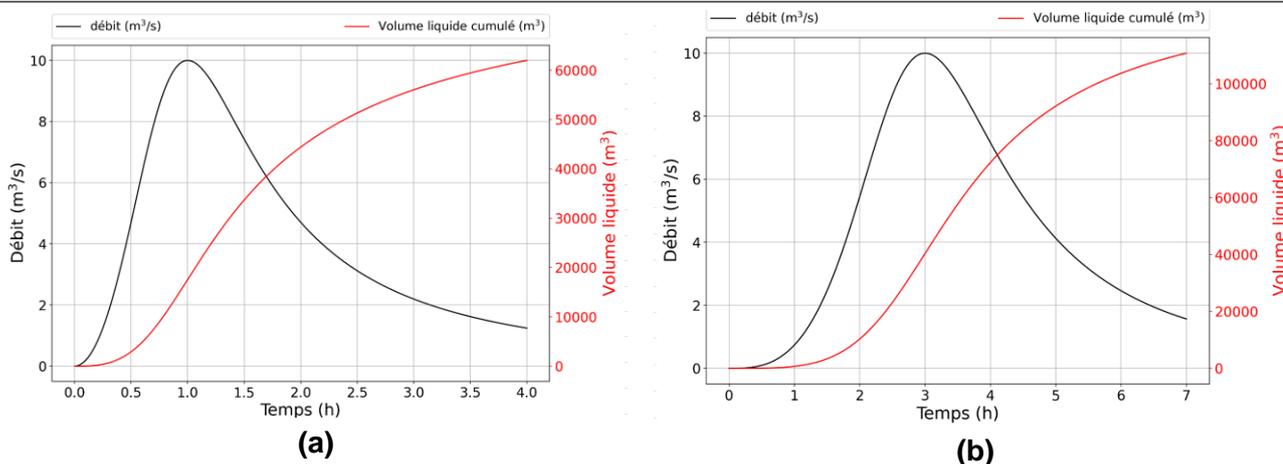


Figure 78 : Hydrogrammes liquides et volumes cumulés de la crue courte (a) et longue (b)

Cette démarche, certes très grossière mais pertinente compte tenu des incertitudes des phénomènes étudiés, permet de justifier de la cohérence des hydrogrammes retenus qui serviront ensuite au calcul des apports solides par charriage.

Pour les laves torrentielles, la dualité avec les précipitations n'est aucunement valide, une autre partie de ce rapport est dédié à la quantification de ces phénomènes si particuliers.

4.1.3.4.2 Estimation des apports par charriage

Le volume charrié du Piésan peut être approché par les formules empiriques de la littérature :

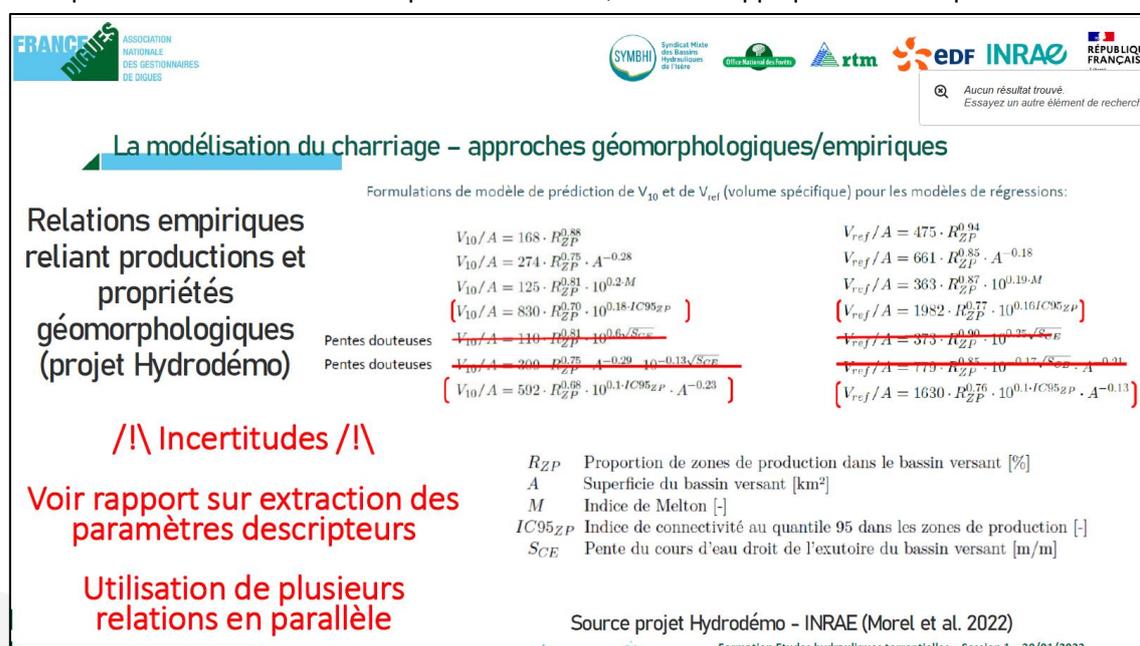
- La méthode ECSTReM (acronyme de « Estimation de la Charge Sédimentaire des Torrents par Régressions Multivariées ») développée par les services RTM/ONF et l'IRSTEA [Peteuil et Liebault, 2011] repose sur l'exploitation statistique des données de curage de plus de quarante plages de dépôt gérées par les services RTM/ONF. Pour le charriage, les descripteurs utilisés sont la superficie en érosion active connectée au réseau hydrographique (Sa) et la pente du lit à l'endroit considéré (I). Pour les laves, il s'agit de la superficie en érosion active et du Dénivelé spécifique (Dz).

Tableau 6. Modèles statistiques multivariés proposés pour prédire l'intensité de la fourniture en matériaux susceptible d'être produite par un torrent, où V_{100} est la production sédimentaire de période de retour centennale (m^3), V_{10} est la production sédimentaire de période de retour décennale (m^3), V_{max} est le volume maximum de la lave torrentielle (m^3), S est la surface totale du bassin (km^2), S_A représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique (km^2), I est la pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit du site étudié (m/m) et D_Z est la dénivelée entre les altitudes extrêmes du bassin versant (m).

Relation	Processus de transport prépondérant	Nombre de cas	$\frac{V_{calc}}{V_{est}}$	R^2	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Intervalle rassemblant 100% des valeurs estimées
					[2V/3;3V/2]	[V/2;2V]	
$V_{10} = 24000 \cdot S_A^{0,82} \cdot I^{0,50}$	Laves torrentielles et charriage	33	0,70	0,57	42	76	[V/3;5V/2]
$V_{100} = 112700 \cdot S_A^{0,93} \cdot I^{0,75}$		33	0,86	0,72	55	82	[V/5;5V/2]
$V_{10} = 0,457 \cdot S_A^{0,65} \cdot D_Z^{1,40}$	Laves torrentielles	28	0,75	0,91	75	89	[2V/5;5V/2]
$V_{100} = 0,40 \cdot S_A^{0,60} \cdot D_Z^{1,55}$		28	0,97	0,82	70	93	[V/3;2V]
$V_{max} = 0,013 \cdot S_A^{0,47} \cdot D_Z^{2,11}$		16	1,1	0,47	31	75	[2V/5;3V]

Figure 79 : ECSTREM, une approche pratique pour prédire la production sédimentaire des torrents des Alpes françaises (Christophe Peteuil, Frédéric Liébault, Olivier Marco) - 2012

- Les formules du récent projet HYDRODEMO [31] qui constitue une extension de la méthode ECSTREM sur d'autres cours d'eau des Alpes du Nord avec des superficies plus importantes et des pentes plus faibles. Ce projet a donné des relations empiriques reliant productions et propriétés géomorphologiques des bassins versants torrentiels. Le retour d'expérience et la formation organisée le 30 janvier 2023 par France Dignes a été l'occasion de préciser que les 3 premières formules sont les plus cohérentes ; nous les appliquerons donc par la suite.



La modélisation du charriage – approches géomorphologiques/empiriques

Formulations de modèle de prédiction de V_{10} et de V_{ref} (volume spécifique) pour les modèles de régressions:

Relations empiriques reliant productions et propriétés géomorphologiques (projet Hydrodémó)

/!\ Incertitudes /!

Voir rapport sur extraction des paramètres descripteurs

Utilisation de plusieurs relations en parallèle

Source projet Hydrodémó - INRAE (Morel et al. 2022)

Formation Etudes hydrauliques torrentielles – Session 1 – 30/01/2023

Figure 80 : Extrait du support de présentation de la formation études hydrauliques torrentielles organisée par France Dignes le 30 janvier 2023 [5] – Synthèse de l'utilisation des formules du projet Hydrodémó

Le tableau ci-après synthétise les résultats obtenus pour une crue rare du Piésan à son exutoire. L'encadrement [3000 m^3 ; 7000 m^3] paraît satisfaisant (bien que dans la tranche basse de valeur conservée dans l'EDD de 2019).

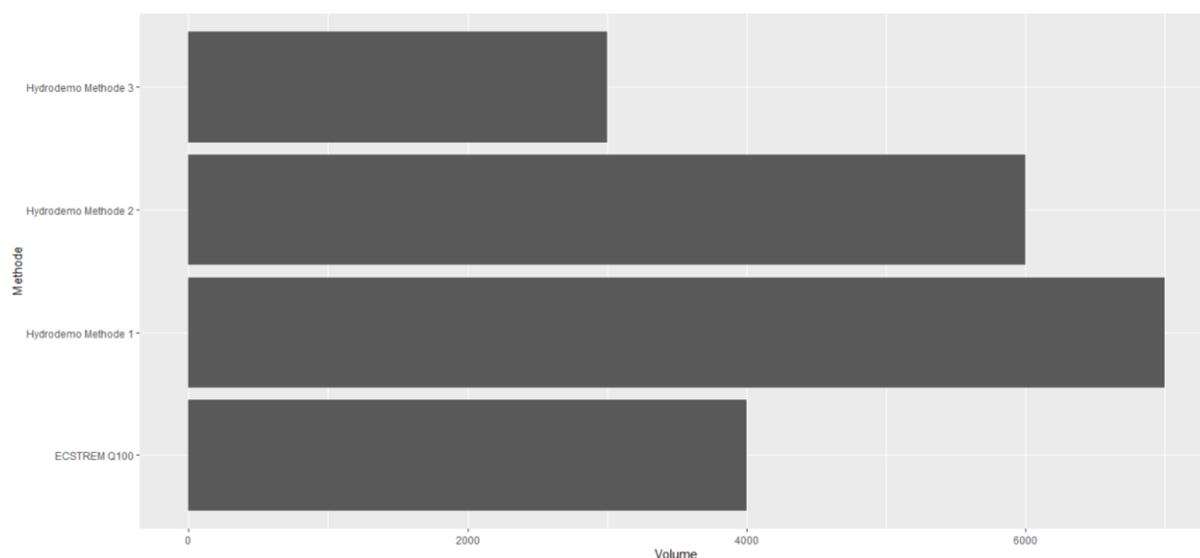


Figure 81 : Synthèse des estimations d'apports solides par charriage pour une crue rare du Piésan (approche empirique)

- L'estimation peut aussi être faite à partir d'une formule de transport solide. En considérant une pente d'apport, une géométrie de lit, une granulométrie et en associant un hydrogramme de crue, il est possible de déterminer un volume solide transitant. On raisonne en capacité maximale de charriage, en faisant l'hypothèse que la ressource en matériaux n'est pas limitante.

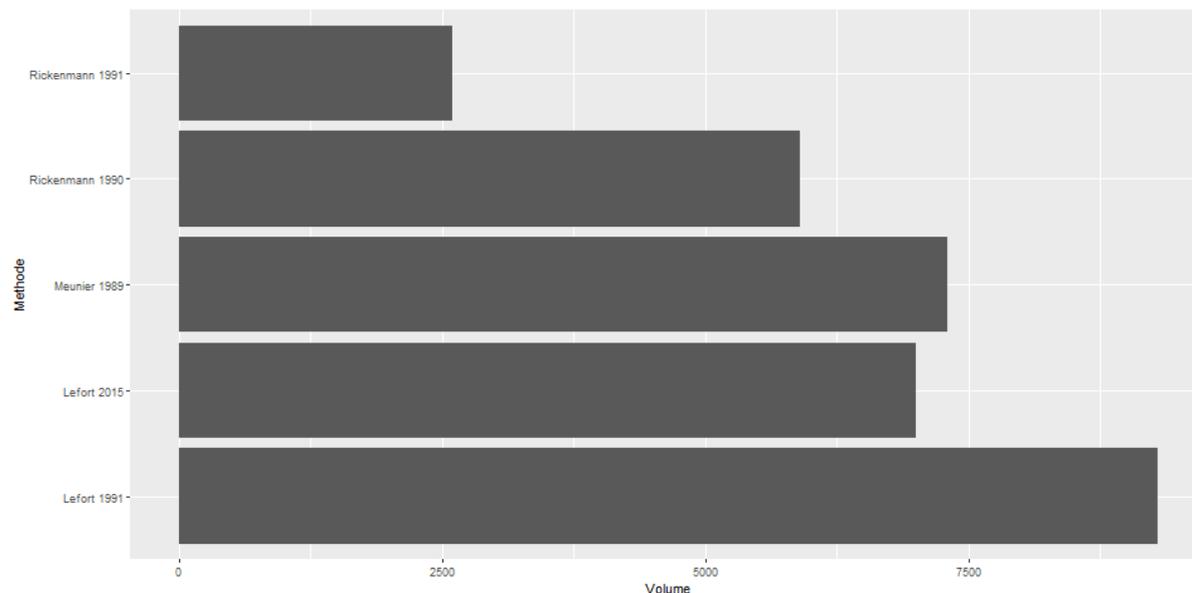


Figure 82 : Synthèse des estimations d'apports solides par charriage pour une crue rare du Piésan (approche capacité de transport)

Les différentes approches conduisent à fournir des résultats compris dans l'encadrement [2000 ; 8500 m³] ce qui coïncide avec la valeur de volume de matériaux qui avait été conservé par l'EDD de 2019 [7] (7000 m³) pour un évènement rare du Piésan. Cette valeur sera conservée pour la suite de l'étude.

A partir du volume de matériaux précédemment déterminé, il a été fait le choix de représenter deux types de crues rares avec charriage en faisant varier la durée de la crue. A volume solide équivalent, les pentes d'apports ainsi que les durées et temps de montée ont été modifiés. Ceci est fait pour tenter d'encadrer le comportement attendu pour ce type de crue.

Les figures ci-dessous reprennent les hydrogrammes solides et liquides conservés pour représenter ces crues :

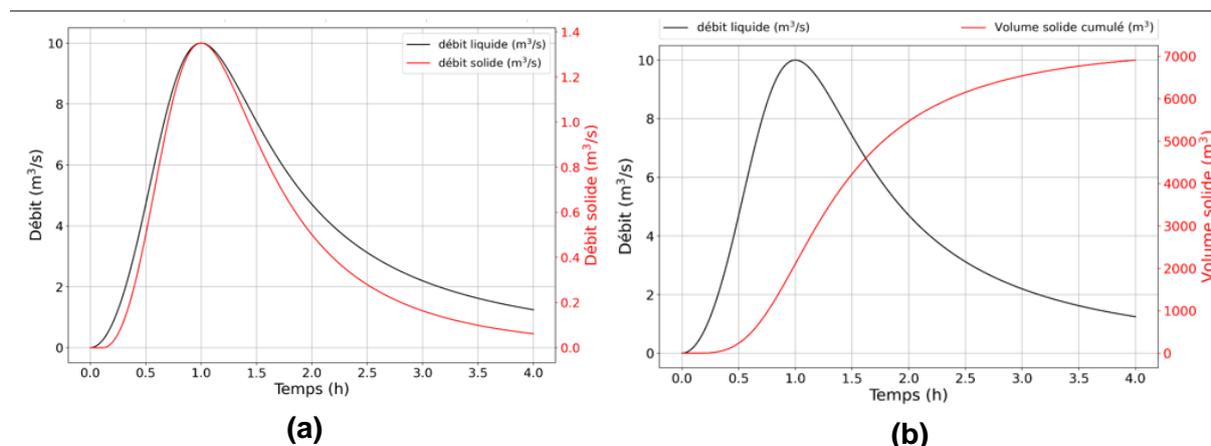


Figure 83 : Hydrogrammes (a) et volumes cumulés (b) d'une crue de charriage courte, pour un événement rare

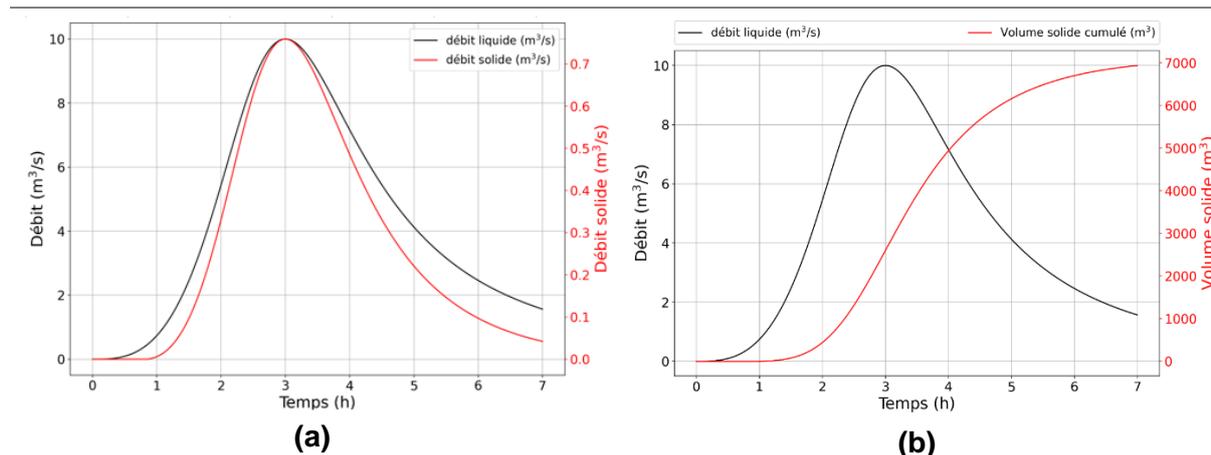


Figure 84 : Hydrogrammes (a) et volumes cumulés (b) d'une crue de charriage longue, pour un événement rare

4.1.3.4.3 Hypothèses et loi de comportement du charriage

La pente amont très importante ainsi que l'encaissement du lit du Piésan font que des dépôts massifs de charriage pouvant engendrer des divagations en dehors du lit mineur sont improbables et ne seront pas étudiés.

La première approche utilisée pour quantifier les apports solides est basée sur l'hydrologie définie. Nous appliquons la formule de Lefort sur les hydrogrammes calculées du Piésan. Comme pointé précédemment, utiliser directement cette méthode pour ce type de torrent conduit à être vigilant, car le calage de la pente d'apport est très délicat sur des torrents sans zone alluvionnaire développée. Or il s'agit du paramètre le plus important avec l'hydrologie. Par comparaison, le choix de granulométrie n'a qu'une incidence mineure sur les résultats de volumes charriés.

L'approche proposée ici est de retrouver un ordre de grandeur de pente d'apport permettant d'obtenir des volumes de matériaux cohérents avec les approches calculatoires empiriques, ECSTREM et HYDRODEMO, présentées précédemment. Cette approche est largement critiquable et les résultats sont à considérer avec du recul, bien que nous le verrons par la suite, l'enjeu des crues de charriage du Piésan n'est pas prépondérant.

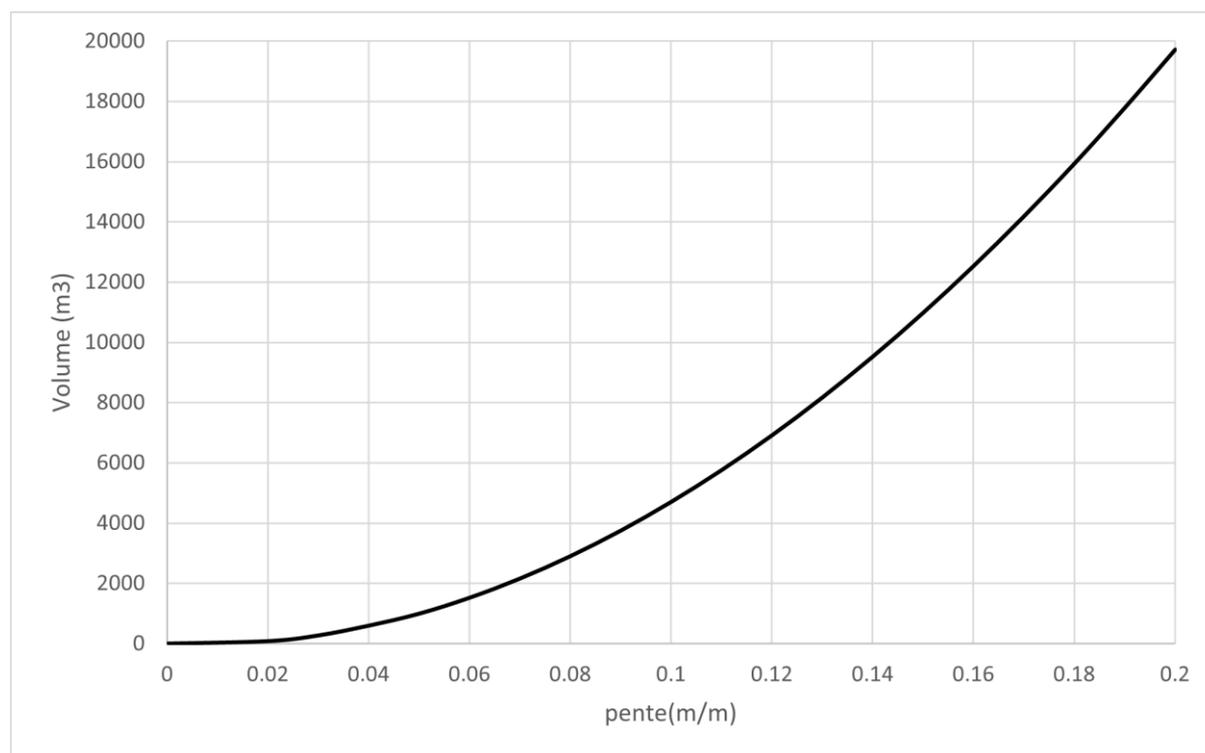


Figure 85 : apports solides par charriage (cruce courte) du Piésan en fonction de la pente d'apports pour une crue rare (10 m³/s)

Pour la valeur retenue de 7000 m³, et pour les deux longueurs de crues proposées, la pente d'apport à retenir pour la formule de Lefort se situe dans l'encadrement [9 % ; 12 %]. On peut ainsi se permettre d'appliquer la formule de Lefort pour obtenir des hydrogrammes solides et modéliser les dépôts solides pouvant se produire sur une crue de charriage du Piésan.

Le tableau suivant synthétise les paramètres utilisés pour définir les crues rares de charriages :

Tableau 32 : Table de valeurs des deux scénarios de crues rares de charriages

	Scénario 1 : Crue courte	Scénario 2 : Crue longue
Occurrence événement	Rare	Rare
Débit de pointe liquide [m ³ /s]	10	10
Durée de crue [h]	4	7
Temps de montée[h]	1	3
Volume liquide [m ³]	62 000	110 000
Volume solide (flux entrant) [m ³]	7 000	7 000
Concentration volumique [%]	10	6
Pente d'apport [%]	12	9

4.1.3.4.4 Outil de modélisation

Afin d'étudier les scénarios de charriage, un outil de modélisation 1D (EVOFOND) est utilisé. EVOFOND est un code de calcul développé au cours de l'année 2018 dans le cadre d'une action méthodologique du réseau technique national RTM/ONF (KUSS et QUEFFELEAN) et ayant pour objectif la modélisation 1D de l'évolution systématique du niveau du fond de lit au cours d'une crue torrentielle avec charriage ou charriage hyperconcentré. Ce code résout l'équation de conservation de la masse d'Exner couplée à une formule de transport solide par charriage adaptée aux cours d'eau à forte pente avec des sections rectangulaires. Les calculs de débits solides aux interfaces avec chaque maille peuvent être effectués avec différentes lois de transport adaptées au contexte de montage

(Meunier, Rickenmann, Piton et Recking, Lefort...) (Source EVOFOND v0.32, 2019). Cet outil nécessite de renseigner en entrée :

- Un profil en long, qui est dans cette étude établi partir du MNT de projet (2021+plan du Projet sur la partie aval) puis simplifié en gardant les points durs du torrent et des pentes représentatives des différents tronçons ;
- Un hydrogramme de crue conçu à partir des éléments précédemment présentés ;
- La géométrie du lit (pente d'apport et largeur du lit) ;
- Une granulométrie.

Comme décrit dans le paragraphe précédent, à l'aide de ces données d'entrées, un hydrogramme solide est reconstitué à partir d'une formule de transport solide. Dans cette étude, il est retenu la formule de Lefort de 2015. L'évolution du profil en long est calculée par maille selon une discrétisation temporelle. L'étendue du modèle s'étend de l'amont du pont de la route forestière jusqu'à la confluence avec le Biel.

4.1.3.4.5 Résultats des scénarios de charriage modélisés : crues rares, courtes et longues, du Piésan

Le modèle a permis de tester différentes simulations de charriage sur un évènement rare du Piésan. Le fond a été considéré comme étant inafouillable au regard des différents aménagements sur le torrent (radier, seuil). Ces simulations ont permis de constater que le charriage était un phénomène bien secondaire par rapport aux laves torrentielles, dans la sollicitation des endiguements du Piésan.

Il est proposé ici de présenter les résultats de la crue étudiée la plus forte, à savoir :

- Scénario C1 : une crue rare, courte (4h) du Piésan (T~100ans) : fourniture de 7 000 m³ de matériaux selon les hydrogrammes donnés précédemment ;
- Scénario C2 : une crue rare, longue (7h) du Piésan (T~100ans) : fourniture de 7 000 m³ de matériaux selon les hydrogrammes donnés précédemment.

4.1.3.4.6 Crue rare – scénario C1 : crue courte

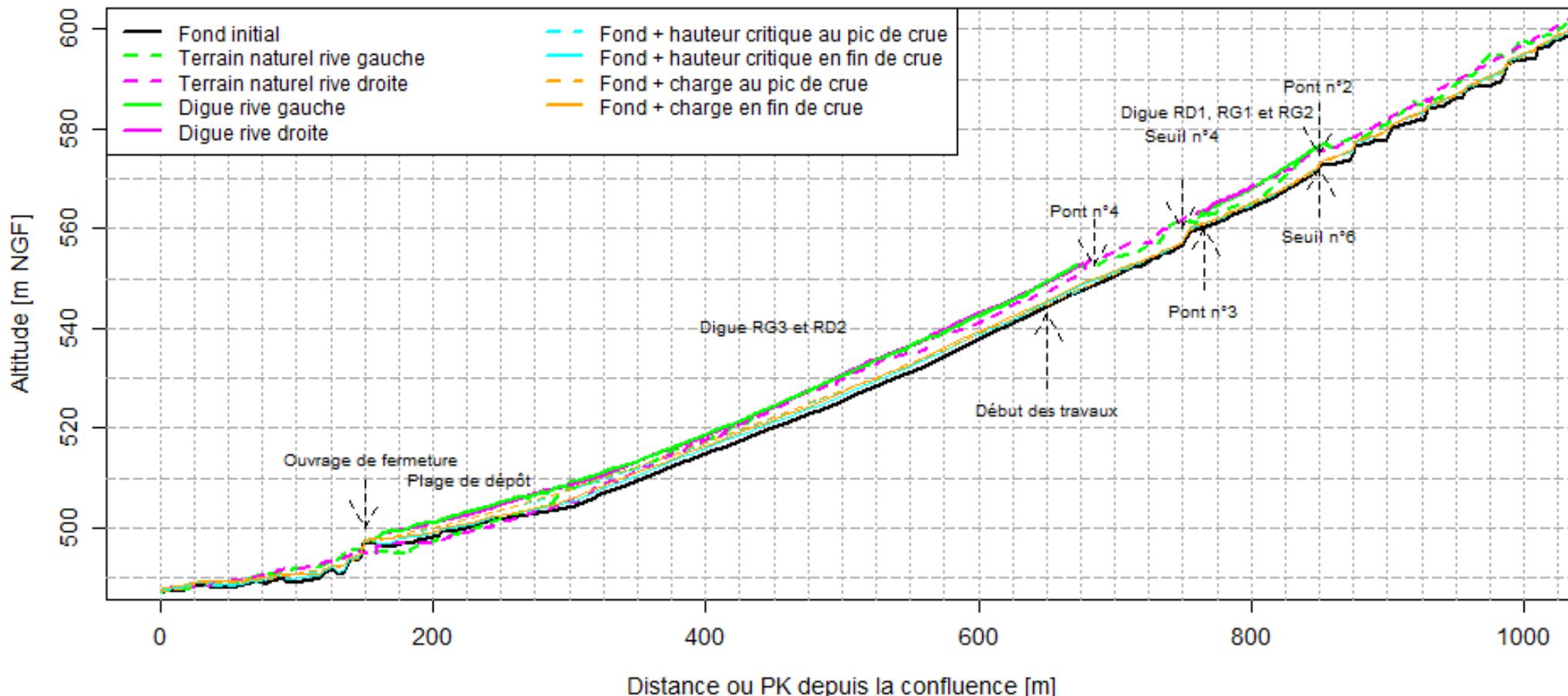


Figure 86 : Profil en long global de l'écoulement du scénario C1 – crue rare courte

- Tronçon RG_TH1, RG_TH2 et RD_TH1 (état actuel) : On observe quelques dépôts sur les zones de replat au droit du tronçon mais les hauteurs atteintes demeurent faibles (valeurs comprises entre 10 et 40 cm). **Il n'y a pas de sollicitation des digues pour ce type de crue**, le risque de surverse est très faible voir nul, y compris au droit des ouvrages de franchissement.

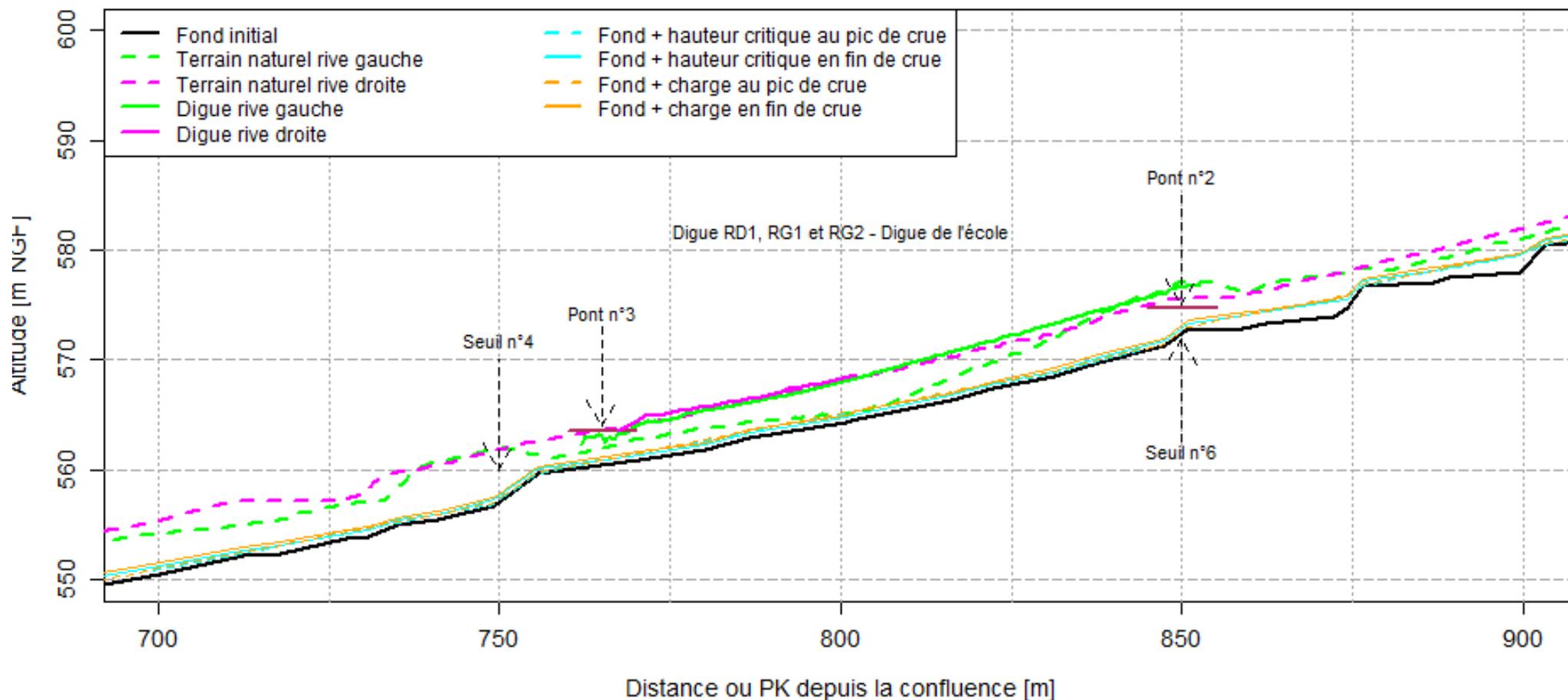


Figure 87 : Profil en long des niveaux atteints entre le pont n°2 et le pont n°3 pour le scénario C1 – crue rare courte

- Tronçon RG_TH3 et RD_TH2 (état projet) : Les processus sur ce linéaire se décomposent de deux manières, en amont on observe une incision du fond du lit aujourd'hui, pendant qu'en aval on observe un dépôt directement en lien avec la présence de la plage de dépôt en aval. **Quoiqu'il en soit, le risque de surverses reste très limité. Le processus érosif en amont, qui pourrait déstabiliser le lit du torrent et l'endiguement sur ces rives, sera géré par les travaux prévus.**

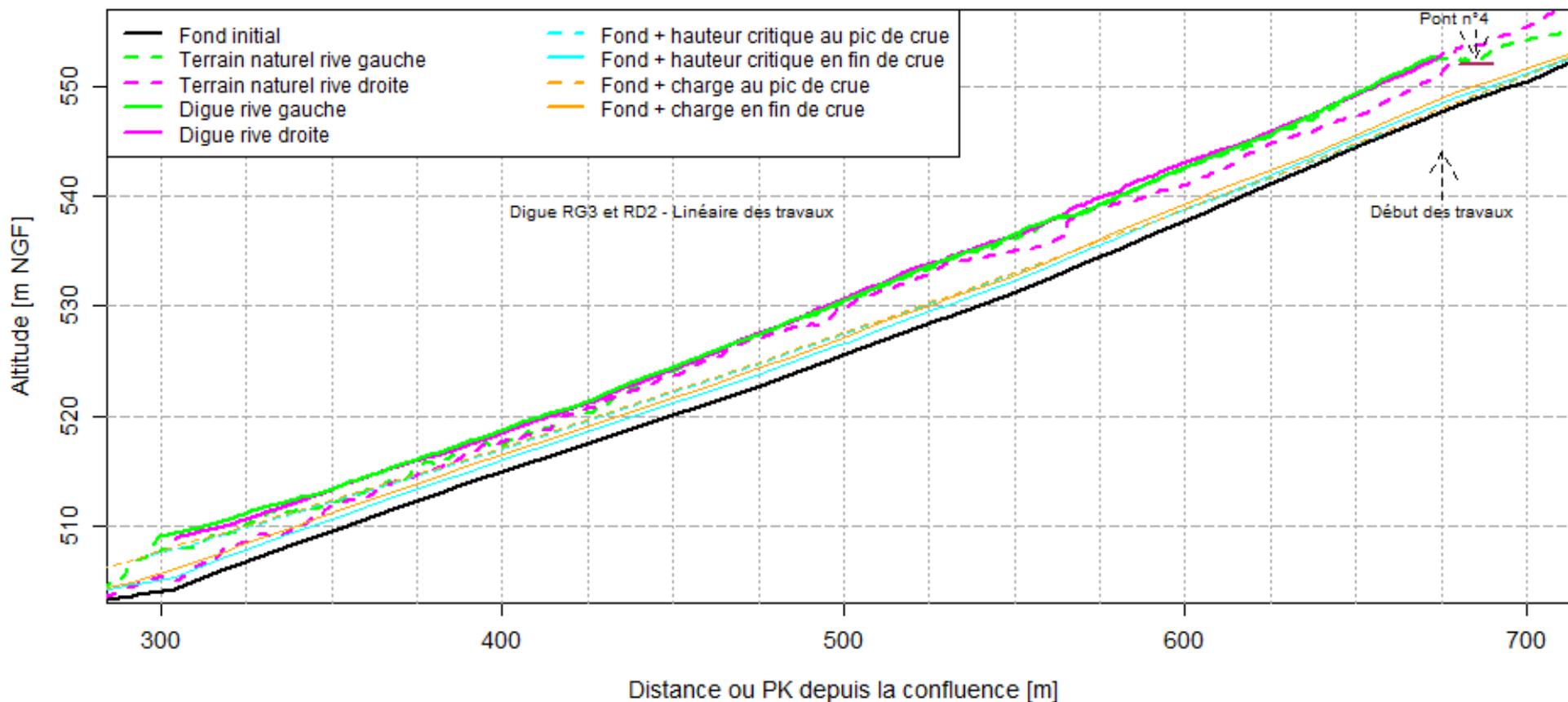


Figure 88 : Profil en long des niveaux atteints en aval du pont n°4 (secteur des travaux) pour le scénario C1 – crue rare courte

4.1.3.4.7 Crue rare – scénario C2 : crue longue

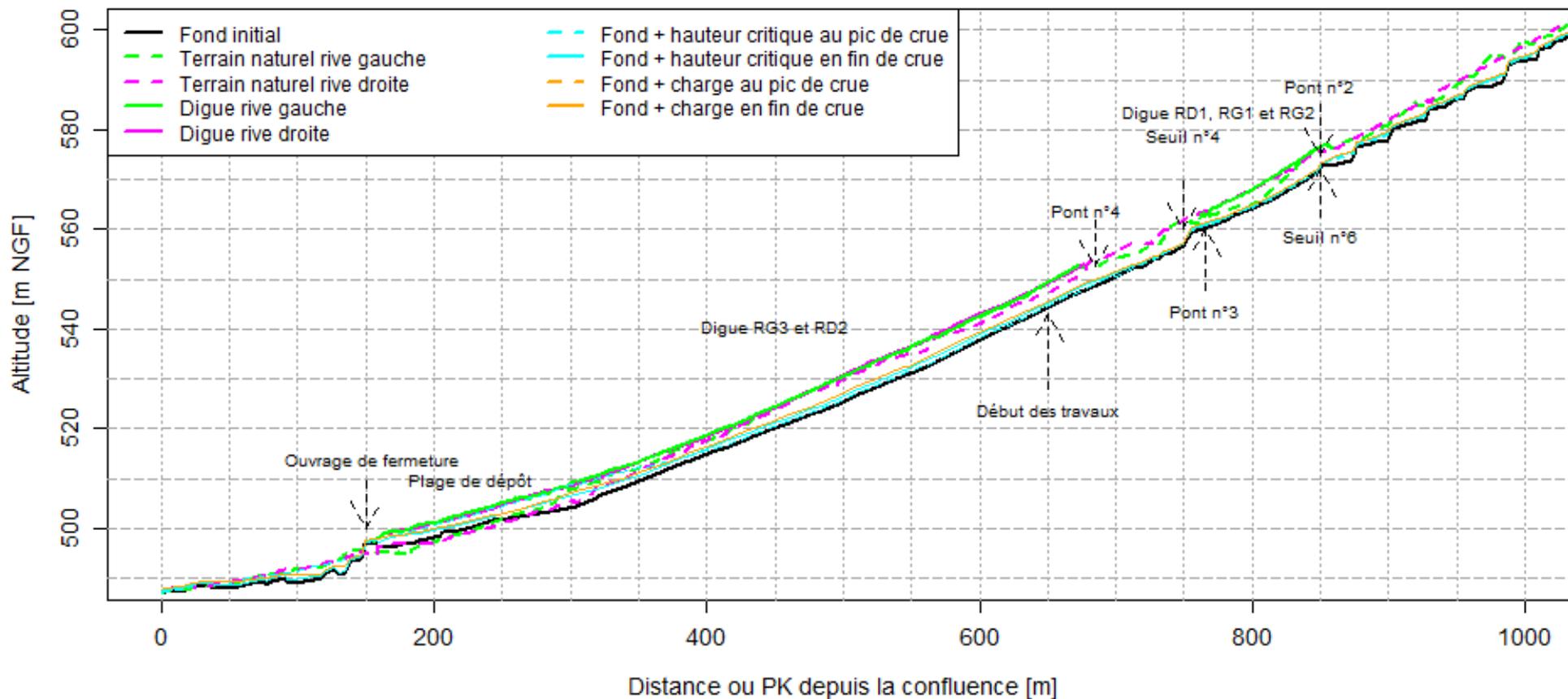


Figure 89 : Profil en long global de l'écoulement du scénario C2 – crue rare longue

- Tronçon RG_TH1, RG_TH2 et RD_TH1 (état actuel) : Le même constat que précédemment est observable. Les dépôts se font en moins grande quantité sur ce linéaire que pour une crue courte (cela s'explique par l'hypothèse de volume d'apport fixe avec variation de la pente d'apport). Les digues ne sont pas sollicitées par l'écoulement et les revanches sous les ouvrages de franchissement sont assez importantes.

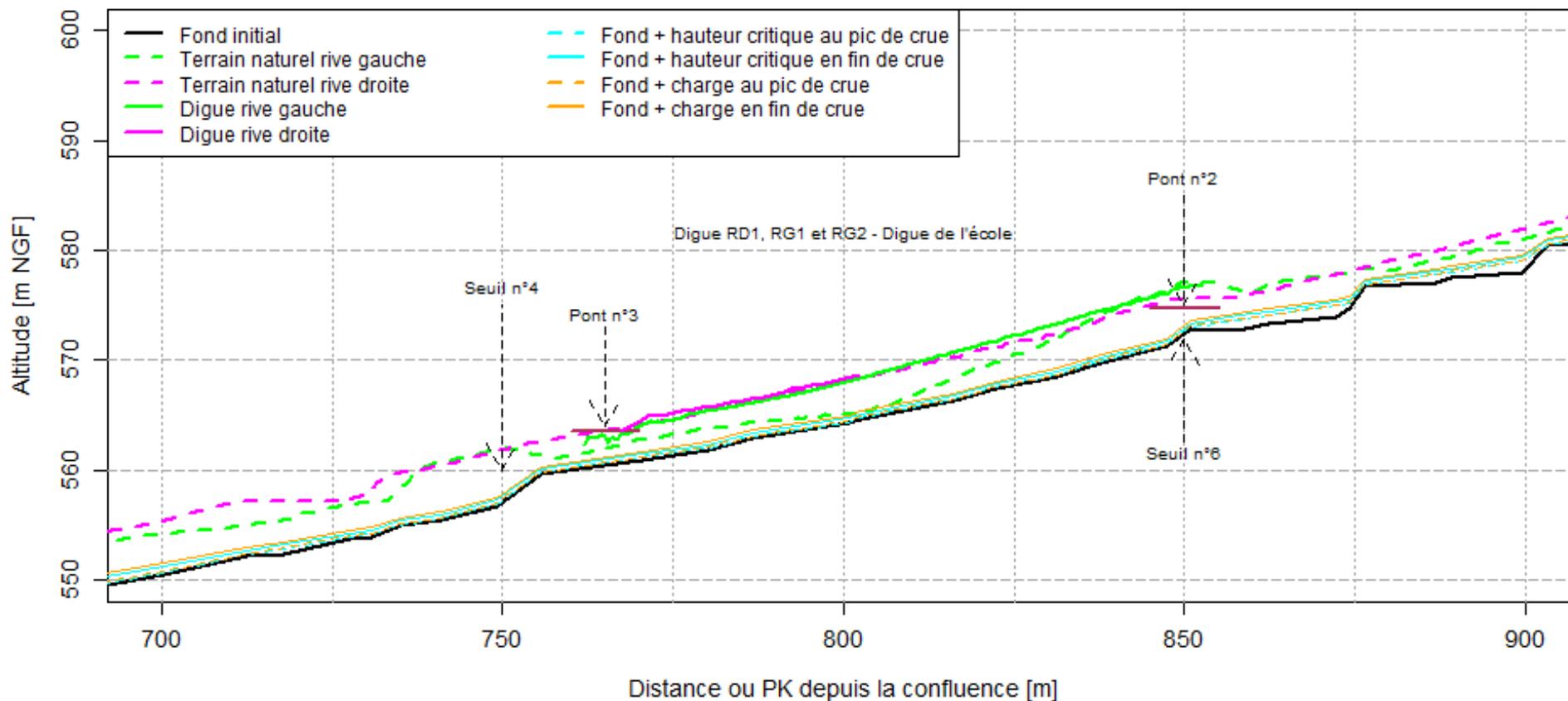


Figure 90 : Profil en long des niveaux atteints entre le pont n°2 et le pont n°3 pour le scénario C2 – crue rare longue

- Tronçon RG_TH3 et RD_TH2 (état projet) : Sur ce tronçon, on retrouve des profils plus proches de ceux que l'on a pu observer avec les crues courtes. Des dépôts apparaissent au droit du pont n°4 (sans causer de risque de surverse, la revanche reste suffisante). Plus en aval on obtient de nouveau une zone de dépôt influencée par la plage de dépôt. Le risque de surverse est un peu plus marqué en aval du tronçon sans pour autant être trop important.

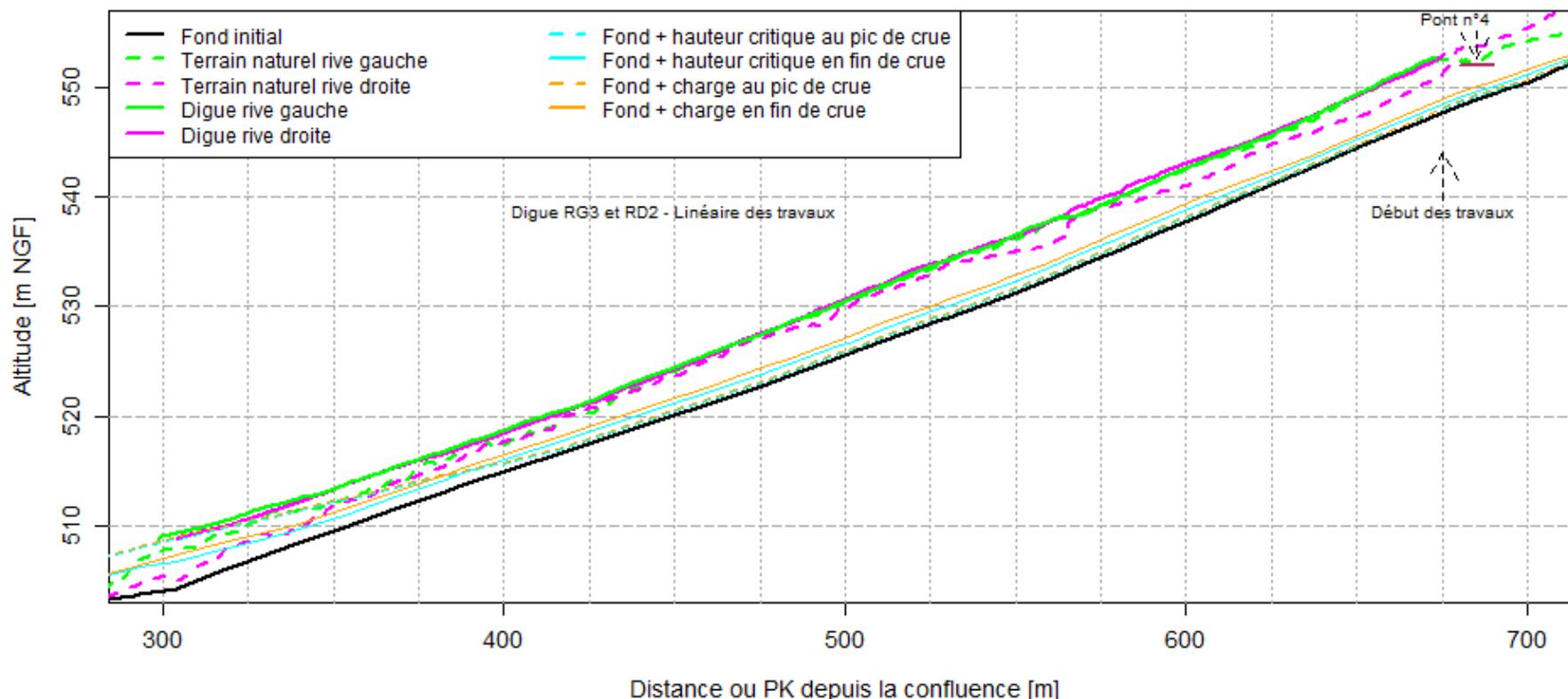


Figure 91 : Profil en long des niveaux atteints en aval du pont n°4 (secteur des travaux) pour le scénario C2 – crue rare longue

4.1.3.4.8 Analyse des conditions d'écoulement sur le cône de déjection – caractérisation des risques de débordement

4.1.3.4.8.1 Risques de débordement liés à l'obstruction des franchissements

Les ouvrages de franchissement sont régulièrement limitants vis-à-vis des crues. Il est ainsi proposé d'apporter une analyse sur la revanche obtenue (théoriquement, par le modèle) entre la hauteur maximale d'écoulement (comprenant également l'engravement pouvant apparaître, mais sans potentiels flottants) et la cote de sous-poutre des ponts. Le tableau synthétise les revanches obtenues ci-dessous.

Tableau 33 : Revanche sous les ouvrages de franchissement lors d'une crue de charriage longue

	Pont 2	Pont 3	Pont 4
	Ponceau agricole	Pont de la route communale	Pont de la route départementale
Revanche crue courte (m)	1.5	1.3	0.9
Revanche crue longue (m)	1.8	1.5	1.2

La conclusion pour ce type d'écoulement est en accord avec les observations faites sur les profils : moins de dépôts sur les parties amont ce qui implique des revanches plus importantes. Il semble que, y compris au droit des ouvrages traversant, le risque d'embâcle et donc de débordement soit peu probable pour ce type d'aléa.

4.1.3.4.8.2 Risques de débordements liés au dépassement de la capacité du lit du torrent

L'analyse plus précise du profil en long permet d'identifier que les revanches sont très importantes entre les niveaux d'eau/matériaux maximum atteints et les crêtes des digues pour le scénario de charriage.

Tableau 34 : Revanche (entre hauteur maximale atteinte par la crue de charriage et crête de digue) relevée au droit des différents tronçons au point le plus défavorable

	RG_TH1	RG_TH2	RD_TH1	RG_TH3 et RD_TH2
Revanche scénario C1 crue courte (m)	1.9	1.7	1.75	0.8
Revanche scénario C2 crue longue (m)	2	1.8	1.85	0.7

4.1.3.4.8.3 Synthèse du fonctionnement torrentiel pour les scénarios de charriage du Piésan

Au regard des résultats, et même en conservant les incertitudes associées, il apparaît que les ouvrages du système d'endiguement du Piésan ne sont pas mis en charge pour ce type d'évènement.

Le risque d'accrochage des ponts est également très faible.

L'érosion est très forte sur ce type de scénario, mais le pavage de fond de lit du Piésan en état actuel, et dans le cadre des travaux futurs, permettra de limiter ce risque.

4.1.3.5 Caractérisation des laves torrentielles du Piésan

Afin de caractériser cet aléa, le recours à l'hydrologie liquide n'est pas conservé. En effet, il n'y a aucune relation évidente entre les eaux de ruissellement et les volumes de laves torrentielles (le volume des laves torrentielles est souvent plus dépendant de la quantité de matériaux disponible). Il a donc été utilisé des formules construites sur la base d'événements majeurs observés sur des bassins versants similaires.

L'EBR du RTM/ONF [8] donne un encadrement de volume compris entre 1 500 m³ pour une crue très fréquente jusqu'à 20 000 m³ pour une crue exceptionnelle.

Nous appliquerons ici l'ensemble des formulations empiriques les plus adaptées pour quantifier les volumes de laves torrentielles en fonction des paramètres morphologiques du bassin versant, et vérifier ainsi les ordres de grandeur proposés par le RTM/ONF.

4.1.3.5.1 Estimations empiriques des volumes de laves torrentielles

Il existe plusieurs méthodes pour quantifier le volume d'apport de lave torrentielle :

- Approche statistique à partir des données de curages ;
- Approche globale sommaire ;
- Méthode hydrodém, ECSTREM...

L'étude hydraulique du RTM/ONF datant de 2010 avait exploité d'ores et déjà les deux premières méthodes ; il est proposé de compléter cette analyse avec l'application des méthodes ECSTREM et Hydrodemo. Les figures suivantes présentent les résultats obtenus :

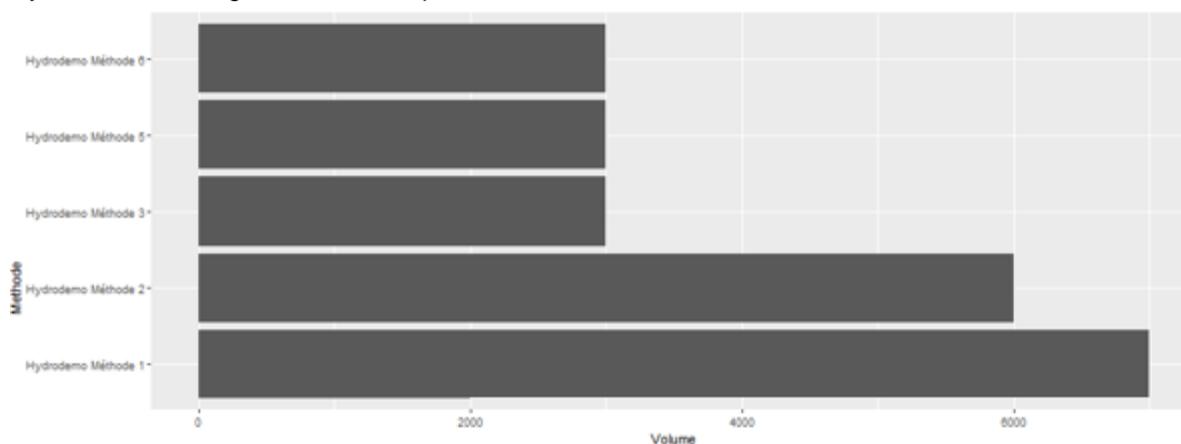


Figure 92 : synthèse des estimations empiriques de volumes de laves rares sur le Piésan

Tableau 35 : Tableau de valeur des volumes obtenus avec les formules ECSTREM

Rareté de l'évènement	Formule	Volume (m ³)
Fréquent	$V = 0.457 \times A_{zp}^{0.65} \times D_z^{1.4}$	4 000
Rare	$V = 0.4 \times A_{zp}^{0.5} \times D_z^{1.55}$	12 000
Exceptionnel	$V = 0.013 \times A_{zp}^{0.47} \times D_z^{2.11}$	30 000

Nous utilisons également les 3 formules d'Hydrodemo pour les laves rares, présentées précédemment au paragraphe 4.3.2.2.

$V_{ref}/A = 475 \cdot R_{ZP}^{0.94}$ $V_{ref}/A = 661 \cdot R_{ZP}^{0.85} \cdot A^{-0.18}$ $V_{ref}/A = 363 \cdot R_{ZP}^{0.87} \cdot 10^{0.19 \cdot M}$	<p>R_{ZP} Proportion de zones de production dans le bassin versant [%]</p> <p>A Superficie du bassin versant [km²]</p> <p>M Indice de Melton [-]</p> <p>IC_{95ZP} Indice de connectivité au quantile 95 dans les zones de production [-]</p> <p>S_{CE} Pente du cours d'eau droit de l'exutoire du bassin versant [m/m]</p>
---	---

Figure 93 : Extrait du support de présentation de la formation études hydrauliques torrentielles organisée par France Dignes le 30 janvier 2023 [44] – Synthèse de l'utilisation des formules du projet Hydrodemo

Les valeurs obtenues sont légèrement supérieures à celles retenues dans l'étude hydraulique de 2010 mais restent dans la même gamme de valeur ; nous proposons donc de conserver ces mêmes valeurs. L'écart peut s'expliquer par l'incertitude quant aux paramètres conservés pour le calcul (notamment la surface du bassin versant en érosion active).

Pour la suite de l'étude, les valeurs suivantes seront conservées :

Tableau 36 : Tableau de valeur des paramètres des hydrogrammes de crues des laves torrentielles

Rareté de l'événement	Fréquent	Rare
Fréquence approximative	10 ans	100 ans
Volume de la coulée (m ³)	2 500	10 000

4.1.3.5.2 Hydrogrammes

Afin de simuler le passage de ces laves, nous avons besoin de définir des débits de pointe même si ce paramètre n'est pas le plus déterminant dans les calculs à contrario des paramètres rhéologiques qui régissent le comportement des laves (hauteurs d'écoulement, pente critiques...).

Nous utilisons la méthode de l'hydrogramme triangulaire sur la base d'une durée courte de T = 25 minutes (temps de montée 12.5 min pour un événement rare) permettant de définir les débits $Q = 2 \times V / T$ avec V les volumes de laves précédents.

Au regard des très grosses incertitudes sur les phénomènes estimés, nous nous permettons d'arrondir les résultats à 5 m³/s près ce qui donne les débits suivants :

Tableau 37 : Débit de pointe des laves torrentielles conservé en fonction des fréquences d'apparition approximatives

Rareté de l'événement	Fréquent	Rare
Débit (m ³ /s)	10	30

4.1.3.5.3 Transport de gros blocs et flottants

Le bassin versant du Piésan est extrêmement boisé, et les phénomènes naturels (crues, avalanches) permettent le transport de gros bois.

Le transport des flottants lors des crues augmente les risques de débordements principalement au niveau des ouvrages de franchissement, en lien avec les risques d'accrochage des tabliers des ponts.

La problématique d'obstruction réside principalement dans la présence d'embâcles et éventuellement la présence de gros blocs isolés (métriques) pouvant être emportés par les laves et bloquer les ouvrages.

Ces gros blocs et/ou flottants sont transportés en front de lave. La très forte incertitude de la hauteur de ce front de lave impose une prise de recul et une approche qualitative faisant suite aux modélisations.

4.1.3.5.4 Hypothèses et loi de comportement

4.1.3.5.4.1 Loi de comportement conservé pour la modélisation de l'écoulement des laves torrentielles

Les écoulements de laves torrentielles boueuses (corps de laves torrentielles) sont décrits comme des fluides à seuil non-newtoniens [33]. Pour des fluides newtoniens, il existe une relation linéaire entre contrainte de cisaillement et vitesse de cisaillement. Dans le cas de laves torrentielles boueuses, les actions internes au fluide vont avoir pour effet de générer un seuil de contrainte à dépasser pour pouvoir observer une mise en mouvement du fluide. D'autre part, au-delà du seuil de contrainte, il n'existe pas de relation linéaire entre contrainte de cisaillement et vitesse de cisaillement.

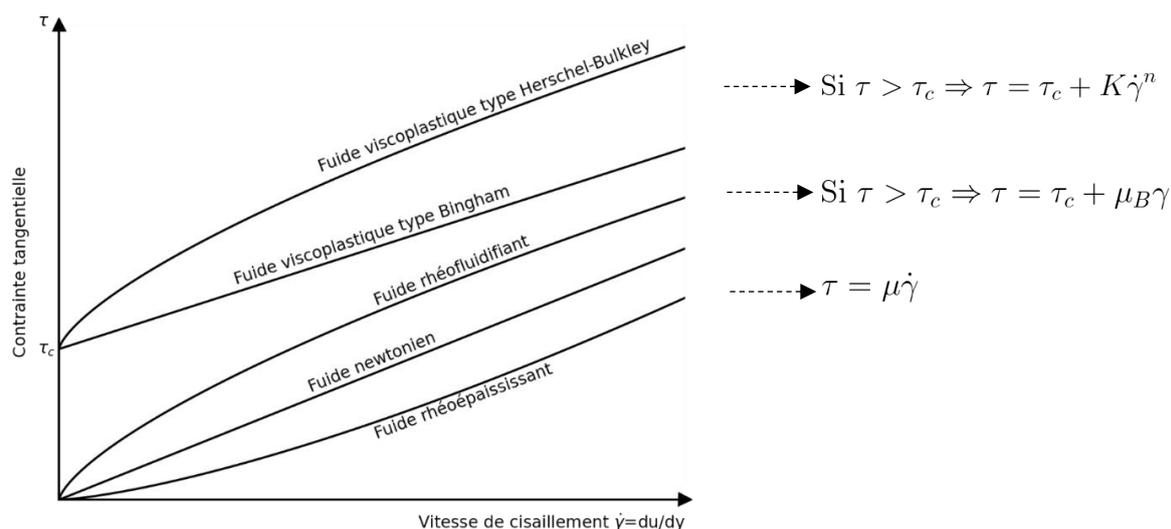


Figure 94 : Représentation graphique des principales lois de comportement des laves torrentielles (extrait de HEC-RAS Mud and Debris Flow Manual, 2020 [30])

Dans le cas des laves torrentielles, plusieurs lois peuvent être utilisées. Celles-ci correspondent toutes à des développements de lois de comportement pour des fluides non-Newtonien. Seules les lois viscoplastiques sont décrites ici. Ce sont des lois qui relient la contrainte tangentielle avec une contrainte seuil ainsi qu'avec un terme de viscosité (pas forcément homogène à une viscosité) multipliée par le taux de cisaillement (à différente puissance). Ce sont des lois en général utilisées pour décrire le comportement des laves boueuses [33].

Tableau 38 : Expressions des principales lois de comportement représentant les laves torrentielles

Modèle	Expression	Commentaire
Bingham	$\tau = \tau_c + \mu\dot{\gamma}$	Relation linéaire entre contrainte tangentielle et taux de cisaillement. Adapté a priori à la modélisation de laves torrentielles boueuses.
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n$	Spécification du modèle en fonction de la valeur de n choisi. Adapté aux laves torrentielles boueuses. Coussot (1993) estime que la valeur de n =1/3 permet de décrire les écoulements de lave torrentielle boueuse de manière satisfaisante.

Quadratique	$\tau = \tau_c + \mu\dot{\gamma} + C\dot{\gamma}^2$	Adapté selon les auteurs à une large gamme d'écoulement (eaux claires, hyperconcentré, lave torrentiel boueuse et granulaire)
Voellmy	$\tau = \mu_f \sigma + \frac{\rho g u^2}{\xi} \tau$ $= \mu \sigma + \frac{\rho g u^2}{\xi}$	Adapté à l'origine aux avalanches, mais a été étendu aux laves torrentielles et chutes de blocs. Pas de terme propre au dépôt et à l'arrêt des laves.

τ la contrainte tangentielle (Pa) ; μ : viscosité (Pa.s) ; $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement (s^{-1}) ; τ_c Contrainte seuil (Pa) ; K viscosité d'Herschel-Bulkley ou consistance ($Pa/s^{1/3}$) ; n Indice d'écoulement (-) ; $C = c_{Bd} \rho_s \lambda^{-2} d_s^2$; $\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{C_{max}}{C_v}\right)^{\frac{1}{3}} - 1$ (Pa.s²), c_{Bd} coefficient empirique, ρ_s masse volumique des sédiments (kg/m^3), d_s diamètre représentatif des particules (m), C_v et C_{max} les concentrations volumiques et volumiques maximales théoriques (%) ; σ contrainte normale (Pa) ; μ_f μ paramètre de frottement de Coulomb (-) ; ρ masse volumique du fluide (kg/m^3) ; u vitesse de l'écoulement (m/s) ; ξ paramètre de friction turbulente (m/s^2) ; g accélération de la pesanteur (m/s^2).

Dans le cadre de l'étude, la relation d'Herschel-Bulkley sera conservée ; dans le logiciel de modélisation, elle est approximée de façon suivante :

$$\tau = \tau_c + K \left(\frac{3\bar{u}}{h}\right)^n,$$

où \bar{u} correspond à la vitesse moyenne (m/s) et h à la profondeur (m), n sera pris comment étant égal à 1/3 pour se ramener à la loi de Coussot.

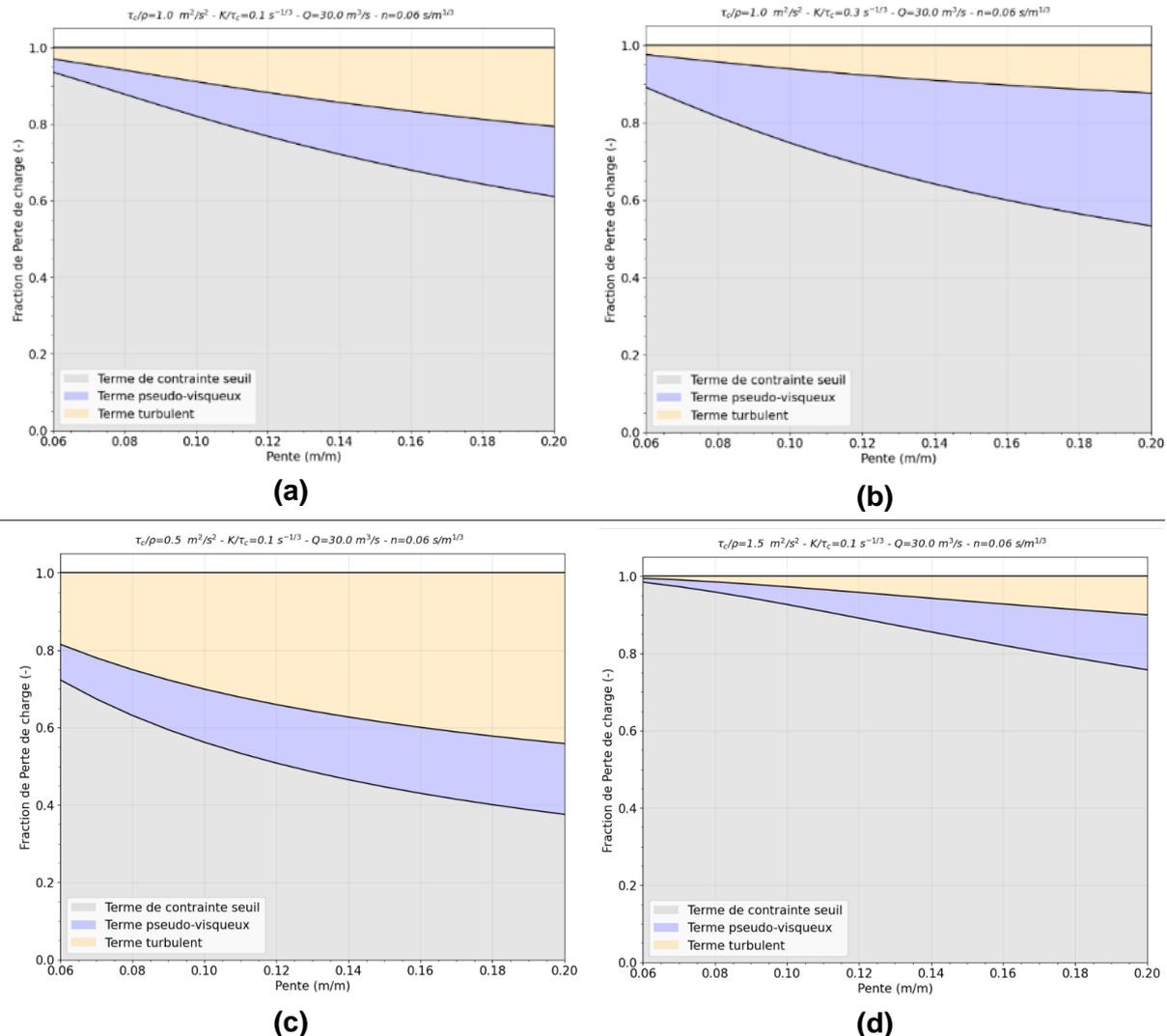
Il faut rappeler ici les principales hypothèses simplificatrices de ces modèles. Ils permettent seulement de représenter un fluide monophasique avec des paramètres descriptifs de l'écoulement généraux (le corps de lave est représenté) ; aucune interaction avec les berges et le fond du lit n'est représentée (hypothèse de fond fixe) ; la rhéologie est fixe dans l'espace et dans le temps.

4.1.3.5.4.2 Choix des paramètres rhéologiques

Contrairement à la valeur du débit (cf. Figure 95), celles des paramètres rhéologiques ont une importance prépondérante sur les conditions d'écoulements : étalement, hauteur d'écoulement. Pour décrire l'écoulement avec la loi de comportement d'Herschel-Bulkley, il est nécessaire de déterminer 3 paramètres :

- La masse volumique ρ , peut varier classiquement entre 1900 et 2500 kg/m^3 [3], en fonction de la concentration volumique (qui est en général supérieure à 50%). Dans cette étude, elle sera prise comme étant égale à 2200 kg/m^3 .
- Le rapport $\frac{K}{\tau_c}$ est compris pour ce type de phénomène entre 0.1 et 0.5 $s^{1/3}$. Il sera pris égale à 0.3 $s^{1/3}$ l'idée est de conserver la même valeur moyenne que lors de l'EDD de 2019 [7]. En outre ce paramètre influe moins sur les conditions d'écoulements que le rapport $\frac{\tau_c}{\rho}$ (cf. Tableau 39).

Tableau 39 : Répartition de la perte de charge implémenté sous HECRAS en fonction de différents paramétrages



- Le rapport $\frac{\tau_c}{\rho}$ a une gamme de valeur étendue entre 0.5 et 2 m²/s². Ce paramètre est le plus important pour déterminer les conditions d'écoulement, le RTM/ONF, dans l'EDD de 2019 [7], a déterminé des valeurs de ce paramètre sur le Piésan, à partir de l'historique de crue et des hauteurs atteintes. Les valeurs varient entre 0.4 et 1.4 m²/s². Ces valeurs sont assez dispersées et les raisons peuvent être multiples :
 - Variation des propriétés physique de la lave en fonction de la localisation au sein du torrent (en amont, la lave est plus chargée en matériaux et plus visqueuse qu'en aval) ;
 - Variation des propriétés physiques de la lave en fonction de l'évolution temporelle de la crue (en début de crue, la lave est plus visqueuse qu'en fin de crue) ;
 - Variabilité des propriétés physiques de la lave en fonction des crues (toutes les laves au sein d'un torrent ne possèdent pas la même rhéologie).

Il est commun d'encadrer le paramètre par un jeu de valeur englobant la gamme de valeur observée ; pour cette étude, il est proposé de conserver les valeurs de 0.5 et 1.5 m²/s², proposées par le RTM/ONF dans l'EDD de 2019 [7].

Le logiciel de modélisation HEC-RAS exprime la contrainte à la paroi scindée en un terme turbulent $\tau_{0,t}$ et un terme non newtonien $\tau_{0,MD}$:

$$\tau_0 = \tau_{0,t} + \tau_{0,MD}$$

Pour le modèle de Herschel-Bulkley, le terme non newtonien s'écrit :

$$\tau_{0,MD} \approx \tau_c + K \left(\frac{3\bar{u}}{h} \right)^n$$

Le terme turbulent est calculé à partir du coefficient de rugosité de Manning n :

$$\tau_{0,t} = \rho_m \cdot g \cdot n^2 \cdot R^{-1/3} \cdot V^2$$

ρ_m (kg/m^3) la masse volumique du mélange eau/sédiments, R (m) le rayon hydraulique et V (m/s) la vitesse des écoulements.

Cet ajout du terme turbulent est spécifique à HEC-RAS et laisse une incertitude supplémentaire quant à la part que prend le terme turbulent dans l'expression totale de la contrainte à la paroi et donc dans les pertes de charges. Afin de quantifier l'influence relative de la conservation du terme turbulent avec l'utilisation du Manning $n = \frac{1}{K}$ (à ne pas confondre avec le n intervenant dans l'expression d'Herschel-Bulkley), la figure suivante compare les hauteurs d'écoulement obtenues en fonction de différents paramétrages selon les formules conservées (traits pleins Loi de Coussot, pointillés loi implémentée sous HECRAS, largeur du torrent $b=10$ m).

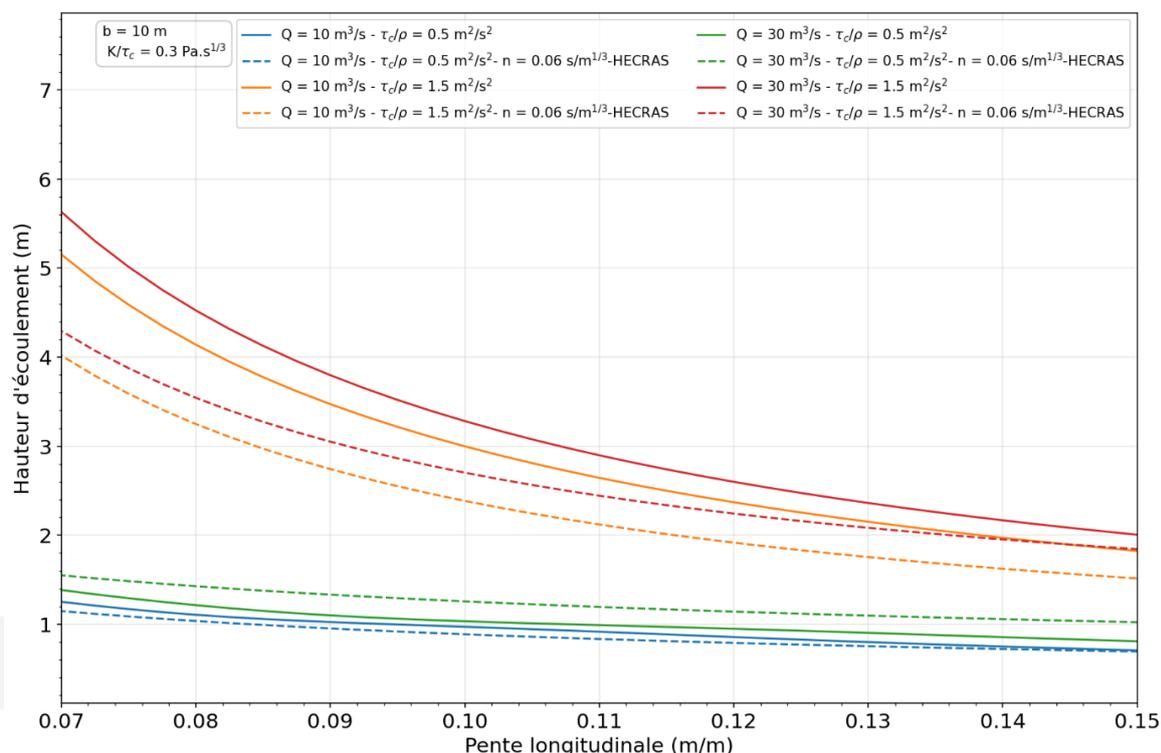


Figure 95 : Hauteur d'écoulement en fonction de la pente selon différents paramétrages

Il est possible de mettre en exergue les observations suivantes :

- Plus le débit est important, plus le terme turbulent influence la hauteur d'écoulement ;
- Moins la viscosité est importante, plus le terme turbulent influence la hauteur d'écoulement (cohérent avec comparaison Tableau 39 (c) et (d)) ;

- Le terme turbulent est plus important lorsque la pente est élevée (cohérent avec Tableau 39).

Le tableau ci-dessous synthétise les jeux de paramètres conservés pour le reste de l'étude :

Tableau 40 : Jeux de paramètres rhéologiques

Paramètre non Newtonien						
Rhéologie	τ_c/ρ	K/τ_c	n	τ_c	$C_v(g/l)$	$\rho(kg/m^3)$
RH1	0.5	0,3	0,33	1120	75%	2200
RH2	1.5	0,3	0,33	3360	75%	2200

Il convient de préciser ici qu'une tentative de calage de l'évènement de 2014 a été effectuée, cependant les résultats fournis par le modèle ne se sont pas avérés concluants. En effet, le retour d'expérience sur la crue de 2014 permettait de tenter un calage à partir de différents paramètres tels que les hauteurs de passages (notamment sur la partie aval du chenal, juste en amont de la plage de dépôt), la distance de propagation ou encore le volume stocké dans la plage de dépôt. Or en fixant l'hydrogramme de crue (dont on connaît l'ordre de grandeur) et en faisant varier les paramètres rhéologiques, aucune configuration n'a permis de représenter l'ensemble des observations. L'enveloppe de rhéologie de 2019 a ainsi été conservée

Un couple de paramétrage trop élevé (lave visqueuse) conduit à un arrêt prématuré des laves représentées ; à l'inverse, prendre des coefficients représentant une lave plus fluide amène à une hauteur de passage bien plus basse que celles observées. Il demeure à cela plusieurs raisons :

- Premièrement, le paramétrage rhéologique des laves est constant dans le temps et dans l'espace ; ainsi, il est très complexe de représenter tous les comportements observés ; de fait, ces valeurs sont amenées à varier au sein dans un écoulement de lave torrentielle (par exemple les processus de dépôts et de reprises vont modifier la concentration solide de l'écoulement et de ce fait la rhéologie ou encore il est couramment observé que les queues de laves sont moins chargées en matériaux).
- En outre, ce type de modèle permet de représenter le corps de lave, ce dernier ne correspond pas en général à la partie de la lave qui possède la plus grande hauteur d'écoulement (bien qu'elle constitue la plus grande part du volume de l'évènement). Ainsi, la hauteur maximale est probablement sous-estimée par le modèle, le front de lave pourrait atteindre des hauteurs plus importantes avec une proportion de blocs et de flottants (spécialement vrai dans le cas du Piésan qui possède une forte couverture arborée susceptible d'être mobilisée) plus importantes.

Ces éléments conduisent à prendre un certain recul sur les valeurs brutes du modèle hydraulique. De ce fait il sera considéré par la suite une certaine hauteur de revanche par rapport aux hauteurs maximales atteintes ; ce point est explicité et intégré dans l'analyse figurant dans les paragraphes suivants.

4.1.3.5.5 Outil de modélisation HECRAS 2D

Le modèle hydraulique utilisé pour mener les simulations alimentant l'étude de danger a été établi sur le logiciel de modélisation HEC-RAS. Ce logiciel est régulièrement utilisé dans le domaine de l'ingénierie hydraulique et fait l'objet d'application spécifique dans le contexte de lave torrentielle. Ces principales caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Tableau 41 : Tableau descriptif du logiciel HEC-RAS (Source : Valentin.M 2022)

HEC-RAS 2D (Bibliothèque DebrisLib)		
Editeur / 1ère version		
Logiciel développé par l'US Army Corps of Engineers (USACE). Il s'agit d'un logiciel ancien avec une première version (HEC-2) développée en 1968. La première version avec interface graphique dédiée à la modélisation unidimensionnelle d'écoulements à surface libre en sections irrégulières date de 1995.		
Modélisation 2D depuis v5.0 (2014)		
Bibliothèque DebrisLib dédiée à la modélisation d'écoulements non newtonien diffusée en 2021 avec la version v.6.0 du modèle		
Description		
Le modèle HEC-RAS 2D est un logiciel de modélisation hydraulique 2D très populaire qui a vraisemblablement la plus grande communauté d'utilisateurs au monde parmi l'ensemble des modèles hydrauliques 2D d'écoulements à surface libre. La version 6.0 permet la modélisation d'écoulements de laves torrentielles avec choix de nombreux modèles rhéologiques.		
Principales fonctionnalités techniques		
Schéma numérique	Schéma numérique de type Volume Fini (VOF)	
Maillage	Maillage structuré ou non structuré. Mailles polygonales (3 à 8 faces). Raffinement possible du maillage au droit de zones d'intérêt et au niveau des lignes de rupture. Résultats calculés sur la résolution initiale du MNT.	
Modèles rhéologiques	Modèles	Paramètres
	Bingham	C_v, τ_c
	Herschel-Bulkley	C_v, τ_c, K, n
	Modèle Quadratique	$C_v, \tau_c, C_{max}, d_s$
	Voellmy	C_v, ξ, μ_f
Erosion	Pas de prise en compte possible d'érosion au cours de l'écoulement	
Condition à la limite aval	Définie par l'utilisateur (par exemple sortie libre)	
Autres	Interface SIG avec possibilité de modification avancée de MNT. Très utile dans de nombreux cas : ajout d'un ouvrage de protection, obstruction d'un pont, brèche dans une digue...	

4.1.3.5.6 Résultats des scénarios de laves modélisés : laves fréquentes et laves rares du Piésan

Des scénarios de modélisation de lave torrentielle ont été établis à partir des paramétrages présentés dans les paragraphes précédents.

Figure 96 : Tableau récapitulatif des scénarios de laves torrentielles étudiés

	Occurrence	Rhéologie	Volume (m ³)	Paramètre non Newtonien					
				τ_c/ρ	K/τ_c	n	τ_c	C_v (g/l)	ρ (kg/m ³)
Q100_RH1	Rare	Fluide	10 000	0.5	0,3	0,33	1120	75%	2200
Q100_RH2	Rare	Moyennement visqueuse	10 000	1.5	0,3	0,33	3355	75%	2200
Q10_RH1	Fréquente	Fluide	2 500	0.5	0,3	0,33	1120	75%	2200
Q10_RH2	Fréquente	Moyennement visqueuse	2 500	1.5	0,3	0,33	3355	75%	2200

4.1.3.5.6.1 Propagation modélisée des laves torrentielles pour chaque scénario

Les emprises des laves torrentielles pour chaque scénario sont données sur les cartographies ci-après. Dans une première approche, les distances de propagation, les zones d'arrêt, ainsi que les emprises des écoulements des laves ont été observés pour chaque scénario.

Plusieurs tendances sont observées au regard de ces cartes :

- Les laves à rhéologies plus fluides se propagent plus en aval que celle de rhéologie modérément visqueuse. Les rhéologies visqueuses entraînent de hauteurs de dépôts plus importantes ce qui implique, pour un volume fixe, un arrêt plus en amont (par exemple, dans le cas d'une lave fréquente, puisque la lave n'atteint pas l'apex du cône).
- Les écoulements sont globalement contenus au sein du lit du torrent. On note tout de même une propagation plus incertaine à l'aval de la plage de dépôt sur le tronçon qui mène à la confluence au Biel dans le cas d'une lave torrentielle rare fluide (absence d'enjeu dans cette zone).

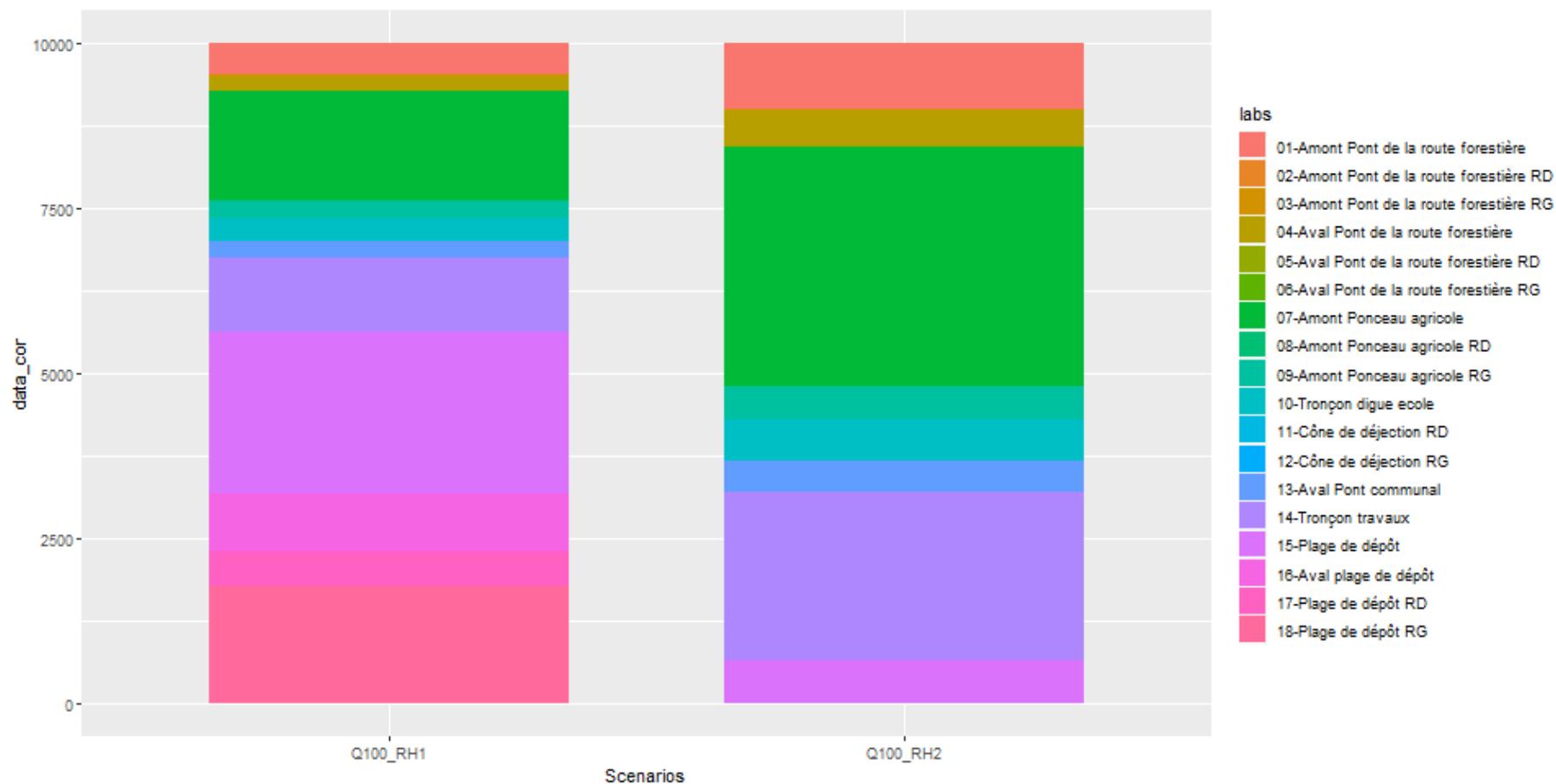


Figure 97 : Répartition du volume déposé sur le torrent du Piésan pour des laves torrentielles rares

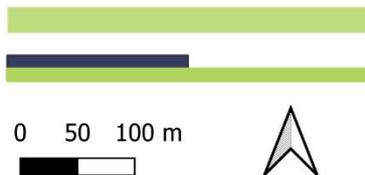


Figure 98 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle fréquente fluide



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-Chaise

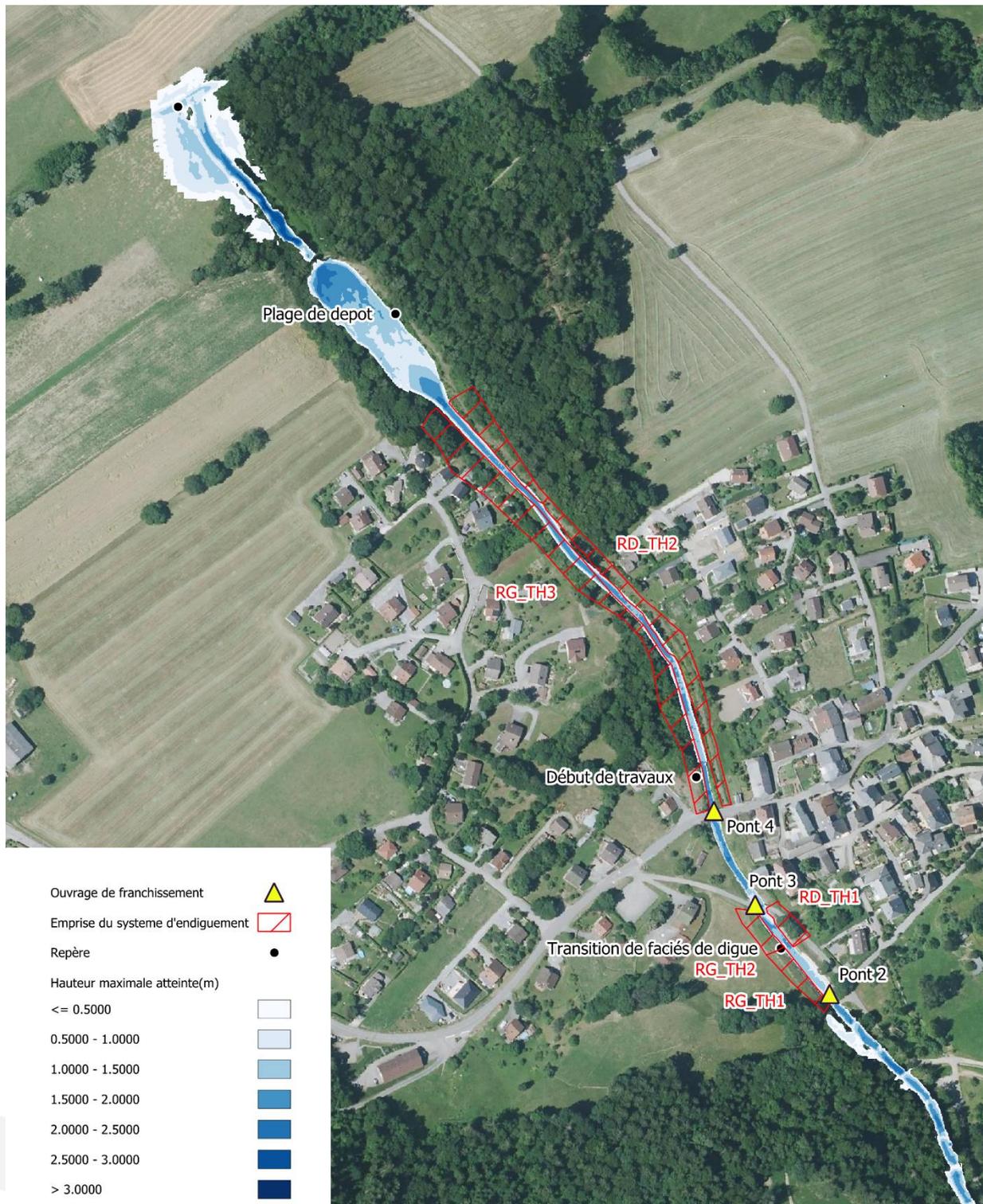
Hauteur maximale atteinte pour une lave fréquente moyennement visqueuse



SUEZ

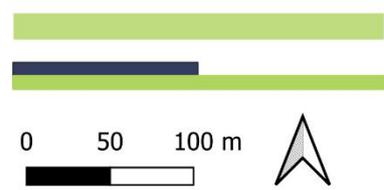


Figure 99 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle fréquente moyennement visqueuse



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-Chaise

Hauteur maximale atteinte pour une lave rare fluide



SUEZ



Figure 100 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle rare fluide



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-Chaise

Hauteur maximale atteinte pour une lave rare moyennement visqueuse

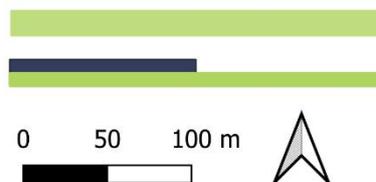


Figure 101 : Carte d'emprise d'une lave torrentielle rare moyennement visqueuse

4.1.3.5.6.2 Profils en long au droit des ouvrages d'endiguement

Afin de compléter l'analyse des caractéristiques de l'écoulement de laves torrentielles sur le torrent du Piésan, des profils en long faisant apparaître la hauteur maximale d'écoulement atteinte ont été établis d'amont en aval.

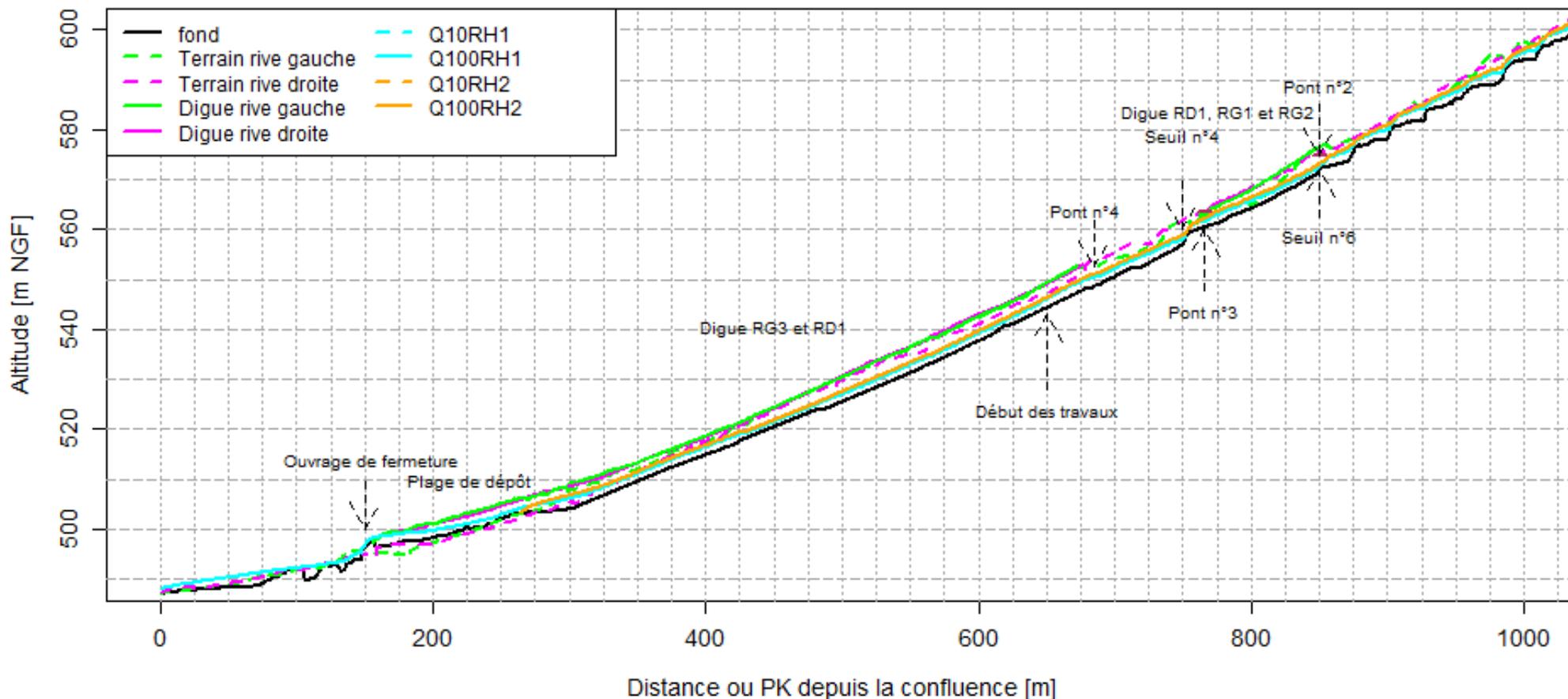


Figure 102 : Profil en long global du corps de lave pour les 4 scénarios de lave torrentielle

Au droit du tronçon endigué entre les ponts 3 et 4, la capacité du tronçon semble être suffisante pour permettre le transit des corps de laves torrentielles même si on note une mise en charge significative de la digue rive gauche.

La principale problématique semble être liée aux ouvrages de franchissement, les tirants d'air observés sont très faibles, ce qui témoigne de forts risques de d'obstruction et donc de débordements (d'autant plus si l'on considère les problématiques liées aux flottants (cf. 4.2.7 suivant)).

Pour mémoire, la modélisation ne représente pas les fronts de laves, qui peuvent avoir une hauteur très supérieure à la hauteur du corps de lave, comme ce qui semble s'être produit sur la crue de 2014.

Sur la zone des travaux, en aval du pont 2 (pont départemental), le risque de débordement du corps de lave semble faible.

D'après les modélisations, la mise en charge du système d'endiguement apparait localement juste en amont de la plage de dépôt (PK 300 à 350), mais la revanche est encore importante. L'amont du tronçon est marqué par l'ouvrage de franchissement situé le plus en aval du torrent, qui implique, encore une fois, des problématiques d'obstructions et de débordements.

Il faut citer à nouveau la possibilité que les fronts de laves mettent en charge les différents ouvrages, dans une mesure non approchée par la modélisation. Par ailleurs l'approche 2D entraine des hauteurs de passages plus faibles que l'approche 1D. Pour rappel l'EDD de 2019 avait uniquement conservée une approche 1D qui fournissait une sollicitation plein bord. L'approche qualitative qui viendra dans les prochains paragraphes permettra de nuancer les résultats 2D purement numériques.

A noter qu'en aval du système d'endiguement, comme vu sur les cartes d'emprises des écoulements, on note que tous les scénarios s'arrêtent dans la plage de dépôt (ou avant) à l'exception du scénario de lave rare fluide. Ce dernier scénario exerce une forte mise en charge sur les digues encadrant la plage de dépôt (lit perché ou au niveau du terrain naturel). Une part des matériaux de ce scénario transite au-delà de la plage de dépôt.

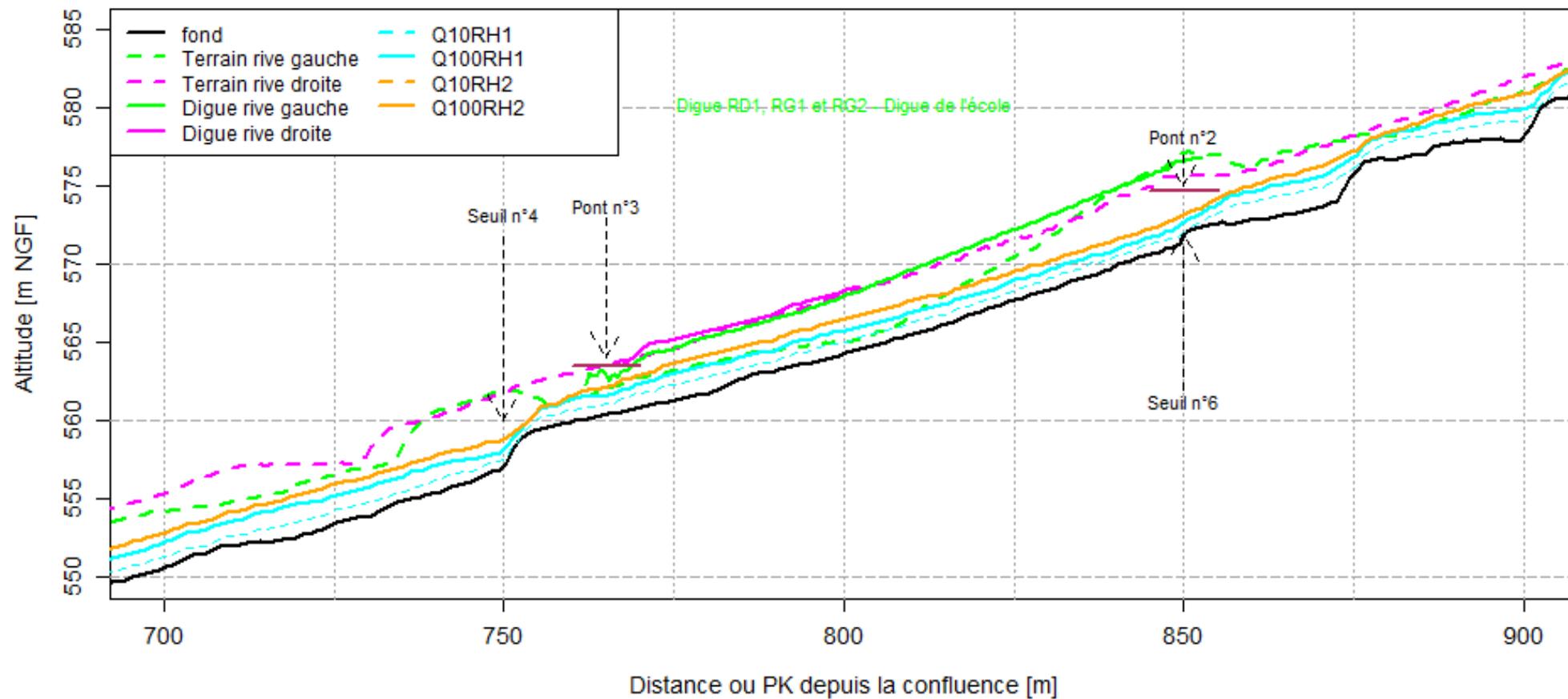


Figure 103 : Profil en long des niveaux atteints par le corps de lave entre le pont n°2 et le pont n°3 pour les différentes laves modélisées

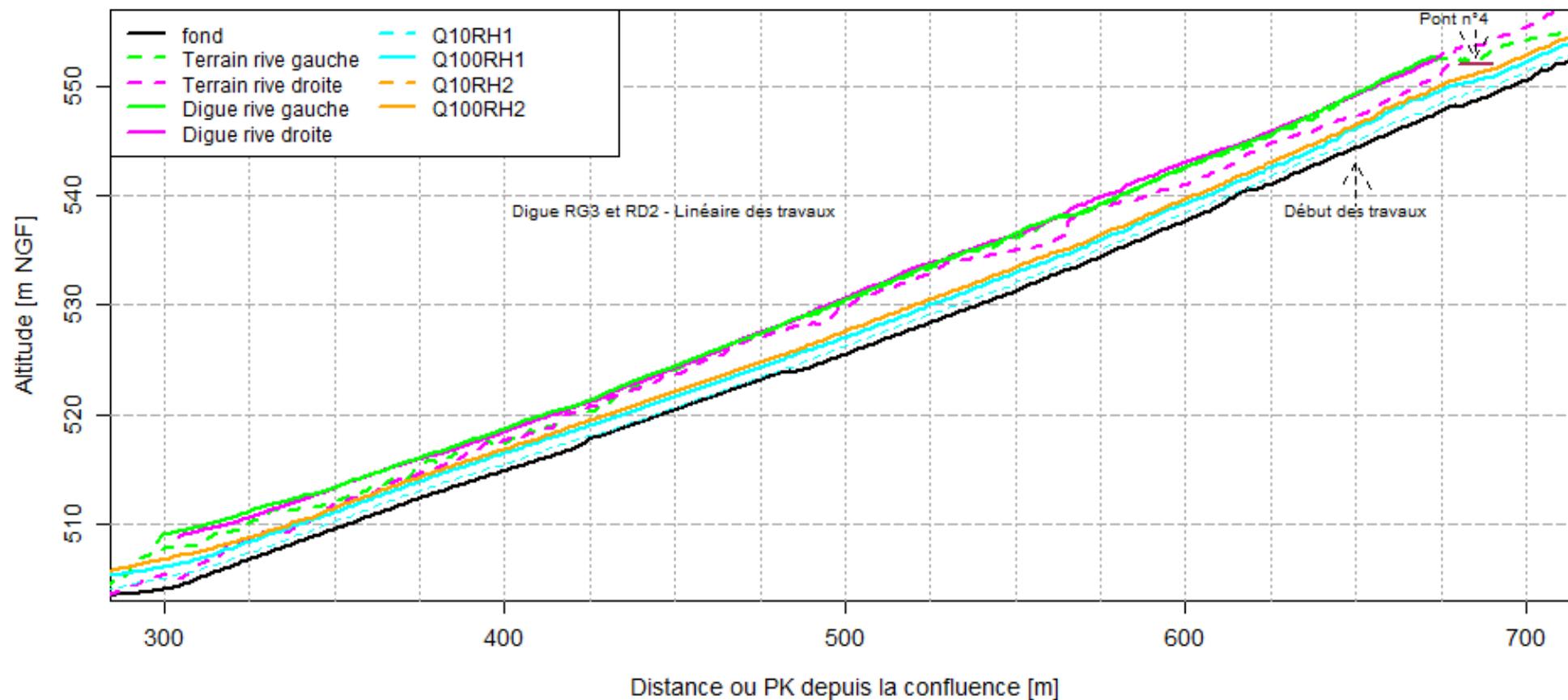


Figure 104 : Profil en long des niveaux atteints par le corps de lave en aval du pont n°4 (secteur des travaux) pour les différentes laves modélisées

4.1.3.5.7 Analyse des conditions d'écoulement sur le cône de déjection - risques de débordement

Les débordements peuvent entre autres être les conséquences de deux différentes raisons :

- La présence d'ouvrage de franchissement (pont, passerelle) qui engendrerait une perturbation locale de l'écoulement en réduisant la capacité de transit du torrent, pouvant également générer des embâcles ou obstruction ;
- Une trop faible capacité de transport du lit du Piésan ne permettant pas de contenir le corps de lave.

Ces éléments sont analysés par la suite.

4.1.3.5.7.1 Risques de débordements liés à l'obstruction des franchissements

Le tableau suivant synthétise les différents tirants d'air obtenus au droit des 3 ouvrages traversants du secteur d'étude :

Tableau 42 : Revanche (entre hauteur des corps de lave et côte de sous poutre des ponts) relevée au droit des ouvrages de franchissement

	Pont 2 Ponceau agricole	Pont 3 Pont de la route communale	Pont 4 Pont de la route départementale
Revanche lave fréquente RH1 (m)	1.8	1.5	1.9
Revanche lave fréquente RH2 (m)	Arrêt de lave en amont	Arrêt de lave en amont	Arrêt de lave en amont
Revanche lave rare RH1 (m)	1.3	0.5	0.5
Revanche lave rare RH2 (m)	0.8	0.2	0.4

Il faut rappeler ici que les calculs sont réalisés pour le corps de laves, et qu'un front de lave pourra être sensiblement plus important.

On touche ici aux limites du modèle. Par exemple, sur la crue de 2014 qui est une crue de l'ordre de la crue fréquente, les garde-corps du ponceau agricole ont été endommagés, alors que le modèle donne théoriquement une revanche semblant suffisante.

Aussi, on considère que :

- **L'obstruction des ouvrages** (voire la destruction pour le ponceau agricole en particulier) **est probable à très probable pour les laves rares** ;
- **L'accrochage des ponts est déjà possible pour les laves fréquentes, en particulier par des fronts de lave très importants.**

Etude de dangers du système d'endiguement du Piésan

4.1.3.5.7.2 Risques de débordements liés au dépassement de la capacité du lit du torrent

Pour compléter l'analyse, les revanches minimales entre les niveaux de corps de lave et le niveau de crête des digues ont été mises en évidence à partir des résultats du modèle, pour chaque tronçon du système d'endiguement. Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus :

Tableau 43 : Revanche (entre hauteur des corps de laves et crête de digue) relevée au droit des différents tronçons au point le plus défavorable

Revanche minimale au droit des digues	RG_TH1	RG_TH2	RD_TH1	RD_TH2 et RG_TH3
Lave rare RH1 (m)	1.6	1.8	1.85	2.9
Lave rare RH2 (m)	1.1	1.3	1.35	2.1

Cette analyse met évidence, comme déjà évoqué, que les niveaux de crêtes ne sont théoriquement jamais atteints y compris pour les laves rares. Ces résultats doivent être pris avec recul, les incertitudes sont importantes et un front de lave particulièrement important n'étant pas pris en compte.

4.1.3.6 Synthèse du fonctionnement torrentiel du Piésan (charriage et laves torrentielles) au droit du système d'endiguement

Étant donné les incertitudes fortes sur les estimations de hauteurs de passage, la présence d'un front de lave, de flottants et de blocs, le risque de débordement est appréhendé de manière qualitative en reprenant les classes définies ci-dessous reprise des probabilités de débordement conservées dans l'EDD du Nant Trouble de 2023 [10].

Tableau 44 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - générale

Possibilité de débordement	Improbable	Peu probable	Probable	Très probable	Quasi-certain
Revanche sur hauteur du corps de lave	Supérieure à 1,5 m	Entre 1,5 m et 1 m	Entre 1 m et 0,5 m	Inférieure à 0,5 m	Nulle ou négative

Compte tenu :

- Des observations de la crue de 2014, où le sommet de berge en aval du pont de la route départementale a été atteint par un front de lave,
- Des écarts vraisemblables avec une approche de calcul 1D (qui aurait tendance à générer des hauteurs de passages plus importantes),
- De l'occupation très boisée du bassin versant qui amène la présence irrémédiable d'un volume de tronç important en front d'une lave rare (même avec un entretien régulier assuré par l'ONF),
- Des échanges avec les référents nationaux RTM/ONF sur ce dossier,

nous proposons de prendre une marge supplémentaire sur ce tableau pour les scénarios de laves uniquement, comme suit :

Tableau 45 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - adoptée

Possibilité de débordement	Improbable	Peu probable	Probable	Très probable	Quasi-certain
Revanche sur hauteur du corps de lave	Supérieure à 2 m	Entre 2 m et 1,5 m	Entre 1,5 m et 1 m	Entre 1 m et 0,5 m	Inférieure à 0,5 m

Remarque : il faut rappeler ici que l'atteinte d'un sommet de berge ou de digue par un corps de lave n'amène pas nécessairement une propagation d'un écoulement liquide ou solide dans la zone protégée.

De même, l'analyse des risques de débordement au niveau des ponts et au niveau des différents tronçons du système d'endiguement sont repris dans le tableau ci-dessous.

Il ressort de cette synthèse que :

- Les probabilités de débordement sont théoriquement plus élevées au niveau des ponts qu'au niveau des tronçons chenalés ;
- Le ponceau agricole est le premier point bloquant, situé en amont du cône de déjection. Les débordements sont très probables à quasi-certain pour des périodes de retour considérées comme « fréquentes » ;
- Les scénarios de charriage présentent une revanche réduite sur les tronçons RG_TH3 et RD_TH2, sous l'influence aval de la plage de dépôt.

Tableau 46 : Table synthétique qualifiante du risque de surverse en fonction des aléas

Tronçon/pont	Scénarios courants				Scénarios rares	
	Charriage court	Charriage long	Lave fréquente fluide $\tau_c/\rho=0.5$	Lave fréquente moyennement visqueuse $\tau_c/\rho=1.5$	Lave rare fluide $\tau_c/\rho=0.5$	Lave rare moyennement visqueuse $\tau_c/\rho=1.5$
Ponceau agricole	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Probable</i>	<i>Très Probable</i>
RG_TH1	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
RG_TH2	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
RD_TH1	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
Pont de la route communale	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Quasi-certain</i>	<i>Quasi-certain</i>
Pont de la route départementale	<i>Probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Quasi-certain</i>	<i>Quasi-certain</i>
RG_TH3	<i>Probable</i>	<i>Probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>
RD_TH2	<i>Probable</i>	<i>Probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>

Les revanches pour les laves torrentielles sont calculées en considérant la différence entre la crête de digue (au point le plus pénalisant) ou la sous-poutre de l'ouvrage, avec la hauteur du corps de lave (ou hauteur max d'engravement par charriage) donnée par les modélisations numériques.

On identifie donc bien ici les risques prépondérants :

- Pour les scénarios de charriage, le dépôt régressif sur le linéaire aval (plage de dépôt) engendre une surverse possible sur l'extrémité aval du système d'endiguement ;
- Pour les scénarios de lave fréquente, le risque d'accrochage des ponts et donc de surverse est déjà présent. Ce risque est fort pour les laves rares.

4.2 Autres aléas naturels et anthropiques

4.2.1 Avalanches et effets possibles

La commune de Val de Chaise est soumise à un aléa important vis-à-vis des avalanches. Plus localement au niveau du bassin versant du torrent du Piésan, un couloir d'avalanche est identifié. Cette zone est concernée par un aléa important.

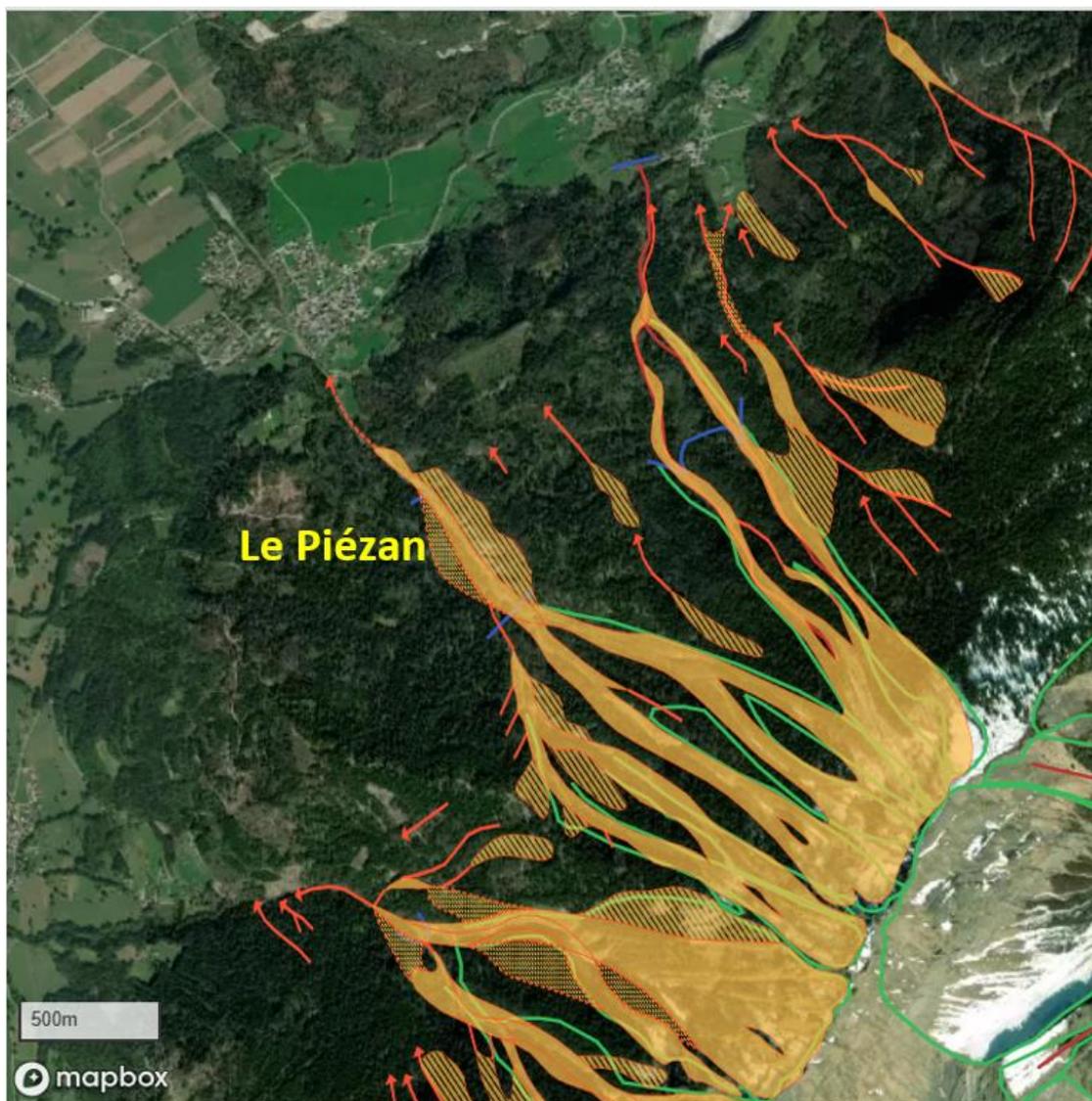


Figure 105 : Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche et recensement Enquête Permanente sur les Avalanches dans la zone du Piésan

L'EDD du RTM/ONF de 2019 [7] indique les éléments suivants :

« L'activité avalancheuse du bassin versant est régulière entre les mois de février et avril. Ces couloirs ont fait l'objet d'un suivi EPA sur la période 1905-2013. Selon cet inventaire et sur cette longue période d'observation, les avalanches les plus courantes atteignent la côte 1000 m, les plus basses descendent jusqu'à 750 m, soit au niveau des premiers ouvrages de correction torrentielle. L'activité avalancheuse est régulière entre les mois de février et avril. Les culots d'avalanche sont généralement chargés de bois de toutes tailles, de pierres et de gros blocs comme l'illustre la photographie ci-dessous (avalanche de 2010). L'activité avalancheuse apparaît comme un phénomène érosif, mais aussi comme un vecteur important de transport des matériaux accumulés dans les différentes branches.



Figure 106 : Avalanche descendue jusqu'au seuil n°40 en mars 2006 - à droite, gros blocs retrouvés dans les dépôts au printemps (source : EDD RTM)

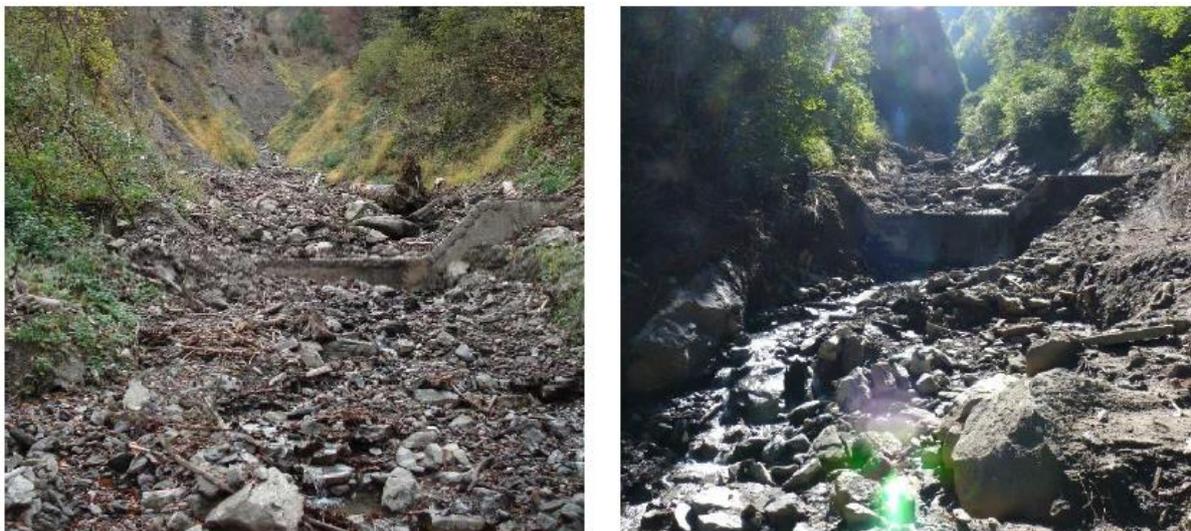


Figure 107 : illustration de la respiration du lit dans la partie supérieure de la correction torrentielle (DDRTM – barrage 40) , source EDD RTM

Le tronçon situé entre la confluence avec les différentes branches et les premiers ouvrages de corrections (entrée dans le vallon, entre 700 et 750 m) constitue une zone de régulation du transport solide. C'est sur ce secteur que se déposent les matériaux issus des avalanches ou des crues modérées pour être repris lors des crues plus importantes du Piésan. »

Les dépôts d'avalanche n'atteignent pas les linéaires endigués du Piésan ; aussi cet aléa ne sera pas étudié spécifiquement dans la présente EDD.

4.2.2 Retrait et gonflement des argiles

La commune de Val de chaise est soumise à un risque faible à modéré vis-à-vis de l'aléa retrait et gonflement des argiles.

Le bassin versant du Piésan sur la majorité de sa surface est soumis à un aléa faible, une partie réduite est quant à elle en aléa modérée (notamment sur la partie amont du bassin versant)

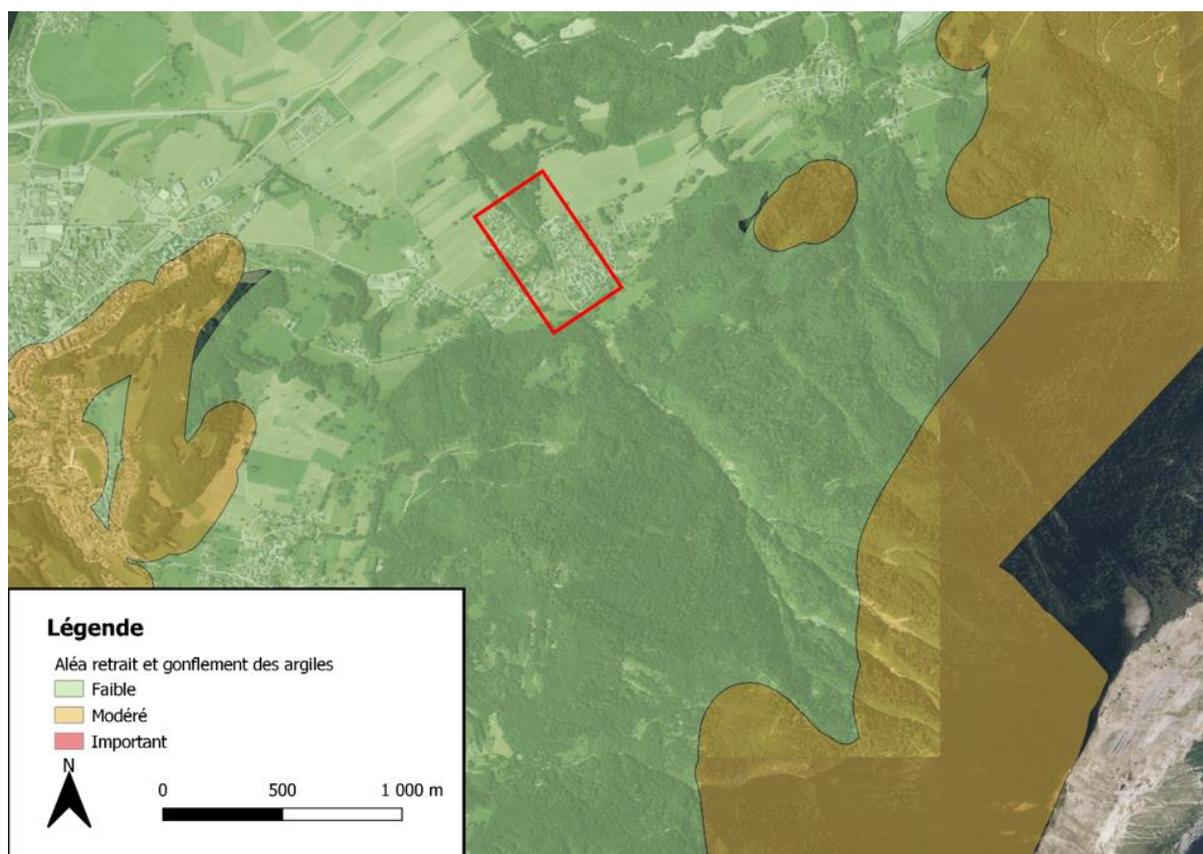


Figure 108 : Cartographie des aléas de retrait et gonflement des argiles sur le bassin versant du torrent du Piésan (source : géorisques)

Les ouvrages étant sur le cône de déjection du Piésan, ce risque est écarté au droit du système d'endiguement.

4.2.3 Cavités souterraines et effondrements karstiques

Le site de Cons Sainte Colombe est classé à risque pour l'aléa et le sous aléas affaissement minier par la direction départementale de Haute-Savoie.

Toutefois, le système d'endiguement ne semble pas être concerné par ces zones ; cet aléa est donc écarté pour le reste de l'étude.

4.2.4 Mouvements de terrain (glissements)

Les descriptions et analyses suivantes sont issues du PPRN de 2019 de Val de Chaise [6] et de l'EDD du RTM/ONF [7] :

- Glissement de terrain

Au-dessous de 1200 m d'altitude, les terrains constitués de schistes marno-gréseux friables plus ou moins feuilletés sont sensibles à l'affouillement par les torrents, ce qui se traduit par un encaissement plus prononcé des torrents et de l'érosion de berges qui alimentent ces derniers. Ces affouillements génèrent le glissement des terrains situés à l'amont.



Figure 109 : glissements superficiels (source : EDD RTM [7])

- Ravinements

Le ravinement concerne la partie inférieure de la branche principale du Piésan, ainsi que celle du Nant Droit et du Perchet, avec une incision progressive de ravins dans les Flyschs. Ces ravins apportent des matériaux de granulométrie fine à grossière.



Figure 110 : Ravinement dans la branche principale du Piésan (vers 1200 m) (source : EDD RTM [7])

- Chute de blocs

Sur la commune, la partie sommitale de la Dent-de-Cons se caractérise par la présence d'affleurement ou de petits éperons rocheux pouvant générer la chute de blocs. Ces derniers peuvent être remobilisés au cours des avalanches pour venir alimenter les torrents. D'autres chutes de blocs se manifestent également dans les talwegs des torrents qui entaillent le versant.



Figure 111 : vue sur la gorge du Piésan, en aval de la réunion des différentes branches du réseau hydrographique, montrant les éboulements affectant les Flysch situés en rive droite (vue vers l'aval) (source : EDD RTM [7])

4.2.5 Aléa sismique

La commune de Val-de-Chaise se trouve en zone de sismicité moyenne (zone 4), comme la majeure partie du département de la Haute-Savoie.

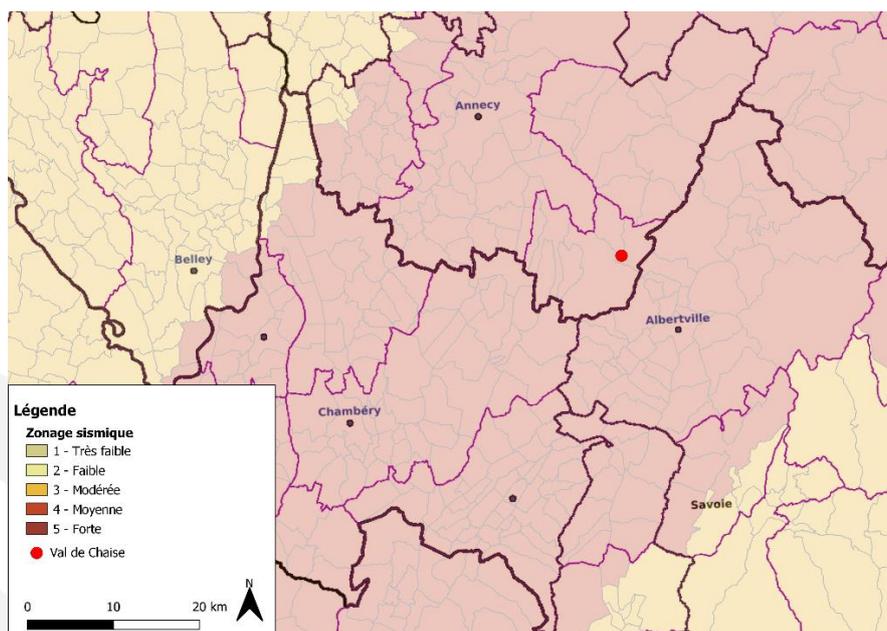


Figure 112 : Zonage sismique (Source : Data.gouv)

Selon les recommandations du groupe de travail barrage et séismes d'octobre 2014 [12], **l'étude du cas d'une rupture sous séisme est nécessaire compte tenu de la classe de la digue (classe C) et de la zone de sismicité (zone 4 : sismicité moyenne).**

7.5.2.1. Sollicitations sismiques

La vérification de la sécurité structurale des digues de classes A à C est effectuée selon les méthodes exposées au § 7.4, mais avec une sollicitation sismique correspondant au tableau suivant :

Zone de sismicité	Classe D	Classe C	Classe B	Classe A
1	sans objet	0,2	0,3	0,4
2	sans objet	0,4	0,5	0,7
3	sans objet	0,7	0,8	1,1
4	sans objet	0,9	1,2	1,6
5	sans objet	1,8	2,2	3,0

Tableau 7-26 - Accélération horizontales pour le SES (en m/s^2) - digues

Zone de sismicité	Classe D	Classe C	Classe B	Classe A
1	non imposé	non imposé	non imposé	non imposé
2	non imposé	non imposé	non imposé	OUI
3	non imposé	non imposé	OUI	OUI
4	non imposé	OUI	OUI	OUI
5	OUI	OUI	OUI	OUI

Tableau 7-27 - Exigence de vérification de l'absence de risque potentiel de liquéfaction - digues

Figure 113 : Vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [12])

Le risque de liquéfaction ne concerne que des sols de type sableux, les endiguements ne sont pas concernés par ce risque, **non étudié dans la suite du rapport.**

4.2.6 Sources d'agression anthropiques

A proximité de la zone protégée et du système d'endiguement, il n'y a pas de site type SEVESO, d'installations nucléaires de base (INB) ou de modes de transport de marchandises dangereuses, Barrage/retenue d'eau et site ICPE à proximité du site (Source : géorisques.gouv.fr).

Le système d'endiguement n'est pas soumis à un risque d'agression anthropique.

4.2.7 Les embâcles et les effets possibles

Le bassin versant du Piésan possède un important taux de boisement (70 % selon le PPRN de Val-de-Chaise) ; il est courant de retrouver lors de différentes crues des flottants au sein du lit du torrent.



(a)



(b)

Figure 114 : Flottants déposés au sein du lit du Piésan (Sources : (a) Visite de terrain, (b) EDD 2019)

Le transport des flottants lors des crues augmente les risques de débordements principalement au niveau des ouvrages de franchissement, en lien avec les risques d'accrochage des tabliers des ponts par les bois.

L'effet des embâcles sur le système d'endiguement est étudié par le biais du scénario de défaillance.

5. DESCRIPTION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

5.1 Ouvrages existants

5.1.1 Historique des ouvrages

L'aménagement de la plupart des « digues » est progressif et date probablement du milieu du XX^{ème} siècle, après la crue historique de 1938. Le système d'endiguement est constitué d'ouvrages appartenant historiquement à la commune, qui en a été propriétaire jusqu'en 1977, date à laquelle elle a proposé à l'État d'acquérir les terrains (et donc les ouvrages) en aval de la côte 700.

La comparaison des vues aériennes permet d'avoir une approche assez exhaustive de l'historique des ouvrages d'endiguement et de correction torrentielle.



Figure 115 : Photographie aérienne de 1937 (avant la crue historique de 1938) - le Piésan n'est pas canalisé en aval du pont départemental (attention la photographie est inversée Sud/Nord)

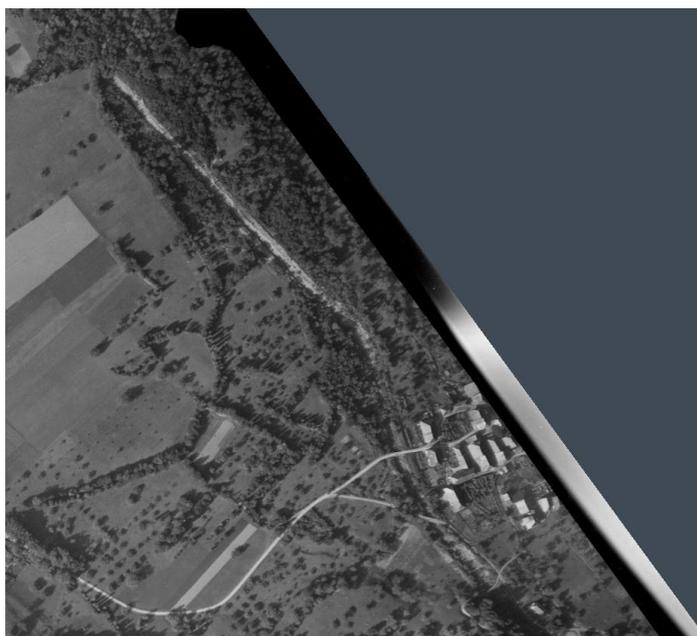


Figure 116 : photographie aérienne de 1951 – Piésan canalisé dans toute la traversée de Cons Sainte Colombe, suite à la crue de 1938



Figure 117 : photographie aérienne de 1978 – début de l'urbanisation en aval du pont départemental, derrière des ouvrages très végétalisés



Figure 118 : photographie aérienne de 1980 – correction torrentielle et réaménagement du lit en amont du cône de déjection, aménagement de la plage de dépôt en aval



Figure 119 : photographie aérienne de 2004 – des aménagements viennent de s'achever : digue de l'école (juste avant création de l'école visible sur la photo de 2009), et le chenal en enrochement du Piésan entre les ponts 3 (communal) et 4 (départemental)



Figure 120 : photographie aérienne de 2012 – des aménagements de réfection du chenal du Piésan viennent de s'achever : tronçon aval de la digue de l'école



Figure 121 : photographie aérienne de 2019 – des aménagements de réfection du chenal du Piésan viennent de s'achever : tronçon amont de la digue de l'école + arasement du seuil entre ponts 2 et 3

Pour compléter ces observations, le tableau suivant retrace l'historique des tronçons constitutifs du système d'endiguement.

Tableau 47 : Historique du système d'endiguement

Ouvrages	Date de construction	Source
Digue RG_TH1	Formation par dépôts de curages successifs. Derniers travaux en 2018 (chenal complet en enrochement bétonné)	EBR 2014, RTM et photo aérienne
Digue RG_TH2 et RD_TH1	Formation par dépôts de curages successifs. Derniers travaux en 2012 (enrochements libres en berge et bétonnés en fond)	EBR 2014, RTM et photo aérienne
Digue RG_TH3 et RD_TH2 Piésan	Formation par dépôts de curages successifs (travaux de 1937), naturellement consolidés et végétalisés au cours du temps	EBR 2014, RTM et photo aérienne
Seuils en aval des ponts 2 et 3	Fin des années 1970 Consolidation possible plus récemment (historique plus précis non connu)	Photographie aérienne
Chenal entre les ponts 2 (communal) et 3 (départemental) : 2003 à priori	Début des années 2000 Historique plus précis non connu	Photographie aérienne

5.1.2 Découpage en tronçons homogènes

Le système d'endiguement s'étend en rive gauche entre les plans métriques (PM) 300 et 850, sur le cône de déjection du Piésan. Les PM sont définis depuis la confluence avec le Biel.

Ces ouvrages sont étudiés :

- En état actuel jusqu'au pont de la route départementale (PM 300 à PM 680),
- En état projet en aval du pont de la route départementale (PM 680 à PM 850).

Pour identifier l'emprise des dispositifs appartenant au système d'endiguement, les éléments suivants ont été utilisés :

- Pour les digues en état actuel : MNT 2018 et 2021 ;
- Pour les digues en état projet : Plan Projet du RTM/ONF.

Ces éléments ont été complétés par une visite de terrain afin de confirmer les emprises.

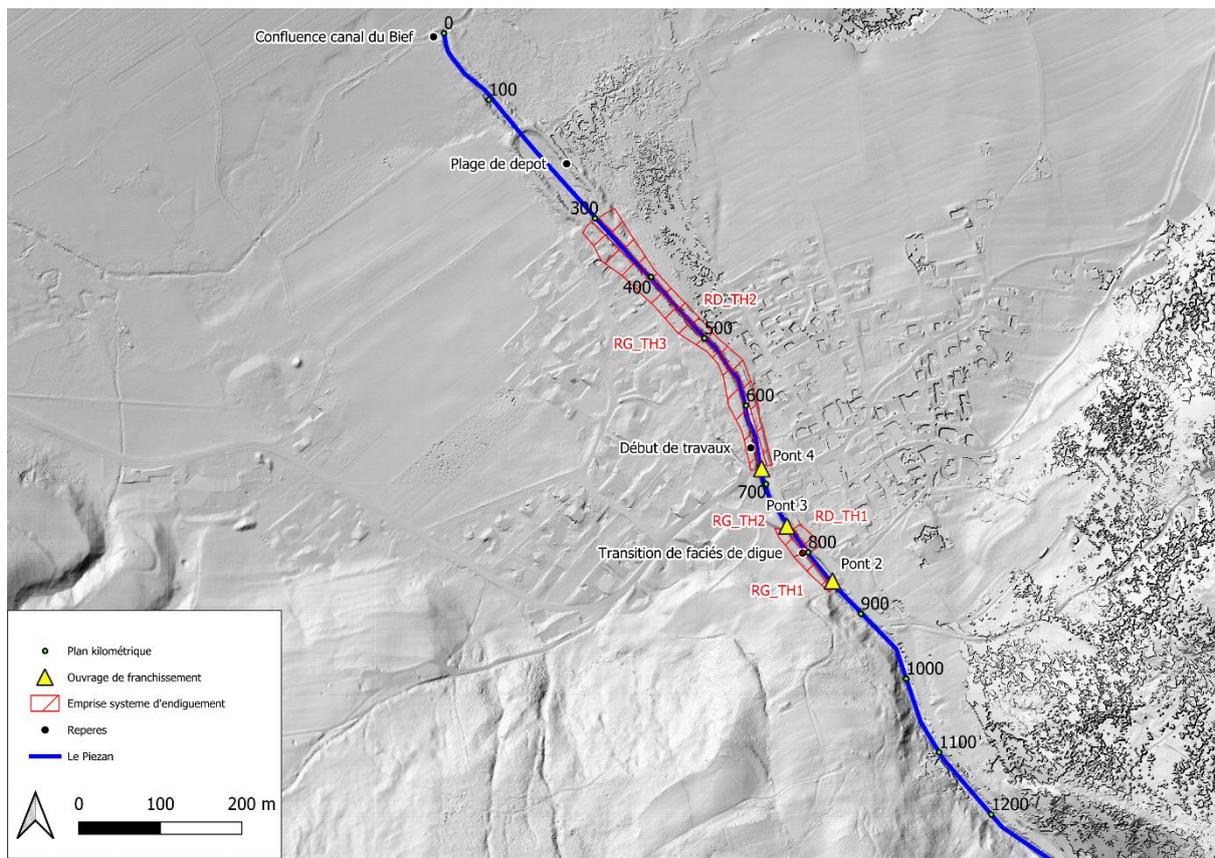


Figure 122 : Carte d'emprise du système d'endiguement

Le système d'endiguement est composé de 4 dispositifs d'endiguement qui représentent 5 tronçons homogènes. Ils sont listés d'amont en aval ci-dessous :

- RG_TH1, qui correspond à la partie amont de la digue implantée en rive gauche (digue de l'école). Il est compris entre les ponts n°2 et 3 (respectivement un chemin agricole et la route communale) et plus précisément entre les PK850 et 800 sur un linéaire de 55m.
- RG_TH2, qui correspond à la partie aval de la digue de l'école, compris entre les PK800 et 760 sur un linéaire de 35m
- RD_TH1 qui correspond à la partie en amont du pont communal implantée en rive droite, compris entre les PK800 et 760 sur un linéaire de 35 m
- RG_TH3 et RD_TH2, qui correspondent aux digues respectivement en rive gauche et droite en aval du pont de la route départementale (pont n°4) et qui s'étendent jusqu'à l'entrée de la plage de dépôt. Ils sont situés entre les PK650 et 300 sur un linéaire de 375 m.

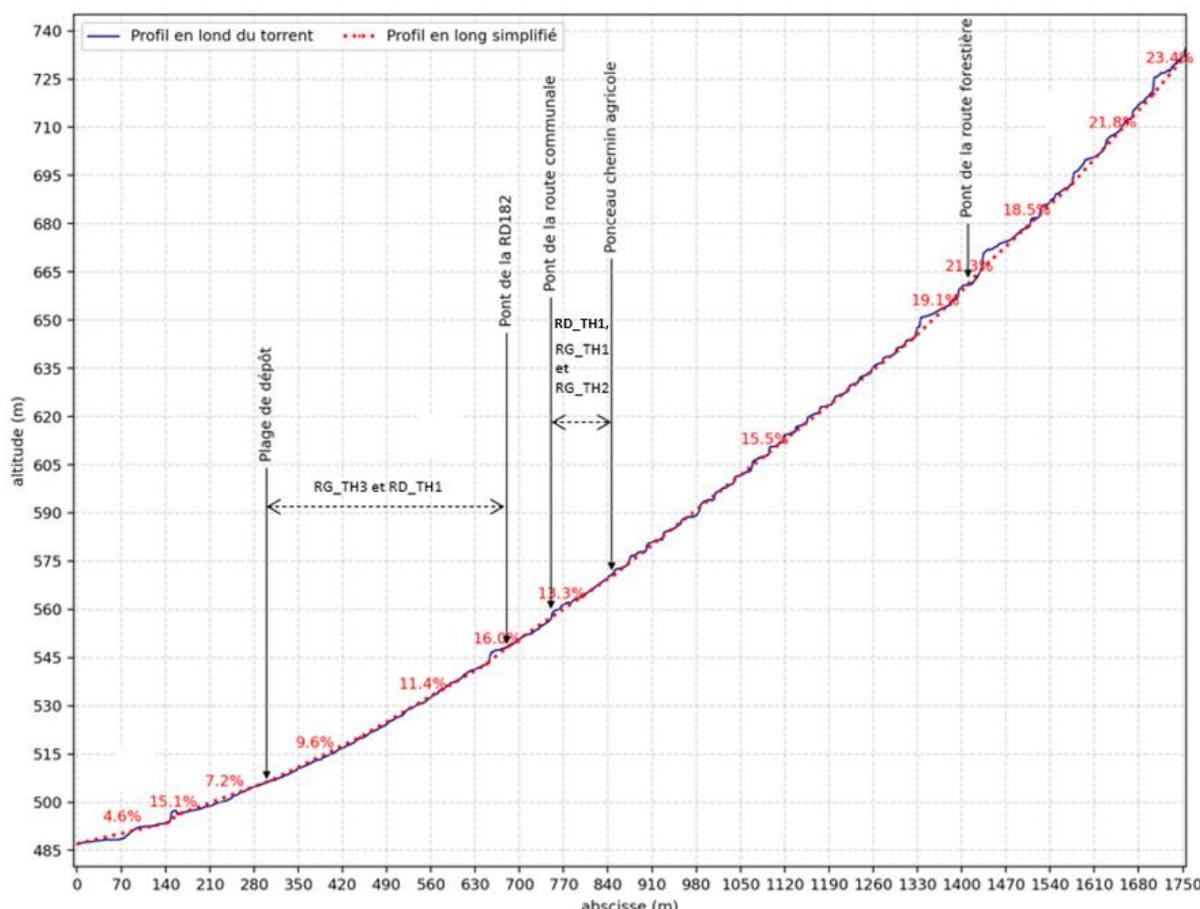


Figure 123 : Profil en long et évolution de la pente du Piésan au niveau de la zone d'étude

5.1.3 Description visuelle du Piésan au droit des ouvrages du système d'endiguement

Plusieurs visites de terrain ont été menées, avec en particulier une visite technique approfondie des ouvrages (§7.1 de la présente EDD), réalisée le 10 octobre 2023, mais aussi une visite complète du lit du Piésan.

La description visuelle synthétique du lit du Piésan au droit du système d'endiguement est donnée ci-après, d'amont en aval.

5.1.3.1 Lit du Piésan au droit de l'ouvrage constitutif RG_TH1

Ce tronçon du torrent correspond à l'apex du cône de déjection. À son extrémité amont est présent un ponceau de chemin rural. Le lit est chenalisé en enrochement, pour permettre d'assurer du transit des écoulements sans occasionner de débordements. À partir de ce tronçon, la quantité de seuil installé sur le torrent diminue. La pente moyenne est de 13%.

À noter que ce tronçon a fait l'objet de travaux de reprise par le RTM/ONF en 2018 avec l'arasement d'un seuil, à l'extrémité aval du tronçon, et la réfection du chenal enroché, son état est donc aujourd'hui très bon.



Figure 124 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon RG_TH1



Figure 125 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du pont n°2 – ponceau agricole

5.1.3.2 Lit du Piésan au droit des ouvrages constitutifs RG_TH2 et RD_TH1

Le faciès du torrent au droit de ce tronçon est semblable au précédent. Il est marqué par ailleurs par la présence en aval par le franchissement du pont de la route communale qui induit une réduction de

section. Des travaux d'abaissement ainsi que d'augmentation de la pente du radier ont eu lieu en 2018 sur le seuil aval du pont afin d'obtenir une capacité de transit supérieure. Les talus du lit du torrent sont en enrochements libres. Un enherbement des parements est présent mais est fréquemment entretenu, permettant l'inspection des ouvrages.



Figure 126 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon RG_TH2 et RG_TH1, depuis l'extrémité amont du tronçon



Figure 127 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du pont n°3 (pont communal), à l'aval des tronçons

5.1.3.3 Lit du Piésan au droit des ouvrages associés entre les ponts 2 (communal) et 3 (départemental)

Ce tronçon est encadré en amont par le pont de la route communale et en aval par le pont de la route départementale. Il présente une section et une gamme de pente semblables à celles du tronçon précédent. Les berges du torrent présentent également sur ce linéaire une protection en enrochement sec en rive droite, maçonnés en rive gauche.



Figure 128 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon compris entre les ponts 2 et 3 vu vers l'aval



Figure 129 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du tronçon compris entre les ponts 2 et 3 vu vers l'amont

5.1.3.4 Lit du Piésan au droit des ouvrages constitutifs RG_TH3 et RD_TH2

Ce tronçon est borné en amont par le pont de la RD182 qui génère une réduction de la section d'écoulement et en aval par la plage de dépôt. En aval du franchissement de la RD182, le lit du torrent est naturel et incisé ; son aspect diffère de l'amont du pont où un pavage du fond de lit lui a conféré une résistance à l'incision que l'on ne retrouve pas à l'aval. L'objectif de cette partie du torrent est de permettre le transit des écoulements sans débordement jusqu'à la plage de dépôt. Cependant, les berges n'étant pas protégées, le torrent a généré de nombreuses anses d'érosions sur ce linéaire, en particulier lors de la crue très érosive de 2014. En outre, une importante végétation recouvre les talus du lit. Le torrent est globalement encaissé sur ce tronçon avec une pente moyenne de 10%.

Des travaux sont prévus dans le cadre de ce projet afin de conforter les berges et assurer le transit des crues sans débordement ; à ces fins, le lit du Piésan sera donc intégralement repris sur ce linéaire. Ces travaux sont décrits au chapitre 5.2.



Figure 130 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit du pont n°4 (extrémité amont du tronçon)



Figure 131 : Faciès du lit du torrent du Piésan au droit des tronçons RG_TH3 et RD_TH2

5.1.4 Description des ouvrages constitutifs du système d'endiguement et des ouvrages associés

5.1.4.1 Description des ouvrages constitutifs du système d'endiguement

5.1.4.1.1 RG_TH1 et RG_TH2

Ce dispositif d'endiguement est implanté au niveau de l'apex du cône de déjection entre les PK 850 et 760. Il est encadré en amont par le ponceau agricole et en aval par le pont de la route communale. Il est découpé en deux tronçons homogènes. Le premier tronçon a été l'objet de travaux en 2018, dans lesquels un enrochement bétonné a été installé sur la berge en rive gauche. Le second possède une configuration similaire à la différence de la protection de berge qui est en enrochement libre et date de 2012.

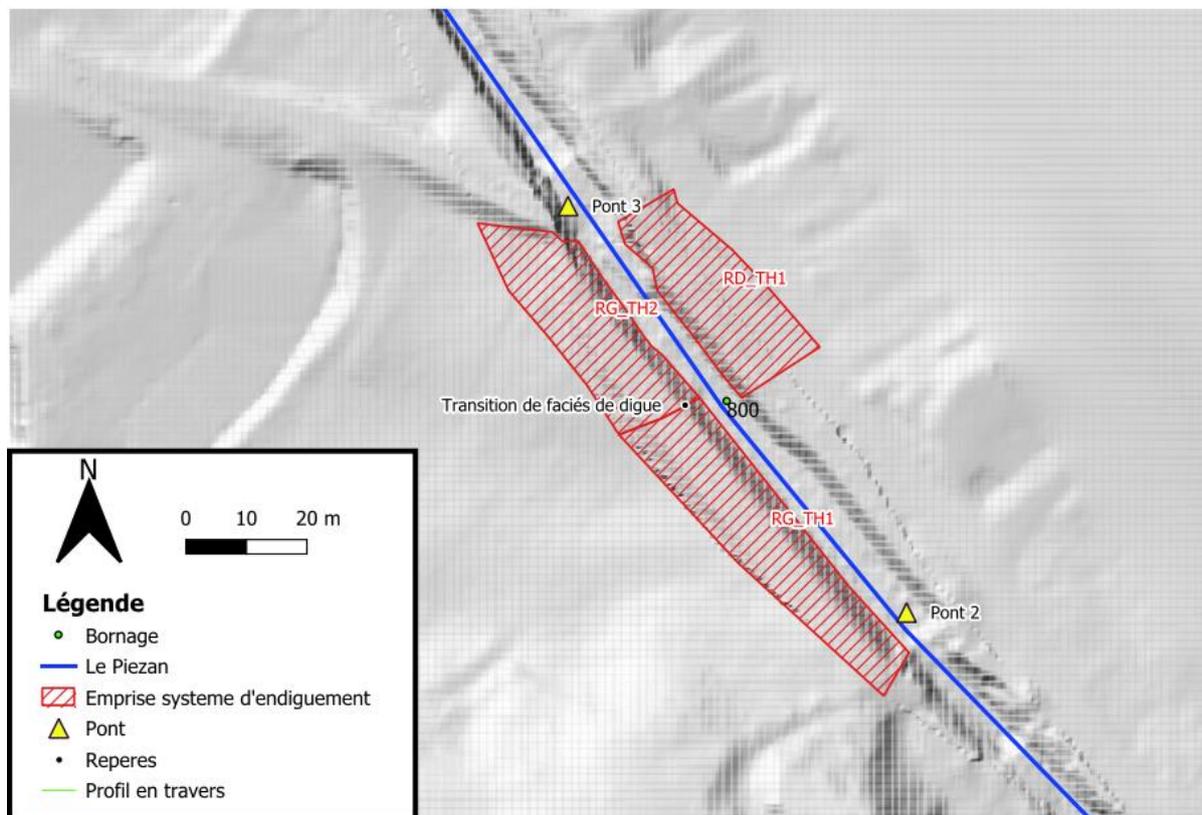


Figure 132 : Emprise du système d'endiguement au niveau des tronçons RG_TH1 et RG_TH2

Le profil en long permet d'identifier que le terrain en rive gauche au droit de la digue est relativement basse vis-à-vis du lit du torrent, notamment entre les PK 810 à 750. De ce fait, la digue est assez vite mise en charge lors des crues.

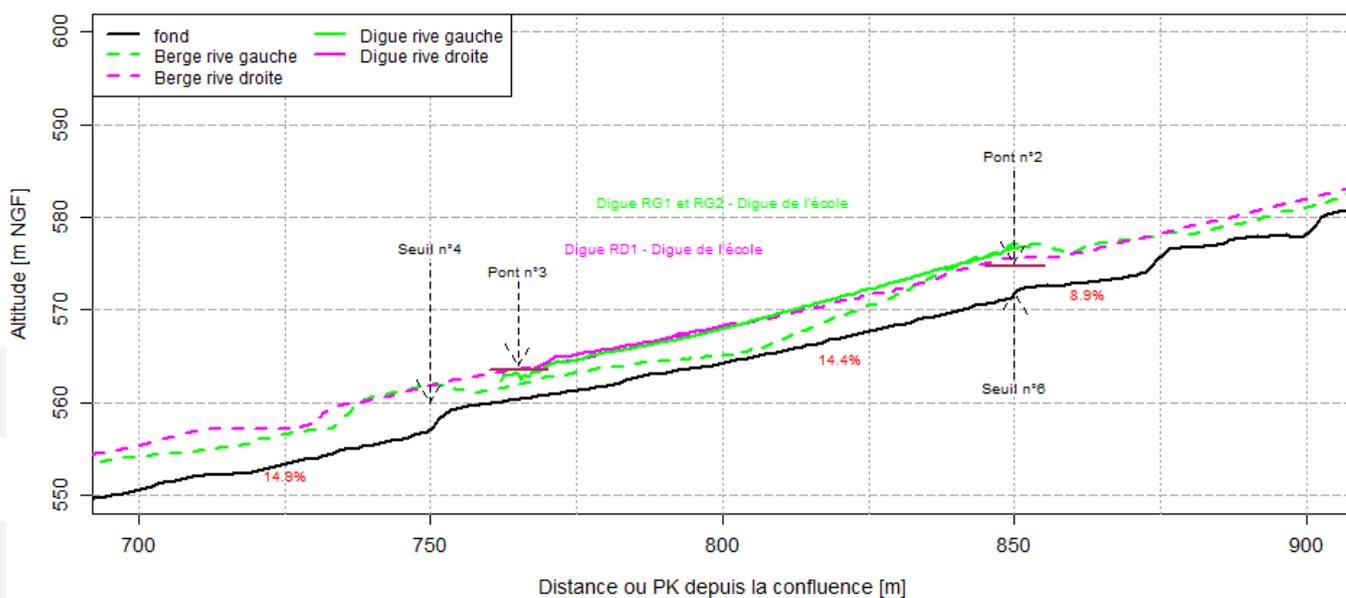


Figure 133 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH1 et RG_TH2

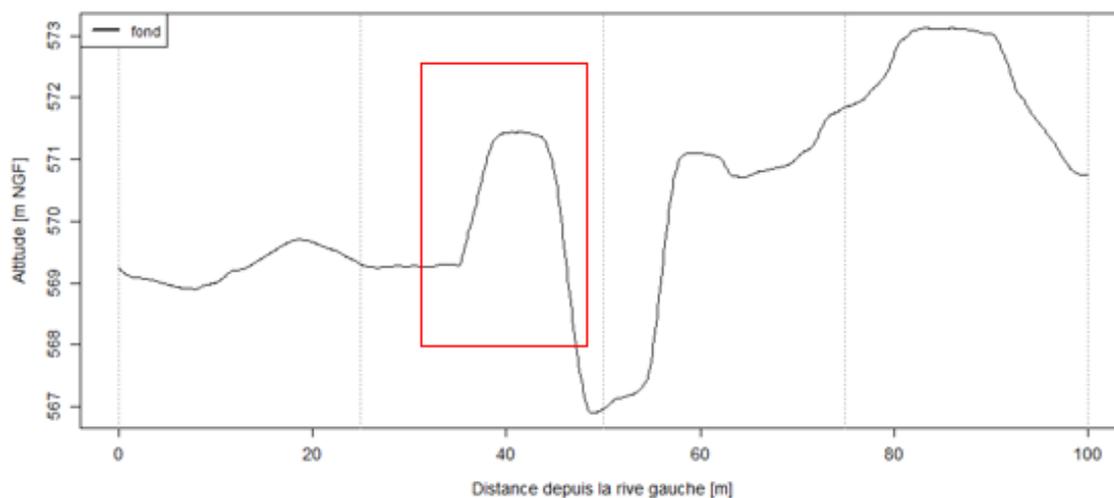
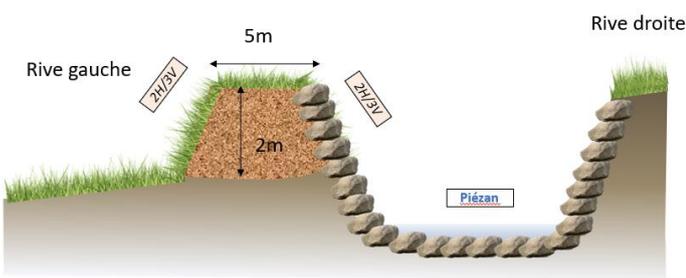


Figure 134 : Profil en travers du tronçon RG_TH1 au niveau du PK820

Le tableau suivant reprend les principales caractéristiques de la digue RG_TH1 :

Tableau 48 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH1

RG_TH1		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 2 m</p> <p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Largeur en base : 12 m</p> <p>PM : 850-800</p> <p>Longueur : 55 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochement bétonné.</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 2H/3V</p>	<p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau et lit mineur enrochement bétonné.</p> <p>Présence de tuyau</p> <p>Pente 2H/3V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piésan
		

Ce dernier profil en travers confirme l'observation du profil en long vis-à-vis de la sollicitation de la digue lors de crues.

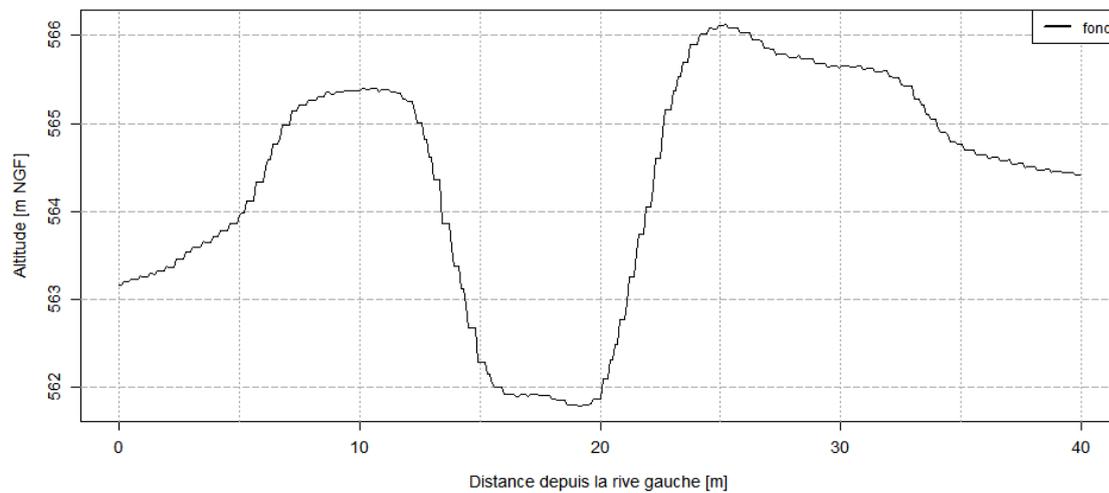
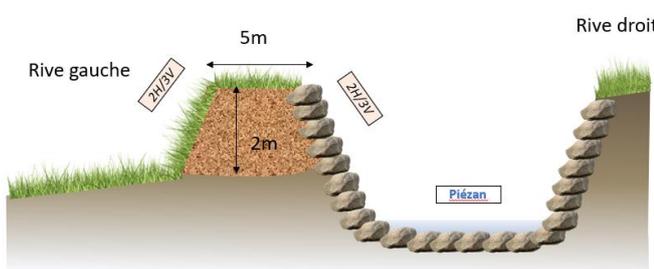
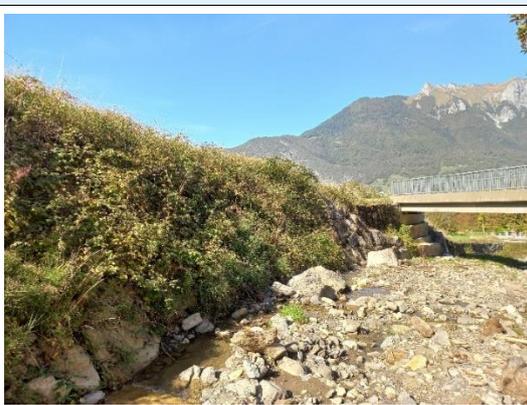


Figure 135 : Profil en travers du tronçon RG_TH2 au niveau du PK780

Tableau 49 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH2

RG_TH2		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 2 m</p> <p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Largeur en base : 12 m</p> <p>PM : 800-760</p> <p>Longueur : 35 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochement libre.</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 2H/3V</p>	<p>Largeur en crête : 5 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau en enrochement libre.</p> <p>Présence de végétation.</p> <p>Pente 2H/3V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

5.1.4.1.2 RD_TH1

Ce dispositif d'endiguement est implanté en rive droite entre les PK 800 et 760. Cet ouvrage est probablement apparu avec la création de la route qui a généré une surélévation par rapport au terrain naturel au moment de son aménagement. Il est borné en aval par le pont de la route communale. Ce tronçon possède une protection de berge qui est en enrochement libre et datant de 2012.

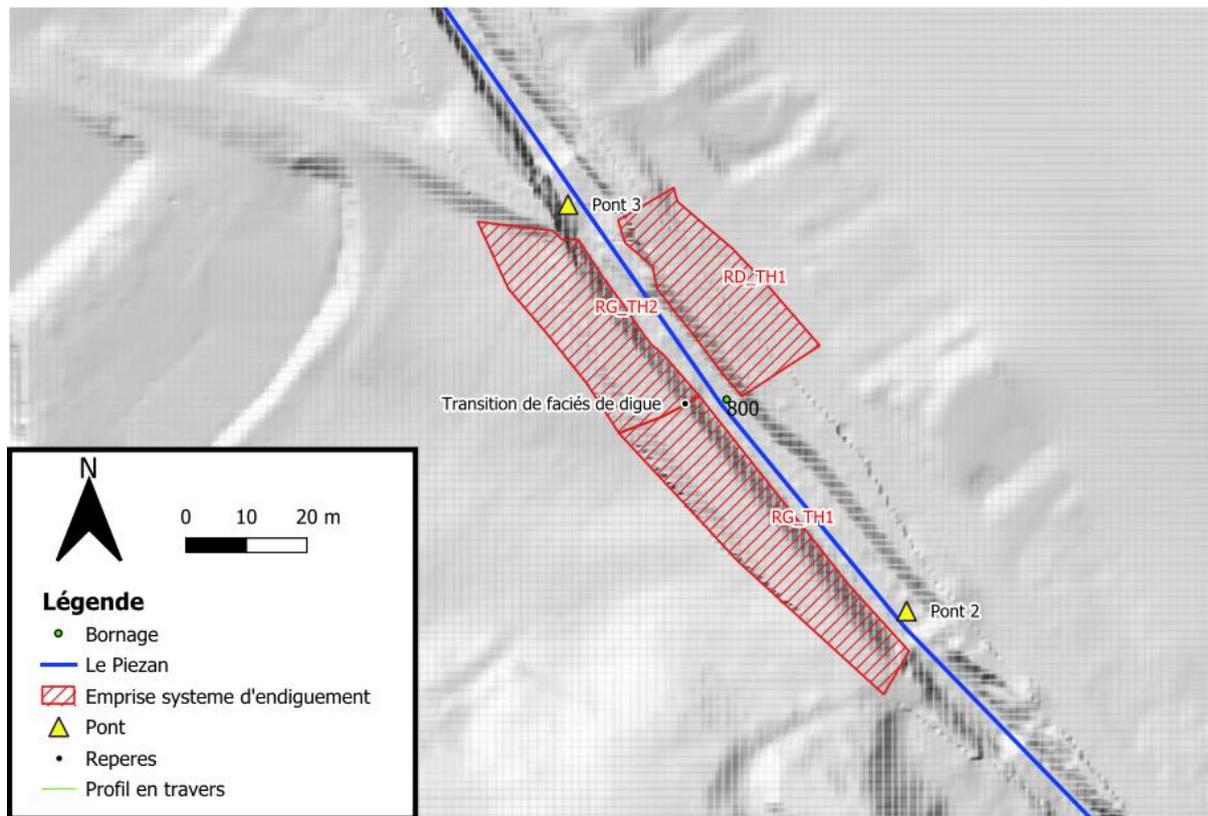


Figure 136 : Emprise du système d'endiguement au niveau du tronçon RD_TH1

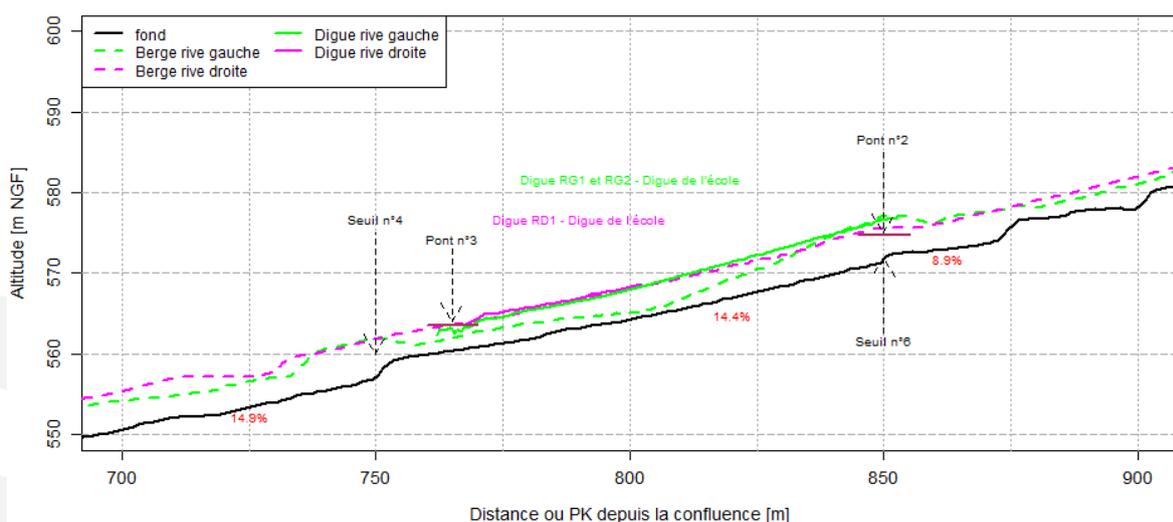


Figure 137 : Profil en long au droit du tronçon RD_TH1

Le profil précédent permet de constater que l'ouvrage en rive droite se met vraisemblablement en charge après l'ouvrage en rive gauche (l'écart avec le terrain naturel semble plus limité)

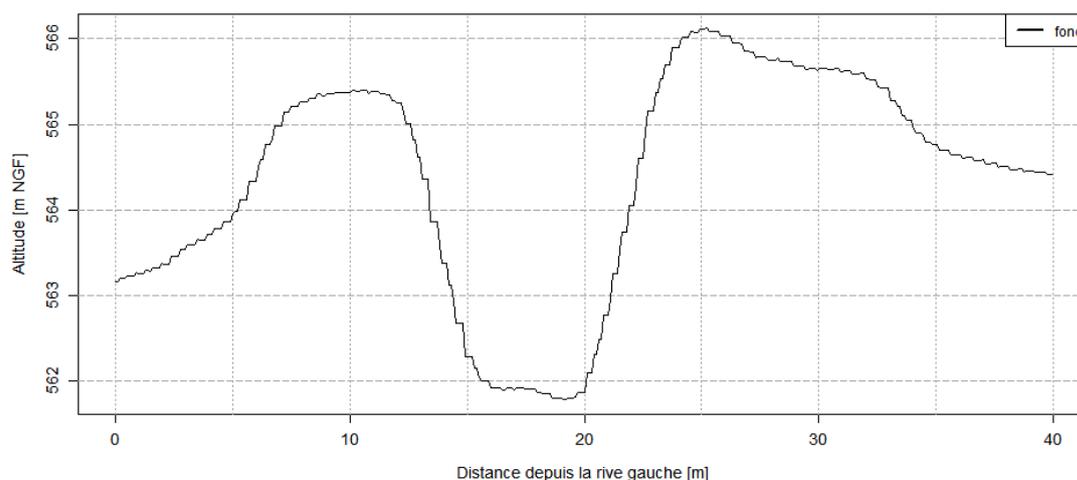
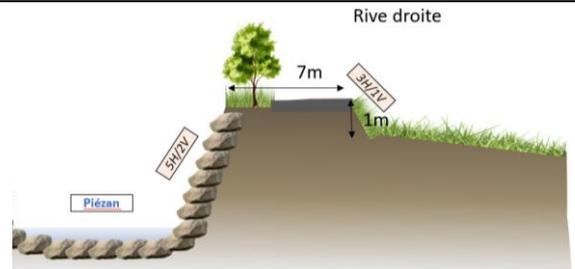


Figure 138 : Profil en travers du tronçon RD_TH1 au niveau du PK780

Le profil en travers permet de préciser les caractéristiques de l'ouvrages (qui sont par ailleurs repris dans le tableau suivant), l'ouvrage rive droite est très épais avec la présence de la chaussée en crête.

Tableau 50 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH1

RD_TH1		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 m</p> <p>Largeur en crête : 7 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 800-765</p> <p>Longueur : 35 m</p>	<p>Digue en levée protégée par enrochements libres</p>	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 3H/1V</p>	<p>Largeur en crête : 7 m</p> <p>Présence de végétation et chaussée.</p>	<p>Berge du cours d'eau en enrochement libre.</p> <p>Présence de tuyau</p> <p>Pente 5H/2V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piésan
		

5.1.4.1.3 RG_TH3 et RD_TH2

Sur cette partie, le système d'endiguement n'est protégé ni en fond ni en berge pas des enrochements. En outre, on observe de nombreuses anses d'érosions (cf. 5.1.3.4) en berges qui menacent l'intégrité de ces tronçons. Ces tronçons vont faire l'objet de travaux de confortement via **une stabilisation des talus et du fond du lit par enrochement**.

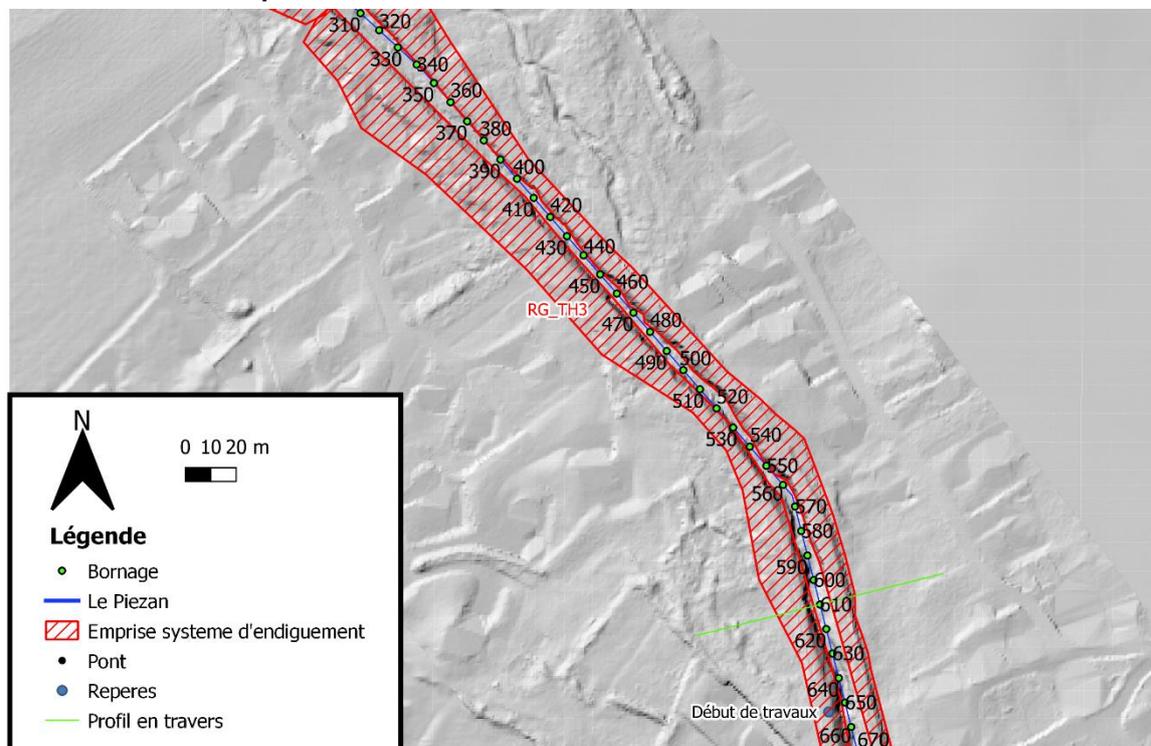


Figure 139 : Emprise du système d'endiguement au niveau des tronçon RG_TH3 et RD_TH2

Les profils complètent et confirment la description du faciès du torrent faite plus haut :

- Les berges du torrent sont hautes par rapport au fond du lit (tout du moins sur la première partie du tronçon ; en aval, on entrevoit l'influence de la plage de dépôt) ;
- On observe un raidissement des pentes des talus du torrent ;
- La largeur du lit semble rétrécir.

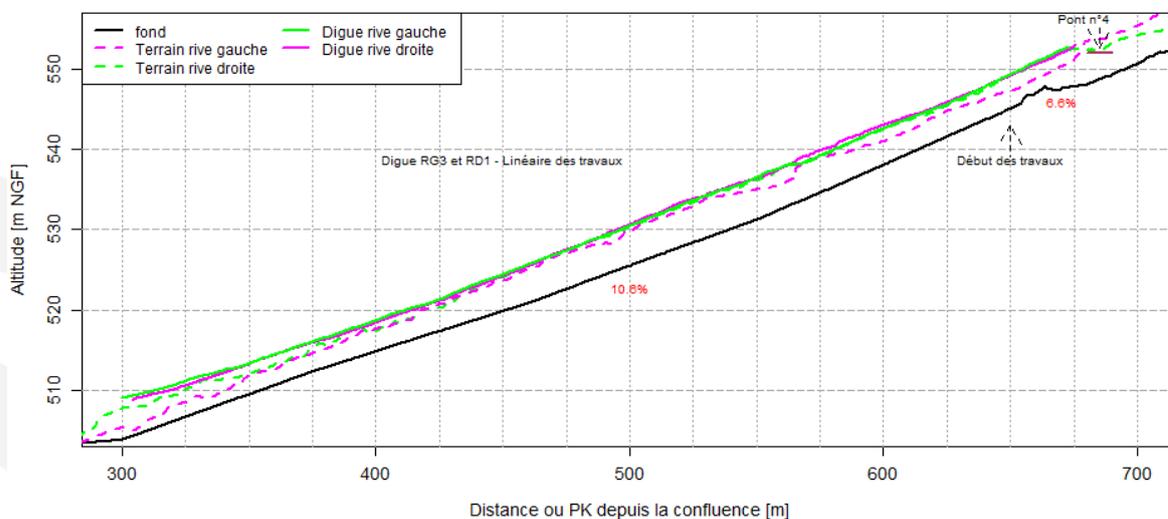


Figure 140 : Profil en long au droit des tronçons RG_TH3 et RD_TH2

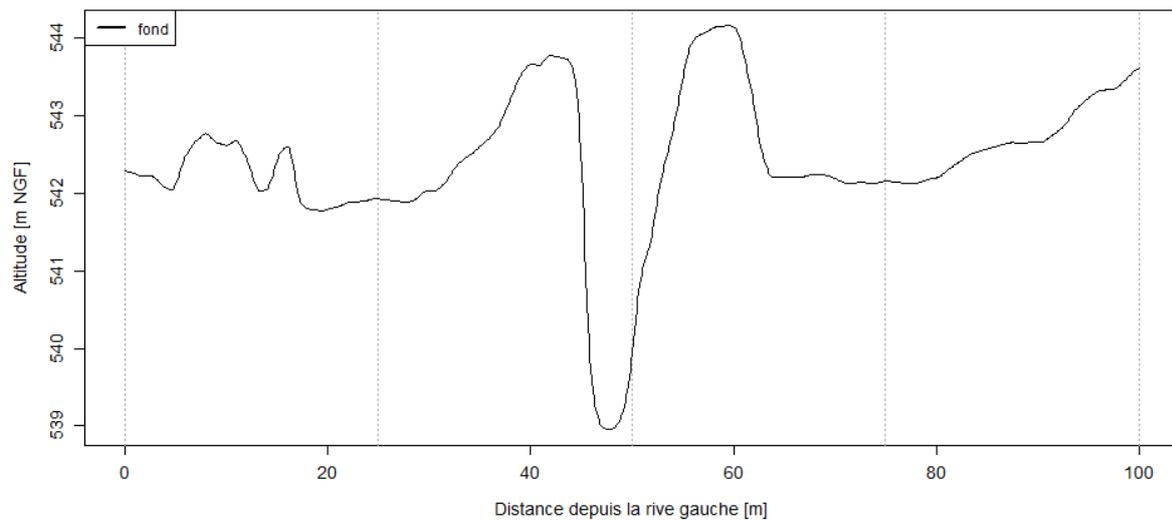


Figure 141 : Profil en travers des tronçons RG_TH3 et RD_TH2 au niveau du PK610

Toutes ces observations contribuent à dégrader et menacer l'endiguement sur ces tronçons. Les tableaux suivants reprennent les principales caractéristiques des digues RG_TH3 RD_TH2 :

Tableau 51 : Caractéristiques géométriques du tronçon RG_TH3

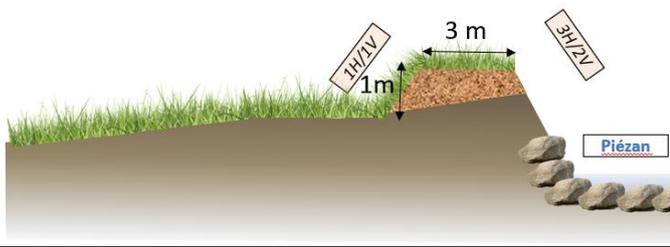
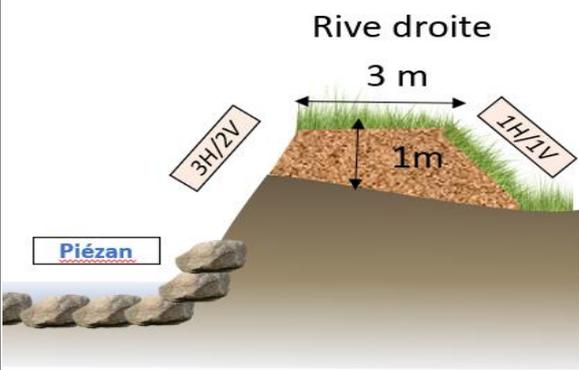
RG_TH3		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 1.5 m</p> <p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 650-300</p> <p>Longueur : 375 m</p>	<p>Digue en levée.</p>	<p>Rive gauche</p> 
Côté protégé	Crête	Côté rivière
<p>Enherbé.</p> <p>Pente 1H/1V</p>	<p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Présence de végétation.</p>	<p>Berge du cours d'eau naturelle.</p> <p>Pente 3H/2V</p>
Photographie coté protégé		Photographie coté Piézan
		

Tableau 52 : Caractéristiques géométriques du tronçon RD_TH2

RD_TH2		
Dimensions	Constitution	Schéma
<p>Hauteur : 1 à 1.5 m</p> <p>Largeur en crête : 3 m</p> <p>Largeur en base : 10 m</p> <p>PM : 650-300</p> <p>Longueur : 375 m</p>	Digue en levée.	
Côté protégé	Crête	Côté rivière
Enherbé. Pente 1H/1V	Largeur en crête : 3 m Présence de végétation.	Berge du cours d'eau naturelle. Présence de végétation. Pente 3H/2V
Photographie coté protégé		Photographie coté Piésan
		

5.1.4.2 Description des ouvrages associés liés au caractère torrentiel du Piésan

Sur le cône du Piésan sont implantés des ouvrages qu'il convient de retenir comme ouvrages associés. En effet, même si ces derniers ne possèdent pas un faciès de digue, ils participent au bon fonctionnement du système d'endiguement du Piésan (contrôle des divagations du torrent, fixation du profil en long au droit de la zone protégée).

Ces ouvrages sont localisés, pour une part, en face de l'ouvrage RG_TH1, soit entre le ponceau agricole et la digue RD_TH1 sur un linéaire d'environ 40 mètres, et, pour l'autre part, entre les ponts de la route communale et départementale sur un linéaire d'environ 75 mètres.

On y retrouve un seuil en amont de chacun de ces tronçons (seuil du ponceau agricole et du pont de la route communale) ainsi qu'une berge enrochée en rive droite pour le premier tronçon et la totalité du chenal en enrochements libres et bétonnés (radier et berges) pour le second.

Les figures ci-dessous localisent et présentent les ouvrages concernés.



Figure 142 : Localisation des ouvrages associés du Piésan



Figure 143 : Vue des ouvrages associés (compris entre la digue RD_TH1 et le ponceau agricole) depuis le pont de la route communale vers l'amont



Figure 144 : Vue des ouvrages associés (compris entre les deux tronçons endigués) depuis le pont de la route départementale vers l'amont

5.1.4.3 Description géotechnique des ouvrages et de leurs fondations

Une étude géotechnique a été menée sur le système d'endiguement en 2016, par le bureau d'étude Confluence. Il s'agit d'une mission normalisée de type G5. Cette étude est jointe en annexe de cette présente étude.

Les tronçons étudiés lors de cette mission étaient :

- RG-TH1 et RG-TH2 nommées Digue 1RG dans le rapport de 2016,
- RD-TH2 nommée Digue 2RD dans le rapport de 2016.

L'objectif fixé était de définir les paramètres géomécaniques et de vérifier la stabilité de ces digues au niveau de profils types. Pour cette raison, un complément d'étude a été réalisé par le RTM/ONF, en reprenant les paramètres géomécaniques des sols issus de l'étude de Confluence.

Ce complément permet également de traiter des cas de charges qui n'avaient pas été identifiés lors de l'étude de 2016 (cf. complément joint en annexe).

Nous synthétisons ci-dessous les principaux enseignements de ces deux rapports. Pour plus de détails, se reporter aux rapports d'études annexés.

La stabilité des tronçons RG-TH3 et RD-TH2 est présentée dans la présente étude.

(Synthèse des éléments issus de l'étude Confluence, 2016).

Les paramètres géomécaniques ont été évalués à partir de différents sondages (sondages destructifs, pénétromètres, fouilles à la pelle, essais de perméabilité et profils sismiques) et d'essais en laboratoire (granulométries, VBS, mesures de masses volumiques, essais de cisaillement, classification GTR).

Les deux types de formations rencontrées au niveau des sondages sont :

- Les remblais constitutifs des digues, issus de matériaux de dépôts torrentiels (amas de blocs $d_{max}=1$ m, très peu de limons)
- Les dépôts torrentiels/moraines (limons bruns et blocs anguleux volumineux)



Figure 145 : Fouille à la pelle des matériaux (digue 1RG - RG-TH1) - Source : Etude confluence 2016

La distinction entre ces deux formations n'est visuellement pas évidente. Les sondages pénétrométriques et les profils sismiques ne permettent pas non plus d'en faire clairement la distinction du fait d'une résistance mécanique proche, pour les deux niveaux.

Les résultats des essais de cisaillement présentent des valeurs élevées, caractéristiques de matériaux flottants (valeurs d'angle de frottement comprises entre 32 et 40°). Ces mesures ont été réalisées sur la fraction fine et les angles de frottement réels des matériaux en place seraient plus élevés.

Les remblais de la digue présentent une forte perméabilité et peuvent donc rapidement se saturer en eau.

Les hypothèses retenues pour les calculs de stabilité sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 53 : Caractéristiques géomécaniques retenues pour les calculs de stabilité - Source Confluence 2016

Formation	Caractéristiques mécaniques		
	Poids volumique humide	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
	γ_h (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
[R] – Remblais issus des dépôts torrentiels constituant la digue	19*	4	38
[1] Dépôts torrentiels / moraines	20*	5	40

5.1.5 Ouvrages traversants

La connaissance des ouvrages traversants est importante car elle permet d'identifier des potentiels points faibles du système d'endiguement. Un seul ouvrage traversant a été identifié lors des campagnes de terrain. Il s'agit d'un exutoire d'eau de pluie au niveau du PK540.



Figure 146 : Conduite d'eau pluviale se rejetant dans le Piésan au niveau de la zone des travaux projetés en RD au PK540

5.1.6 Végétation

Lors des campagnes de terrain la végétation au droit des ouvrages a été investiguée. Les ouvrages :

- RG_TH1 et RG_TH2 présente uniquement une végétation herbacée et arbustive, elle ne semble constituer de point faible pour ces ouvrages.



- RD_TH1 présente une végétation herbacée ainsi que 3 arbres en crête. Encore une fois cette végétation ne semble pas impacter la tenue de la structure. (Ouvrage épais et enrochement côté rivière)



- Les ouvrages RG_TH3 et RD_TH2 sont considérés en état travaux et ne présentent pas de végétation.

5.1.7 Autres ouvrages influençant les conditions d'écoulement

Les ouvrages de franchissements présents sur le cône de déjection peuvent avoir une influence importante sur les conditions d'écoulement. Les ponts induisent souvent une diminution de la capacité de transport (contrainte sur la section d'écoulement, hauteur et/ou largeur d'écoulement sont réduites). Lorsque l'on considère des laves torrentielles (ou toutes autres crues impliquant du transport de matériaux), il apparaît dans le cas du Piésan un risque d'obstruction qui entraîne des débordements sur la digue RG_TH2 en l'occurrence liés au pont.

Dans le cas du système d'endiguement du Piésan, on recense 3 ouvrages traversants sur le cône de déjection, décrits ci-après d'amont en aval :

Ponceau agricole

Cet ouvrage de franchissement est celui situé le plus en amont du cône de déjection. Il est situé en amont immédiat de la digue RG_TH1 et génère une diminution de la capacité d'écoulement du chenal du Piésan. Il est l'ouvrage qui présente la plus faible section de transit sur le cône de déjection. Lors de la crue de 2014, l'ouvrage ne s'est pas obstrué ; il a cependant été atteint par les écoulements comme les dépôts et flottant sur la Figure 148 en témoignant.



Figure 147 : Ponceau agricole vue amont



Figure 148 : Ponceau agricole suite à la crue de septembre 2014

Pont de la route communale

Cet ouvrage est situé à un peu moins de 100 m en aval du ponceau agricole et vient marquer l'aval de la digue de l'école ; le tronçon RG_TH2 se ferme également à son niveau. Un seuil vient marquer son franchissement. L'ouvrage a été reconstruit en 2011, et le seuil situé à l'aval a été rabaissé en 2012 pour augmenter le tirant d'air sous le pont (préconisation de l'étude hydraulique de 2010 [9]). Lors de la crue de 2014, le pont n'a pas été obstrué.



Figure 149 : Pont de la route communale vue amont



Figure 150 : Vue du Piésan au droit de la digue de l'école et du pont de la route communale suite à l'évènement de septembre 2014

Pont de la route départementale

Cet ouvrage est le dernier du cône de déjection ; il est situé juste en amont des tronçons RG_TH3 et RD_TH2 qui correspond à la zone des futurs travaux. En amont de cet ouvrage apparaît une discontinuité du système d'endiguement, les berges du Piésan sont pour autant protégées par un enrochement (libre en rive droite, bétonné en rive gauche). Il n'y a pas eu de débordements constatés lors de la crue de 2014, bien qu'il y ait eu des dépôts sur ce linéaire.



Figure 151 : Pont de la route départementale vue amont



Figure 152 : Pont de la route départementale vue amont suite à la crue de 2014

5.2 Ouvrages à construire ou à modifier

Les aménagements projetés consistent en :

- Un remodelage du lit du torrent en aval de la RD182 ;
- Une stabilisation du profil en long du torrent à l'aval RD182 pour tout type de crue (lave torrentielle et charriage) ;
- Un confortement des pied de berges érodées, en rive droite et gauche, pour les crues courantes et torrentielles rares.

Le mode de correction retenue, de type passif, vise à limiter les phénomènes d'incision et de débordement du lit torrentiel par la réalisation de travaux à proximité des enjeux existants à protéger, avec, pour grands principes de :

- Stabiliser l'ensemble en réduisant la pente des parements, ce qui augmentera concomitamment la section hydraulique et diminuera par ailleurs les hauteurs de passage des écoulements de laves ;
- Créer un chenal d'écoulement de section homogène, limitant les perturbations hydrauliques et favorisant le transit des matériaux solides vers l'aval ;
- Augmenter la résistance à l'érosion des berges en protégeant la base du parement par une protection en enrochement libre posée sur une couche de transition.

5.2.1 Description des travaux menés

5.2.1.1 Implantation - Profil en long

La côte de fond de lit en entrée de plage de dépôt est calée à 505,2 m. Les pentes en long varient de 13,28 % à 10% minimum permettant le transit des laves torrentielles jusqu'à la plage de dépôt.

5.2.1.2 Implantation - Profil en travers

Le lit du torrent est élargi avec une largeur variable atteignant jusqu'à 7 m. Les berges sont pentées à 3H/2V (34°). La section du chenal la plus régulièrement sollicitée par le torrent est enrochée en fond du lit et sur les berges sur une épaisseur moyenne de la protection 1 m et une hauteur de 1,50 m utile. En aval du pont départemental, localement il a été choisi de réaliser un enrochement bétonné en berge sur toute la hauteur de berge (3.5m).

Les pistes en crêtes de berges sont conservées sur une largeur de 3 m sur les 2 berges.

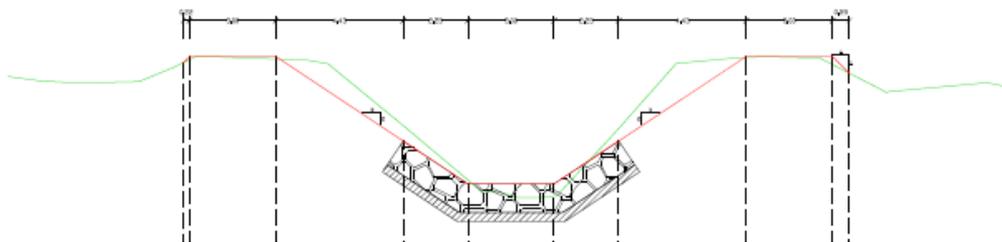


Figure 153 : Profil en travers type – berges en enrochements secs

5.2.1.3 Extrémité amont du chenal – arasement du seuil et raccordement au pont départemental

Le seuil béton en cours d'affouillement sera arasé.

Le nouveau chenal lisse le profil en long jusqu'au Pont Départemental. Le radier et les enrochements sur ce tronçon d'environ 30 mètres seront bétonnés. Sur les 10 premiers ml en sortie de pont, les

enrochements sur les deux berges seront posés verticalement sur une hauteur de 3.5 mètres puis la section aval sera rattraper sur les 20 ml suivants en abaissant la hauteur et les pentes d'enrochement au fur et à mesure.

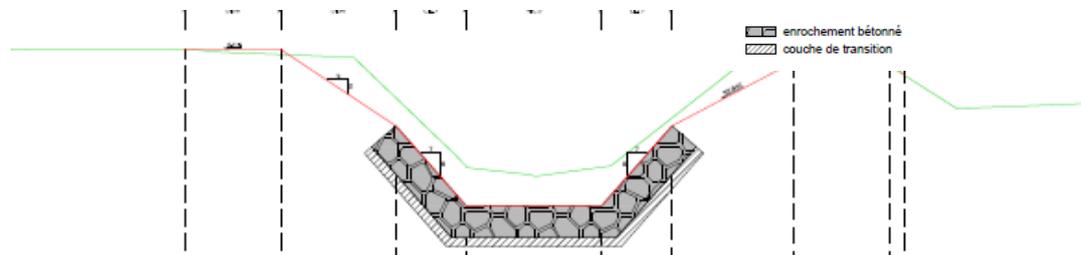


Figure 154 : Profil en travers du chenal – berges bétonnés

5.2.1.4 Extrémité aval du chenal – sabot de calage

Le fond de lit enroché se termine par un sabot parafouille à l'extrémité aval, au niveau de la plage de dépôt. A noter que le sabot a une longueur de 4m.

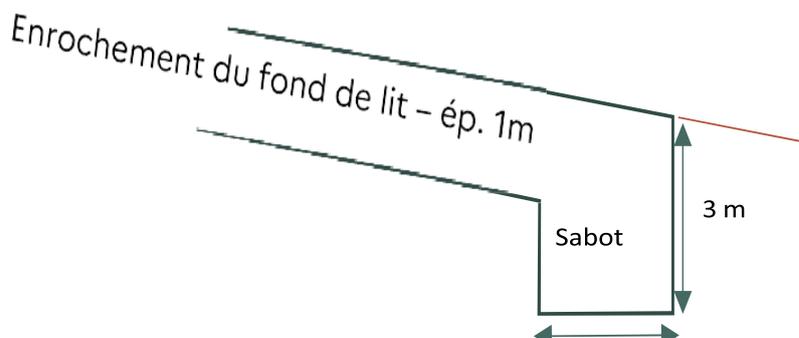


Figure 155 : Schéma de principe côté du sabot en enrochements libres

5.2.1.5 Enrochements des berges en entrée de plage de dépôt

Dès la sortie du chenal, les berges de la plage de dépôts seront enrochées sur environ 10 ml de part et autres pour prévenir les phénomènes d'érosions latérales. Cette protection n'est pas représentée sur les plans et sera piquetée au moment de la réalisation contradictoirement par le maître d'œuvre et l'entreprise.

- Hauteur utile = 2,50 m au départ avec une baisse progressive à 1,50 m en extrémité.
- Profondeur du sabot de fondation = 1 m
- Pente parement 3H/2V
- Longueur par berge = 10 ml – Longueur totale = 20 ml

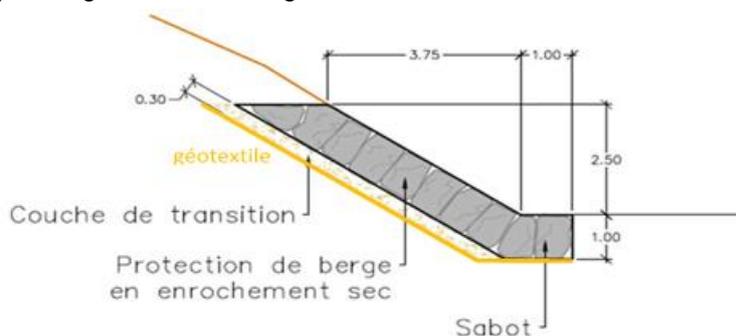


Figure 156 : Schéma de principe de l'entrée de plage de dépôt

Le plan des travaux est inséré ci-dessous :

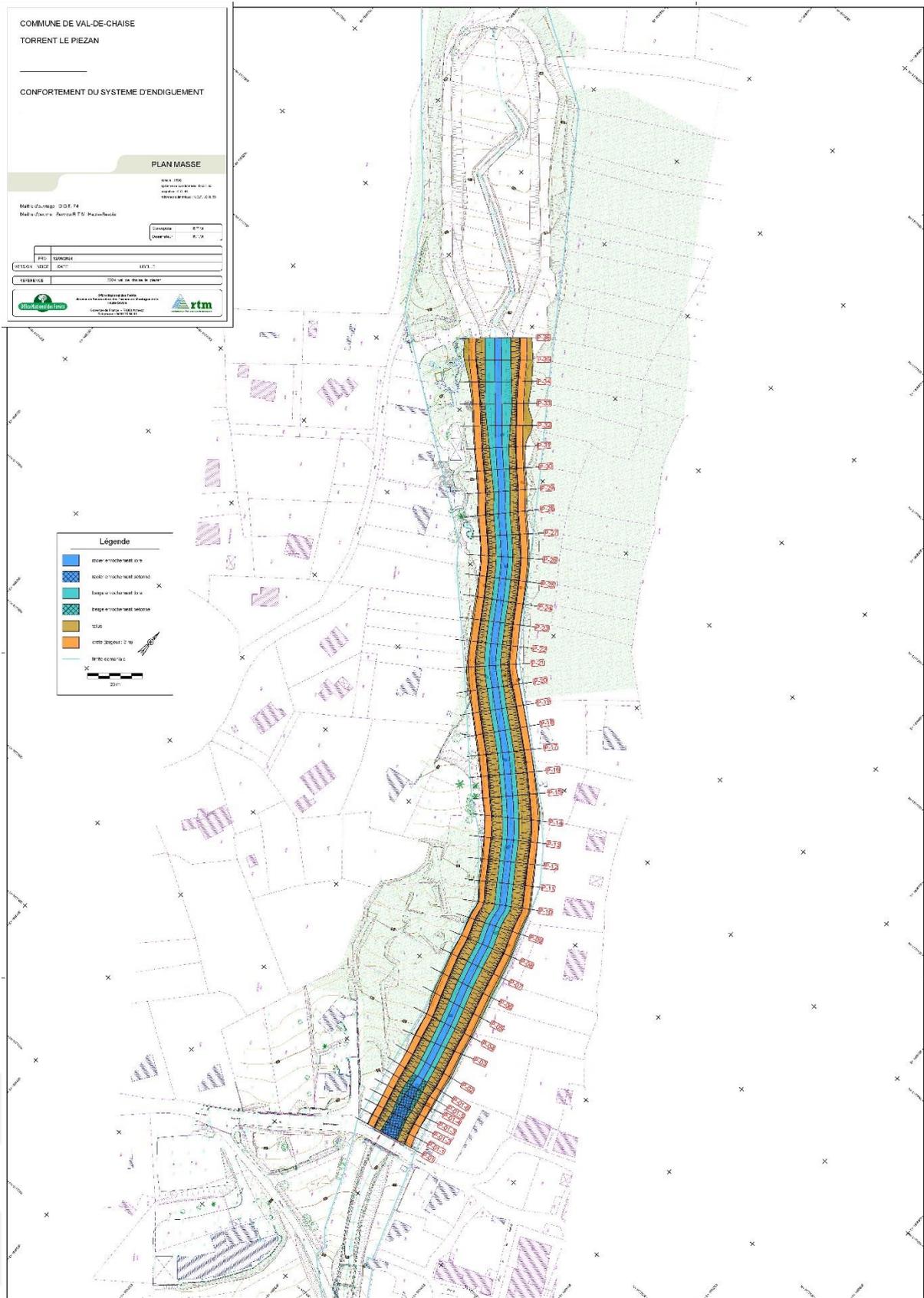


Figure 157 : Plan de masse des travaux prévus

5.2.2 Niveau de protection du système d'endiguement pendant les travaux

Les travaux consistent en la reprise du chenal du Piésan et n'abaisseront pas, même de manière provisoire, le niveau de protection du système d'endiguement.

5.3 Description fonctionnelle du système d'endiguement

5.3.1 Fonction principale des digues et historique

Les digues du Piésan sont établies sur le cône de déjection du torrent à la traversée des principaux enjeux. Leur positionnement et leur conception renseignent sur leur usage : les principales fonctions du système d'endiguement est de favoriser le transit des laves torrentielles et de limiter les risques de débordements au droit des zones urbanisées.

L'historique des crues indique que, depuis la crue historique de 1937, aucun dégât n'a été constaté sur le cône de déjection, malgré une atteinte de la crête de digue et une surverse sur le ponceau agricole lors de la crue de 2014.

5.3.2 Détermination des limites fonctionnelles des digues : estimation du risque de surverse

Généralités :

L'analyse des conditions d'écoulement sur le cône de déjection et au droit des digues du Piésan a été présentée dans le détail au chapitre 4. Pour les digues du Piésan, les risques de débordement sont liés à la hauteur d'écoulement des laves torrentielles.

Ces hauteurs d'écoulement sont principalement liées :

- À la rhéologie de la lave : un corps d'une lave « visqueuse » présentera une hauteur supérieure à celui d'une lave « fluide ». Les hauteurs du corps de lave de différentes rhéologies ont été calculées en appliquant le modèle de Herschel-Bulkley (formules de Coussot 1D et de Herschel-Bulkley) ;
- À la taille du front de lave torrentielle transportant des gros blocs et dépassant généralement la hauteur du corps de la lave torrentielle. La hauteur de ce front n'est pas calculable dans l'état actuel des connaissances et constitue une incertitude importante dans l'appréhension des risques de débordements comme le montre l'évènement de 2014 ;
- À la présence d'ouvrage constituant des obstacles à l'écoulement (ponts, passerelle, etc.) et pouvant, par leur présence (mise en charge, contraction latérale), rehausser localement l'écoulement à l'amont, voire générer une obstruction sous l'ouvrage.

Ces hauteurs d'écoulement sont également liées (avec une sensibilité bien moindre) :

- Au débit de pointe (et donc au volume) de la lave torrentielle ;
- Au niveau de fond du Piésan considéré (donnée topographique ou plan projet).

Estimation du risque de débordement :

Des calculs d'écoulement ont permis d'appréhender le risque de surverse de la digue selon la rhéologie de la lave. Afin de considérer les fortes incertitudes de l'estimation d'une hauteur de lave liées à la hauteur du front de lave torrentielle et celles intrinsèques au modèle (30%, [4]), il a été proposé d'afficher une interprétation des résultats des calculs « théoriques » en probabilité d'atteinte de la limite de débordement selon la considération suivante (voir paragraphe 4.1.3). Cette méthode est reprise de l'EDD du Nant Trouble (73) réalisée par le RTM/ONF [10].

Tableau 54 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche

Possibilité de débordement	Improbable	Peu probable	Probable	Très probable	Quasi-certain
Revanche sur hauteur du corps de lave	Supérieure à 1,5 m	Entre 1,5 m et 1 m	Entre 1 m et 0,5 m	Inférieure à 0,5 m	Nulle ou négative

Compte tenu :

- Des observations de la crue de 2014, où le sommet de berge en aval du pont de la départementale a été atteint,
- De l'occupation très boisée du bassin versant qui amène la présence irrémédiable d'un volume de tronc important en front d'une lave rare (même avec un entretien régulier assuré par l'ONF),
- Des échanges avec les référents nationaux RTM/ONF sur ce dossier,

nous proposons de prendre une marge supplémentaire sur ce tableau, pour les scénarios de laves uniquement, comme suit :

Tableau 55 : Classification des possibilités de débordement selon le niveau de revanche - adoptée

Possibilité de débordement	Improbable	Peu probable	Probable	Très probable	Quasi-certain
Revanche sur hauteur du corps de lave	Supérieure à 2 m	Entre 2 m et 1,5 m	Entre 1,5 m et 1 m	Entre 1 m et 0,5 m	Inférieure à 0,5 m

La notion d'atteinte de la limite des débordements ne présage en rien l'étendue de ces derniers. Pour des laves torrentielles, lorsque le dépassement est seulement lié au passage du front de lave, ou tant qu'il reste de faible hauteur, il peut seulement se traduire par des dépôts de matériaux en berge sous forme de bourrelets.



Figure 158 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : étude ETRM)

Dans le cas du Piésan, pour des événements d'une intensité rare à exceptionnelle, il semble que ce soit la présence des différents ponts sur le cône de déjection qui bride physiquement la capacité de transit, et est le plus susceptible de provoquer des débordements atteignant la zone protégée, en particulier s'il y a obstruction par un embâclement.

Pour rappel du chapitre 4 :

Tableau 56 : Table synthétique qualifiante du risque de surverse en fonction des aléas

Tronçon/pont	Scénarios courants				Scénarios rares	
	Charriage court	Charriage long	Lave fréquente fluide $\tau c/\rho=0.5$	Lave fréquente moyennement visqueuse $\tau c/\rho=1.5$	Lave rare fluide $\tau c/\rho=0.5$	Lave rare moyennement visqueuse $\tau c/\rho=1.5$
Ponceau agricole	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Probable</i>	<i>Très Probable</i>
RG_TH1	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
RG_TH2	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
RD_TH1	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Probable</i>
Pont de la route communale	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Quasi-certain</i>	<i>Quasi-certain</i>
Pont de la route départementale	<i>Probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Quasi-certain</i>	<i>Quasi-certain</i>
RG_TH3	<i>Probable</i>	<i>Probable</i>	<i>Peu probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>
RD_TH2	<i>Probable</i>	<i>Probable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Improbable</i>

Les revanches pour les laves torrentielles sont calculées en considérant la différence entre la crête de digue (au point le plus pénalisant) ou la sous-poutre de l'ouvrage, avec la hauteur du corps de lave (ou hauteur max d'engravement par charriage) donnée par les modélisations numériques.

On identifie donc bien ici les risques prépondérants :

- Pour les scénarios de charriage, le dépôt régressif sur le linéaire aval (plage de dépôt) engendre une surverse possible sur l'extrémité aval du système d'endiguement ;
- Pour les scénarios de lave fréquente, le risque d'accrochage des ponts et donc de surverse est déjà présent. Ce risque est fort pour les laves rares.

6. RETOUR D'EXPERIENCE CONCERNANT LA ZONE PROTEGEE ET LE SYSTEME D'ENDIGUEMENT

6.1 Accidentologie sur les ouvrages du Piésan

L'historique explicité au paragraphe 5.3.1 met en évidence la création progressive des ouvrages puis leur confortement entre 1938 et 2019.

Depuis 1938, aucune crue n'a engendré de débordements ou de rupture de ces ouvrages.

La crue récente de 2014 a causé de très importants désordres sur le chenal non protégé en aval de la route départementale, avec une forte incision, qui aujourd'hui continue d'évoluer et met en péril la sécurité des digues sur ce linéaire.



Figure 159 : Photo post crue 2014 – atteinte de la crête de berge par un front de lave transportant du bois, et forte érosion du chenal

Le retour d'expérience de cette crue met en évidence :

- La limite de capacité du chenal qui peut amener au dépassement du crête de digue, mais celle-ci n'est pas survenue en 2014 (limite de surverse), et ce n'est pas cette surface ponctuelle qui a engendré de dommages sur l'ouvrage ;
- La capacité érosive des queues de laves du Piésan (ou lié à des phénomènes mixtes), susceptibles d'incision de manière conséquente le fond du lit ou les berges non protégées par des enrochements.

Pour rappel, les travaux projetés ont pour objectifs de conforter le lit du Piésan suite à une importante incision de son lit et de ses berges sur le tronçon naturel situé entre le pont de la route départementale et la plage de dépôt.

6.2 Exemples connus d'incidents et d'accidents survenus sur le même type d'ouvrage

Au-delà des spécificités du torrent du Piésan, il est tenté d'établir un retour d'expérience sur les modes de rupture des digues vis-à-vis des aléas torrentiels pour établir l'analyse comparative des niveaux de résistance et de contrainte, étapes permettant de qualifier les probabilités de défaillance.

Il est à noter qu'à l'initiative du RTM/ONF, une étude accidentologique des digues en contexte torrentiel, pour des EDD mieux adaptées à ce contexte singulier a été lancée fin avril 2024, avec une première phase de recueil de données lancée auprès des GEMAPIens.

En effet, à ce jour, nous n'avons pas connaissance de rupture d'ouvrage dans une situation comparable à celle de l'endiguement du Piésan, à savoir des remblais canalisant des laves torrentielles.

6.3 Scénarios de défaillance pouvant être mis en évidence par l'étude accidentologique

6.3.1 Analyse accidentologique

6.3.1.1 Mécanismes en jeu

Les potentiels de dangers à considérer sur un système d'endiguement sont résumés ci-dessous :

- **Rupture par érosion régressive suite à surverse** : ce type de défaillance est à associer à un défaut de résistance classique des digues en terre non protégées sur leur parement côté terre, pour des fréquences de crue supérieure à la crue de protection. Une surverse prolongée avec des vitesses importantes en pied d'ouvrage (côté zone protégée) engendre une probable ruine de l'ouvrage.
- **Rupture par érosion externe côté torrent** : L'ouvrage est déstabilisé par l'érosion externe par affouillement de sa base ou de son parement (imputable au courant de la rivière) avec affaiblissement des caractéristiques mécaniques du corps de la digue pouvant conduire à la rupture de l'ouvrage.

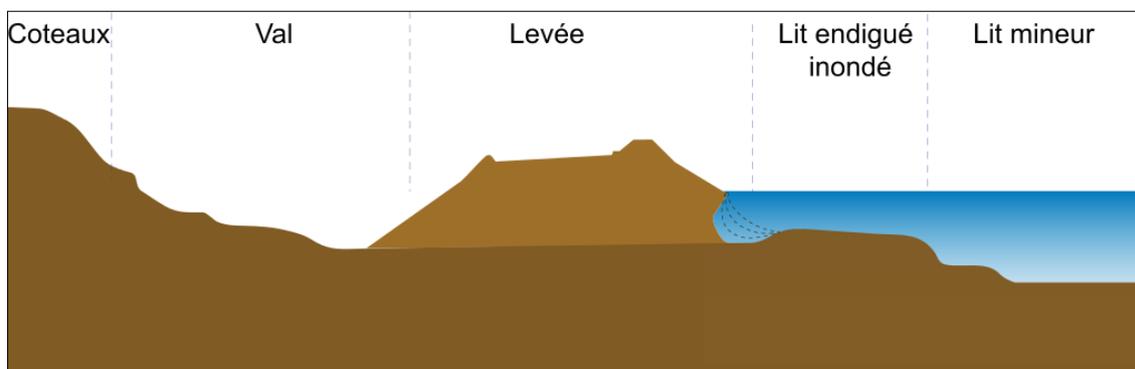


Figure 160 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe

- **Rupture par érosion interne** : classiquement sur les rivières, ce phénomène dépend de la géométrie des digues, ainsi que de leur état (terriers, végétation avec un développement racinaire important, composition en termes de matériaux du corps de digue). La mise en charge de la digue va entraîner une augmentation du gradient L/H de la digue. Le manque d'entretien et la géométrie « défavorable » d'une digue engendrent une nette augmentation de la probabilité d'apparition de ce phénomène. Les digues sont conçues avec une perméabilité définie, un filtre côté terre, ainsi qu'un grillage anti-fouisseur, qui permettent que les ouvrages soient résistants quelle que soit l'occurrence de la crue.

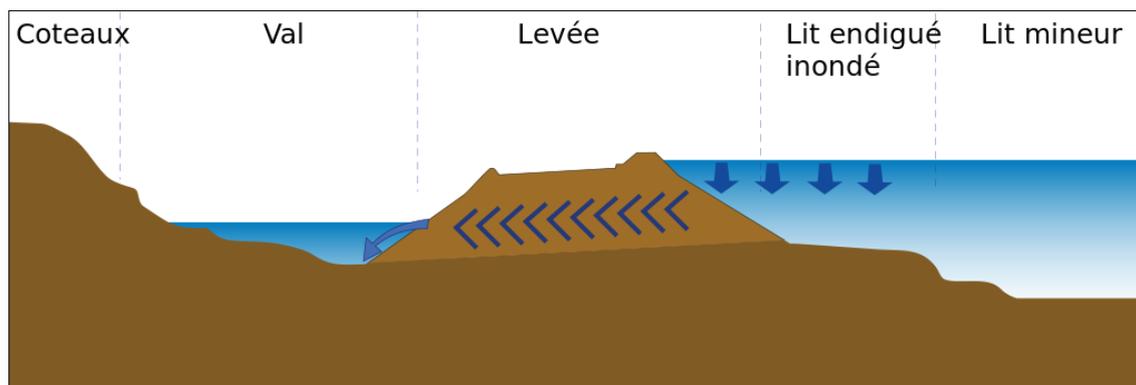


Figure 161 : Schéma de principe d'une rupture par érosion interne

- **Rupture par instabilité - glissement d'ensemble** : ce phénomène survient sur les digues trop pentues, et de faibles caractéristiques géotechniques.
 - ☐ côté cours d'eau, en phase de vidange rapide (décrue).
 - ☐ côté val, pendant la mise en charge (différence de charge élevée).

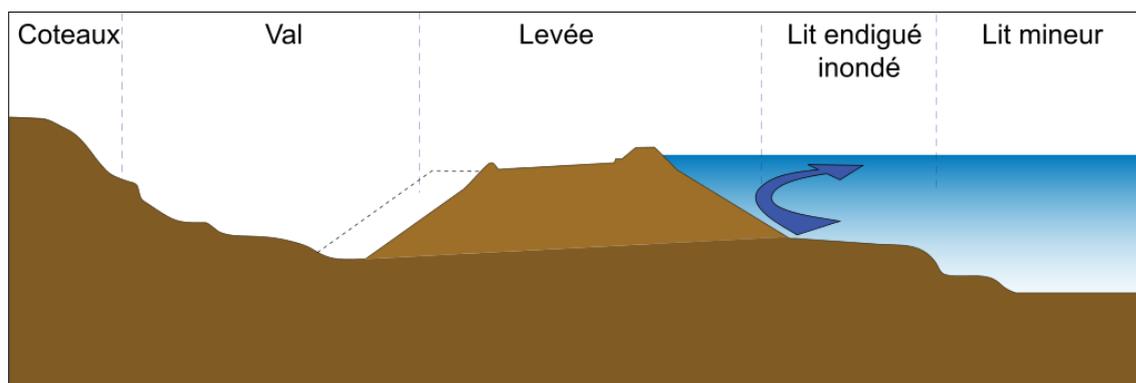


Figure 162 : Schéma de principe de rupture d'ensemble (côté cours d'eau)

- **Rupture à la suite d'un séisme**

L'événement redouté associé à un séisme est la survenue d'eau dans la zone protégée à la suite d'un séisme. Le système d'endiguement du Piésan étant de classe C en zone 4, les recommandations du CFBR indiquent que la justification du système d'endiguement au séisme est nécessaire.

La vérification au séismes est étudié ici vis-à-vis du glissement de talus avec les paramètres d'accélération définis au chapitre 4.

6.3.1.2 Rupture par surverse

Le mécanisme en eaux claires

Pour des écoulements liquides, les ruptures par surverse font suite à une érosion de la digue après débordement par-dessus la digue. L'érosion du talus val est favorisée par des fortes vitesses de surverse. Elle entraîne alors rapidement une brèche qui concentre et accélère les écoulements débordants. Le phénomène d'ouverture de brèche est alors d'autant plus favorisé et s'emballe.

L'ouverture de la brèche est susceptible de libérer des volumes d'eau importants, avec des vitesses et un niveau de charge très élevée. La dynamique est alors beaucoup plus intense que pour une situation sans digue, où les débordements auraient été plus progressifs, suivant la montée de la crue, et généralement répartis sur des tronçons plus longs qu'une largeur de brèche.

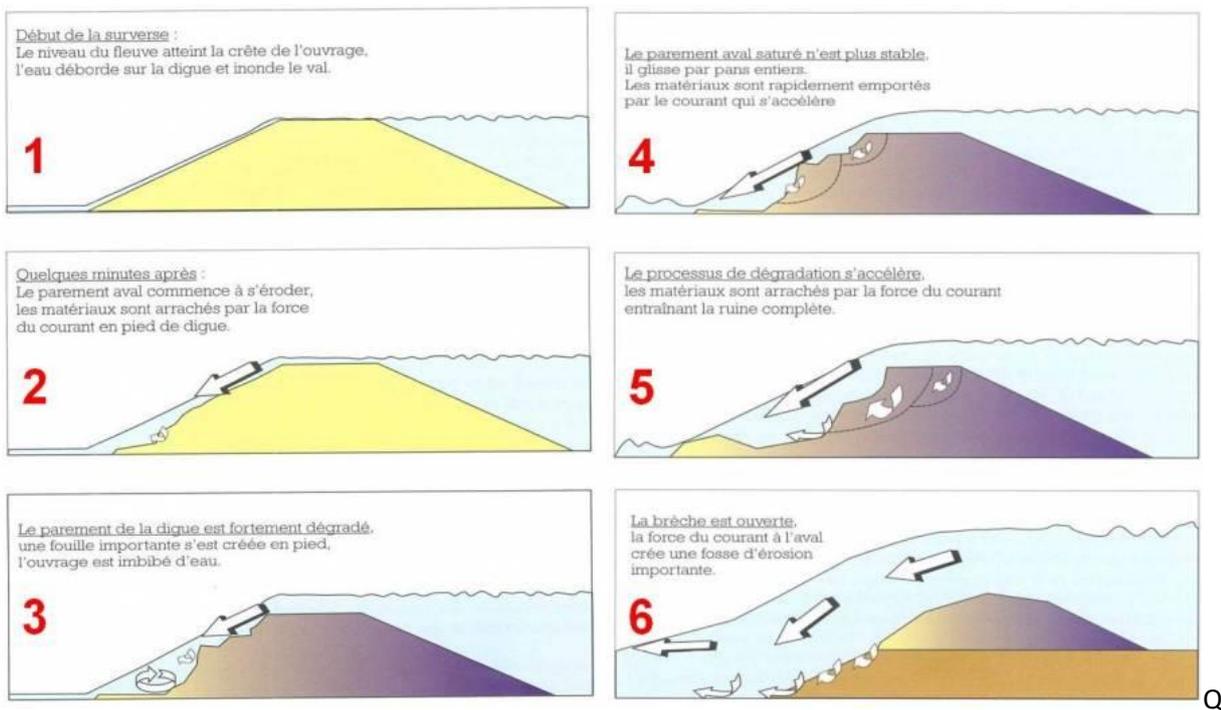


Figure 163 : schématisation du mécanisme de rupture par surverse (Mériaux et al, 2001)

Particularités des surverses sous forme de laves torrentielles

Les laves torrentielles suivent une loi de comportement de fluide non Newtonien dits « à seuil de contrainte ». La contrainte de l'écoulement doit dépasser le seuil de contrainte pour permettre une mise en mouvement de la lave. Aussi, la lave doit dépasser une certaine hauteur pour pouvoir s'écouler. Cette hauteur dépend de la rhéologie de la lave (plus ou moins visqueuse) et de la pente. En d'autres termes, cela traduit le fait que des épaisseurs non négligeables de lave peuvent être observées sans que la lave ne s'écoule.

Dans le cas de digues longitudinales au torrent sur un cône de déjection, comme sur le Piésan, lorsque la hauteur de dépassement de la crête de digue reste limitée, les débordements sur la digue ont une hauteur insuffisante (dans la gamme de pente en long de la digue) pour permettre leur écoulement.



Figure 164 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : étude ETRM)

Aussi, la lave se dépose souvent en cordon de matériaux, appelés bourrelets latéraux. Elle « s'autochenalise » et la capacité du lit est légèrement augmentée avant un réel débordement vers la zone protégée. Ce comportement nécessite également une largeur de crête suffisante, de plusieurs mètres, pour permettre le dépôt du cordon ; dans le cas contraire, où les digues sont étroites en crête, le débordement se déverse directement côté val.



Figure 165 : Bourrelets latéraux sur le torrent du St Martin, Saint-Martin de la Porte (73), suite à la lave de juillet 2019 (source RTM)

Lorsqu'une surverse atteint le côté val de la digue, l'emprise des débordements est dépendante du volume débordant. Sur un cône de déjection, la pente du terrain naturel coté val est généralement proche de la pente du lit. Si un faible volume est concerné par la surverse, la hauteur de lave chute dès la surverse, l'écoulement n'étant alors pas possible dans la gamme de pente coté val, la lave s'arrête sur des courtes distances. Pour des volumes élevés de surverse, par accumulation, les hauteurs de dépôts augmenteront et l'emprise des débordements s'étendra. La rhéologie de la lave est également importante : une lave « fluide » pourra s'étaler plus loin qu'une lave visqueuse. En revanche, une lave fluide aura une probabilité plus faible de déborder (toutes conditions égales par ailleurs).



Figure 166 : Arrêt rapide de débordements d'une lave après surverse sur une digue : crue du 22 août 2011 sur le torrent du Saint-Martin à Saint-Martin-de-la-Porte (73) (source RTM)

Une lave torrentielle surversant sur une digue non protégée est nettement moins érosive qu'un écoulement d'eaux claires. En effet, une surverse de lave torrentielle sans dégâts peut être observée sur des talus raide alors que l'érosion est très probable voire inéluctable pour des écoulements d'eaux

claires. Il est délicat d'en faire une généralité et il est considéré que des érosions restent possibles avec des laves. Toutefois, dans le cas de digues longitudinales au torrent, l'ouverture d'une véritable brèche par surverse latérale reste peu probable. Au contraire, la possibilité d'observer le comblement d'un début de brèche par des dépôts de lave n'est pas exclu, si le rayon hydraulique au droit de la brèche est trop faible pour permettre un écoulement de lave.

Cas particuliers de vigilance :

Il convient toutefois de présenter quelques cas particuliers pour lesquels il faut être vigilant :

- Cas des digues orientées partiellement ou totalement face à l'écoulement, avec des pentes élevées du TN coté val :

Ces situations peuvent par exemple être observées en partie haute de certains cônes de déjection, pour des digues de fermeture de plage de dépôt ou encore des digues de redirection des écoulements.

Si l'écoulement est freiné ou empêché dans le tronçon en aval de la digue (blocage d'un front après un coude, aménagement d'une surverse de plage de dépôt sous dimensionné, ...), la digue qui fait alors obstacle à l'écoulement peut rapidement être comblée coté amont par reconstitution d'une pente en long permettant l'écoulement puis surversée.

Dans ces cas, la forte pente du TN derrière l'ouvrage permet à la lave de s'écouler. Lorsque la surverse se produit, par érosion de la digue, le torrent lisse alors la pente en fond qui lui permet son écoulement dans la continuité du lit en amont et du TN en aval. Une brèche est alors ouverte et le torrent change de direction. Le torrent divague alors sur le cône et peut retrouver des anciens lits torrentiels ou en créer de nouveaux par autochenalisation.

L'ouverture d'une brèche n'engendre pas de sur-aléa coté val. En effet :

- ▶ Elle est permise par érosion d'une partie de la digue et des matériaux éventuellement atterris mais le volume correspondant, rechargeant la lave, reste négligeable devant le volume total de l'évènement ;
- ▶ La section d'ouverture créée par l'écoulement s'inscrit dans la continuité du lit en amont. Il n'y a alors pas d'augmentation significative du rayon hydraulique, et donc pas d'augmentation du débit.

Ce processus d'ouverture de brèche peut être rapproché des érosions d'assise de piste forestière ou de route lorsqu'elles coupent un torrent à lave. Dans ces cas-là, les pistes ou routes créent un replat sur le profil en long du torrent, qui disposent d'une forte pente en amont et en aval, permettant le transit de laves. Le passage d'une lave est alors susceptible d'emporter toute l'assise de la chaussée et de lisser naturellement la pente du torrent.

- Point bas isolé sur les crêtes de digues :

Les points bas isolés d'une crête de digues seront les premiers concernés par un débordement. Par comparaison à une digue à la crête régulière où le linéaire concerné par un début de surverse est plus long, la concentration de l'écoulement va dans le sens de l'augmentation du rayon hydraulique et donc de la favorisation d'un écoulement de type lave et de plus fortes contraintes.

Dans ces cas-là, il est plus délicat d'exclure la possibilité d'érosion du talus coté val, bien qu'il semble probable qu'elle ne soit pas non plus systématique.

Même si une brèche venait à s'ouvrir, il n'y a pas d'augmentation de l'aléa coté val. En effet, si la pente est élevée, la situation se rapproche du cas particulier précédent. Dans le cas d'un cône de déjection avec une pente en long coté val proche de celle du torrent, l'arrêt coté val est rapide en raison des hauteurs de débordements trop faibles pour permettre l'écoulement.

- Écoulement en fin de crue, ré-essuyage :

Après le passage du front et du corps de la lave, les écoulements en fin de crue sont plus liquides. S'ils viennent à surverser, ils peuvent être à l'origine d'érosion du talus coté val de la digue.

Les débits liquides en fin d'évènement sont généralement modérés et la section d'écoulement reste quoi qu'il en soit sans commune mesure avec celle de la lave torrentielle. Aussi, l'occurrence d'une surverse par des écoulements liquides sous-entend un dépôt important en amont voire l'atterrissement complet de l'ouvrage. Ces situations peuvent être rencontrées pour des digues de fermeture de zone de régulation ou de plage de dépôt.

Lorsque la surverse se produit, à la faveur des fortes vitesses sur le talus coté val, les écoulements se chargent des matériaux qu'ils viennent éroder dans la digue. Des matériaux peuvent aussi provenir d'une remobilisation des dépôts coté torrent.

Pour autant, même si cette érosion engendre un début de formation de brèche, une vidange de la zone atterrie à l'amont est improbable. En effet :

- ▶ Les débits modérés auront une capacité de transport limitée et négligeable devant le volume pouvant être transporté par un phénomène sous forme de lave torrentielle. Ils ne pourraient pas non plus remobiliser les éléments grossiers transportés par une lave ;
- ▶ Une fois la lave déposée, la pente en long et la section limitée de la brèche ne permettent pas de dépasser le seuil de contrainte.

Les débits en fin de crue restent également modérés. Par ailleurs, le volume apporté par le ré-essuyage est sans commune mesure à celui qui aurait été déposé par une lave torrentielle en l'absence de la digue. Sans ouvrage, un ré-essuyage par divagation des écoulements sur les dépôts de lave reste également possible. Aussi, si une brèche se crée à la faveur de l'érosion par une surverse d'écoulement liquide en fin de crue, elle ne sera pas à l'origine d'un sur-aléa.



Figure 167 : Ecoulement liquide suite à la lave torrentielle du 6 juin 2010 sur le Saint-Martin, à Saint Martin de la porte (73) (Source : RTM)

Synthèse :

La surverse d'un écoulement de type lave torrentielle sur une digue est beaucoup moins érosive que des écoulements en eaux claires. Généralement, elle n'est pas observée, même sur des talus raides. Pour autant, il convient d'être prudent dans certains cas où des brèches pourraient être observés :

- Digues partiellement ou totalement faces à l'écoulement avec pente forte coté val. Une brèche avec changement de direction du torrent est possible ;

- Points bas isolés sur des digues ;
- Ouverture de brèche par des écoulements d'eaux claires en fin d'évènement.

Il apparait que, contrairement à des crues liquides, des écoulements de lave au travers d'une brèche n'engendrent pas de sur-aléa côté val.

Lorsqu'une surverse se produit, le comportement d'une lave est radicalement différent de celui de l'eau. Les zones impactées dépendent du volume surversant. À l'exception de contexte à très fortes pentes, lorsque ce volume est faible, l'emprise des débordements peut se limiter au dépôt de bourrelets latéraux en crête de digues larges. Lorsque la surverse atteint le pied de la digue, les hauteurs de débordements étant faibles, le processus d'arrêt est rapide.

Application au Piésan :

Le raisonnement précédent amène à focaliser notre attention sur l'amont du pont communal, au droit de la digue RG_TH2, qui semble un point de vigilance. En effet :

- La capacité du pont est limitée pour une lave importante et ce pont est fortement susceptible d'être obstrué pour une lave rare ;
- La digue rive gauche est assez basse localement, très peu épaisse, et avec un fruit de talus assez important côté val ;
- Le Piésan présente une légère courbure sur le secteur, avec donc l'ouvrage rive gauche positionné en léger extrados.

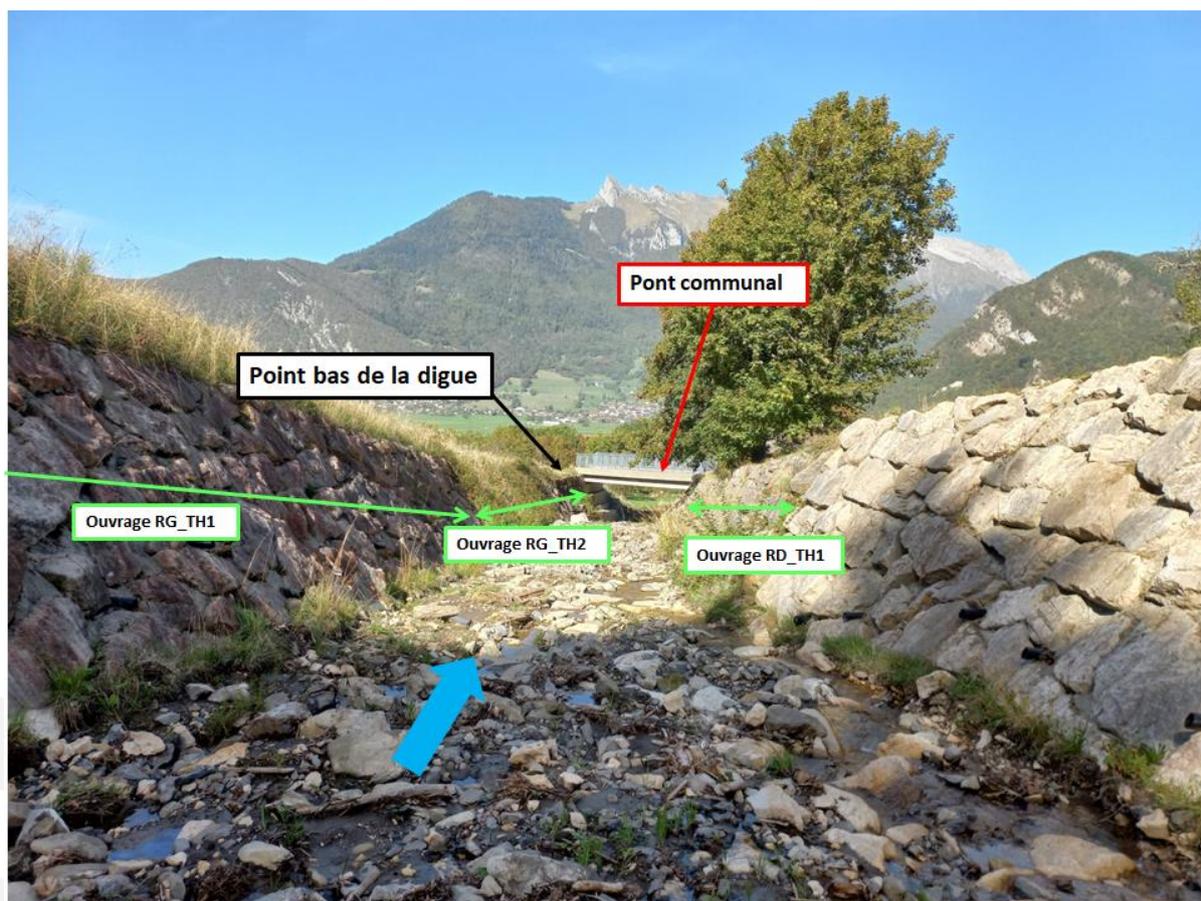


Figure 168 : vue depuis le chenal du Piésan en amont du pont communal

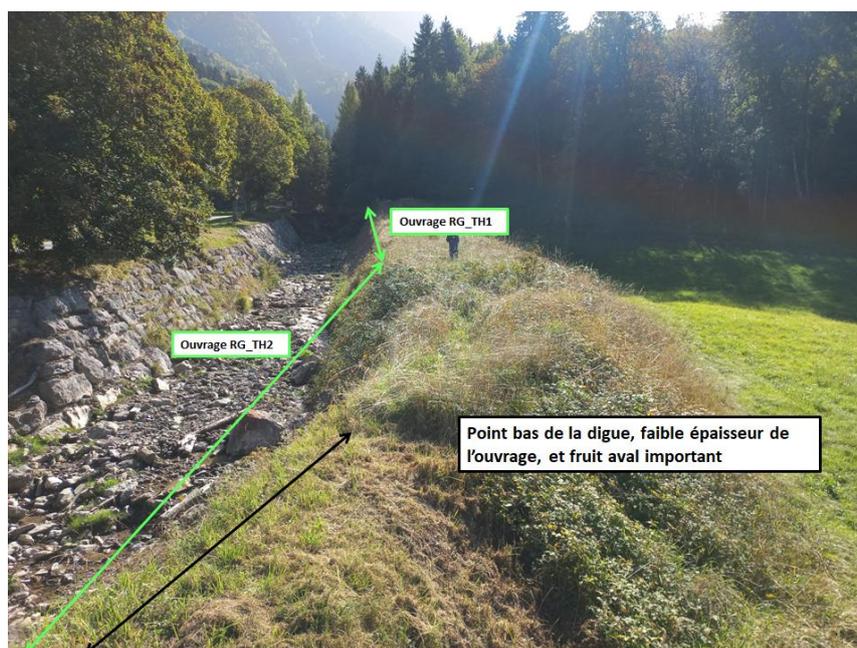


Figure 169 : vue depuis l'extrémité aval de l'ouvrage RG_TH2 du point "faible"

6.3.1.3 Rupture par instabilité au glissement

6.3.1.3.1 Stabilité géotechnique des ouvrages

La rupture totale est plutôt rare pour les digues artificielles. Cette rupture peut être initiée soit à partir du parement amont, soit depuis le parement aval.

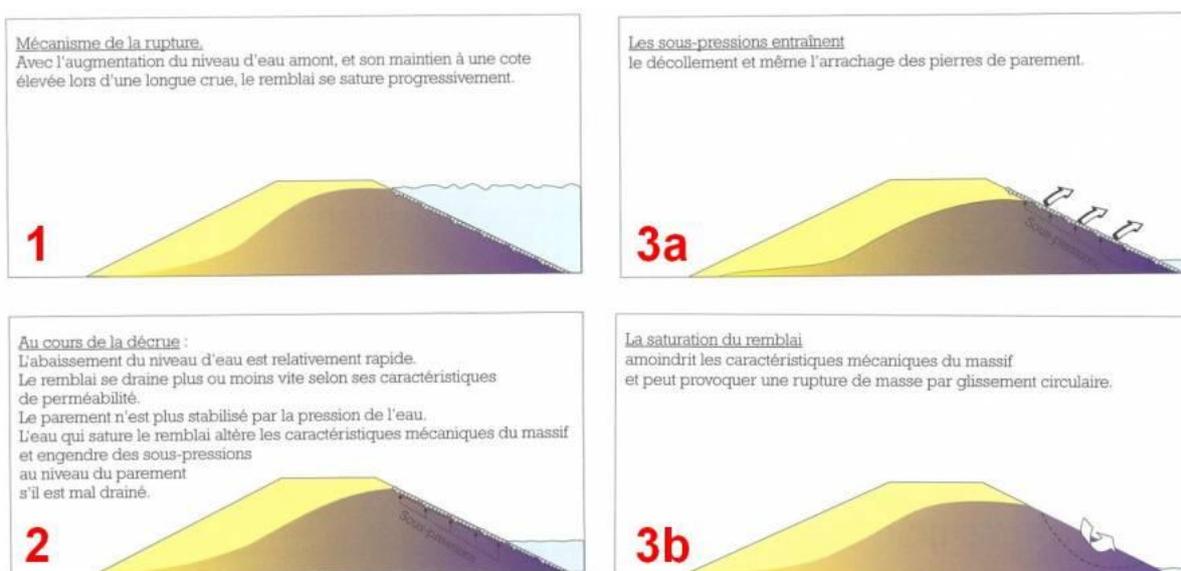


Figure 170 : Schématisation du mécanisme de rupture d'ensemble par l'amont (Mériaux et al, 2001)

Les cas de rupture d'ensemble à partir du parement aval sont liés à la charge hydraulique à l'intérieure de la digue. Ils sont favorisés par les facteurs suivants :

- Lorsque le profil de la digue est étroit et que ses parements sont raides ;
- Lorsque l'hétérogénéité de la digue favorise une piézométrie élevée ;

- Lorsque les caractéristiques des matériaux constituant la digue sont mauvaises (faible compacité, présence de niveaux argileux sous-consolidés, ...).

Le cas de rupture d'ensemble à partir du parement amont est en général lié à une décrue rapide. Si lorsque le niveau de l'eau à l'arrière de la digue est élevé, celle-ci est saturée en eau, d'importantes sous-pressions peuvent se développer lors de la baisse rapide du plan d'eau. Le parement n'est alors plus stabilisé par la pression de l'eau et les terrains saturés se mettent à glisser.

Cas des laves torrentielles

Les différents cas de charge pouvant être à l'origine d'une déstabilisation de digues dans un contexte de torrent à laves torrentielles sont présentés dans l'analyse de stabilité géotechnique en partie 7.

Dans le cas des torrents à lave, la rupture totale est également plutôt rare pour des digues artificielles. Des calculs de stabilité géotechnique ont été réalisés pour valider le dimensionnement structurel de l'ouvrage vis-à-vis de différents cas de charge.

6.3.1.3.2 Déstructurations liées aux chocs (blocs, troncs)

Avec les éléments très grossiers qu'elles sont susceptibles de transporter dans leur front, les laves torrentielles peuvent engendrer de très fortes pressions dynamiques sur des ouvrages.

Celles-ci sont très dépendantes de la vitesse atteinte par l'écoulement et à l'angle d'incidence du choc. Une digue parallèle à la direction de l'écoulement ne sera pas ou peu sollicitée. A l'inverse, une forte contraction, une digue au droit d'un extrados de coude ou, plus encore, une digue de fermeture de plage de dépôt faisant front à l'écoulement seront sollicitées.

Les chocs de lave torrentielle peuvent apparaître destructurants sur des ouvrages « durs » : béton, enrochements, gabions. Les ouvrages en remblais, dès lors qu'ils sont imposants, apparaissent beaucoup plus robustes pour encaisser ces chocs de lave sans déstructuration, **ce qui est le cas de tous les ouvrages constituant le système d'endiguement du Piésan. Aussi le croisement sollicitation/résistance ne semble pas amener de risque particulier pour ce type de phénomène.**

6.3.1.4 Rupture par érosion interne

Le mécanisme en eaux claires

L'hétérogénéité de la digue peut être la cause de cheminements préférentiels de l'eau à l'intérieur de celle-ci.

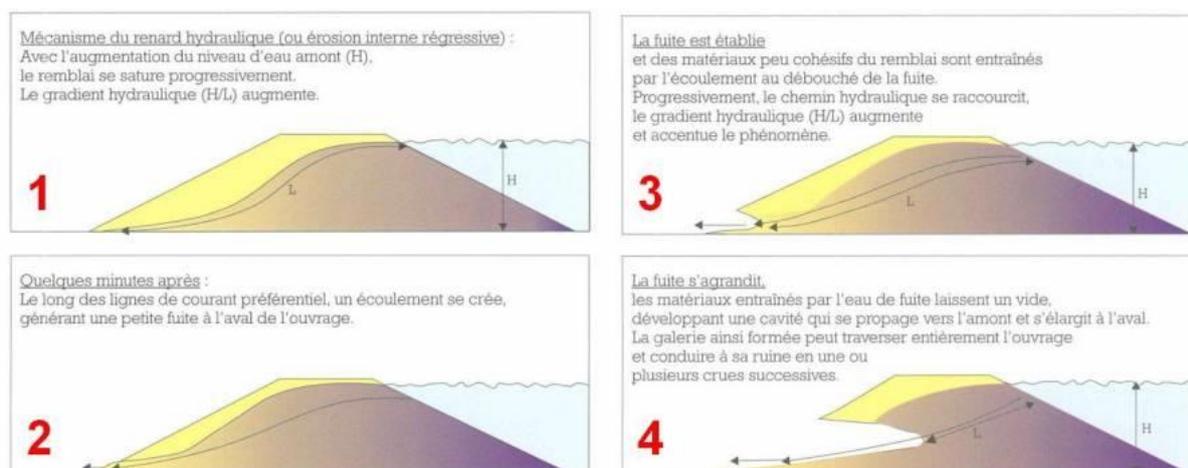


Figure 171 : Schématisation du mécanisme de rupture par érosion interne – renard hydraulique (Mériaux et al, 2001)

Dans certains cas, le gradient hydraulique provoqué (qui dépend notamment de la nature des matériaux ainsi que de la charge hydraulique) peut conduire à l'érosion interne de la digue. Cette érosion crée des conduits le long desquels le gradient hydraulique et la vitesse de l'eau augmentent rapidement. De

véritables galeries peuvent ainsi être créées, qui peuvent former une brèche dans la digue lorsqu'elles s'effondrent.

Plusieurs facteurs peuvent favoriser la rupture par érosion interne, parmi lesquels :

- La présence d'excavations préexistantes dans la digue, au rang desquelles il faut citer les terriers d'animaux ou les conduits racinaires des arbres morts.
- L'hétérogénéité de l'ouvrage.

Cas des laves torrentielles

La formation d'un renard hydraulique débute par une section de faible dimension (à l'apparition du renard). Pour qu'une lave torrentielle puisse s'écouler, la contrainte seuil de cisaillement doit être dépassée, ce qui nécessite un rayon hydraulique élevé et donc une section élevée. Aussi, la formation d'un renard par des écoulements de type lave torrentielle est impossible. Il serait naturellement « rebouché » par une lave.

La brièveté des événements sous forme de lave torrentielle rend également improbable la saturation d'une digue au passage d'une lave torrentielle, qui pourrait apporter de l'eau dans le corps d'une digue à l'origine d'un renard. Même si l'évènement était plus long, les phénomènes de circulation d'eau, entre un mélange boueux et la digue avec lequel il est en contact, sont encore méconnus.

Quoi qu'il en soit, dans le cas du Piésan et pour d'autres nombreuses digues sur des torrents à lave, les digues sont constituées par des matériaux torrentiels, avec présence d'éléments grossiers. Cette granulométrie et la pente moyenne du cône de déjection sur lequel les digues sont établies rendraient improbables la formation de renard hydraulique, même pour une problématique de crues liquides.

Aussi, tout risque de rupture par érosion interne est écarté. Ce mode de rupture ne sera plus étudié dans la suite de l'étude.

6.3.1.5 Rupture par érosion externe

Le mécanisme en eaux claires

Le parement amont des digues peut subir les effets des courants qui en érodent progressivement le pied, raidissant ainsi la pente locale et diminuant les caractéristiques mécaniques de la digue (principalement du fait de la saturation en eau des matériaux). Les glissements qui en résultent provoquent localement la formation de concavités, qui favorisent à leur tour les tourbillons et les érosions, accélérant ainsi la déstabilisation de la digue.

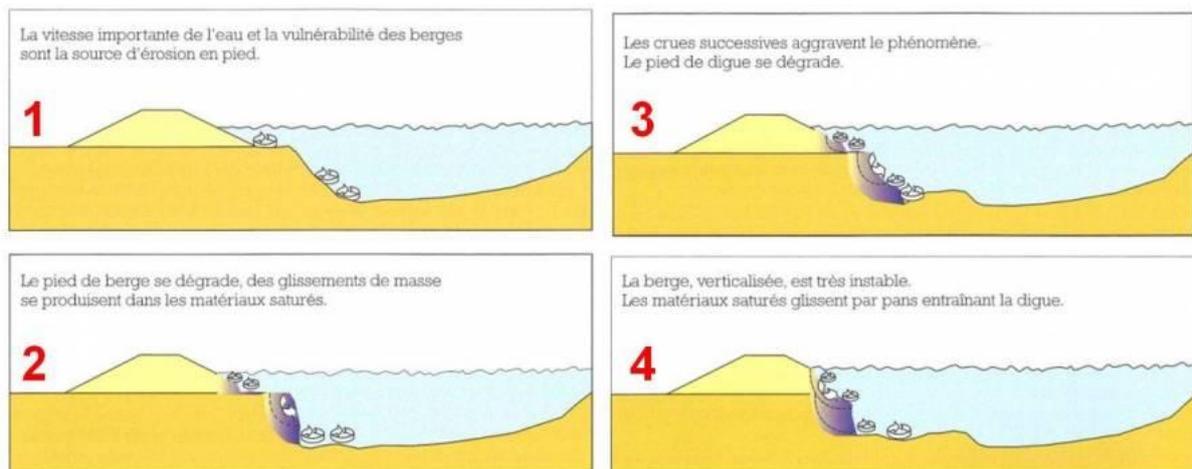


Figure 172 : schématisation du mécanisme de rupture par érosion/affouillement (Mériaux et al, 2001)

Plusieurs facteurs peuvent favoriser la rupture par affouillement :

- La vitesse moyenne de l'eau. Ainsi une digue située dans un rétrécissement du cours d'eau ou à l'extérieur d'un virage formé par celui-ci sera d'avantage exposée.

- La présence d'éléments susceptibles de créer des tourbillons locaux, par exemple des arbres ou des gros blocs.
- Les caractéristiques mécaniques du parement de la digue côté torrent.

Particularité des laves torrentielles

Au passage d'une lave torrentielle boueuse, on n'observe en général pas ou peu d'érosion des berges sur des tronçons rectilignes et à section régulière. Ce phénomène peut s'expliquer par une zone d'écoulement cisaillée contre les parois, qui participe à la « protection » de ces dernières. Après le passage de la lave torrentielle, les berges apparaissent alors seulement « tapissées » par la matrice boueuse.

En revanche, dans certaines configurations topographiques, des digues non protégées peuvent connaître des érosions au passage de laves. Ces quelques cas en sont des exemples, la liste n'étant évidemment pas exhaustive :

- Coude : l'extrados sera plus fortement sollicité et pourra être érodé. A l'inverse, des dépôts en fin de crue pourront être observés à l'intrados.
- Contraction brutale : le torrent pourra éroder les berges pour tendre vers un lissage des sections.
- Ecoulement redirigé vers la berge par un gros blocs, par un arbre basculé depuis la berge.

L'érosion est alors liée à des sollicitations beaucoup plus marquées que dans un chenal rectiligne. Aussi, on retient que, contrairement à des écoulements en eau, le processus érosif n'est pas systématique sur des talus non protégés. Pour un lit rectiligne et régulier, une lave peut transiter sans générer d'érosion ; si elle se produit, elle reste généralement peu intense. En revanche, dans certaines configurations particulières, les sollicitations des berges par une lave peuvent être significativement augmentées et générer une érosion externe des digues.

Aucune approche quantitative ne semble alors pouvoir aboutir à analyser les niveaux de sollicitations. **Cette analyse, et par conséquent la qualification du risque d'érosion, sera réalisée par une approche experte. Elle sera basée sur l'analyse géomorphologique du site, de l'historique mais aussi l'expérience apportée par l'observation de multiples événements torrentiels.** La limite de la démarche reste celle de la prédiction, tout en sachant qu'il est illusoire de considérer que tous les scénarios sont prédictibles dans un contexte torrentiel.

6.3.2 Synthèse sur les scénarios de défaillance probables

Avec des écoulements d'eaux claires et du charriage les digues sont doublement menacées d'érosion, par affouillement latéral, ou par érosion suite à une surverse.

Dans le cas de laves torrentielles, comme sur le Piésan, les phénomènes sont radicalement différents dans la mesure où :

- Les risques de rupture les moins improbables sont liés à l'érosion, l'affouillement ou la surverse. Ils restent généralement assez faibles et une éventuelle rupture n'entraîne pas de sur-aléa pour des écoulements de lave torrentielle ;
- L'érosion latérale est généralement de faible ampleur ;
- En cas de surverse : comme visible sur la photo ci-dessous, la réduction de la hauteur d'écoulement au droit de la surverse engendre un arrêt de la lave, même avec une forte pente en aval de la digue. Également, les photos qui suivent (issus de l'étude ETRM) montrent que l'écoulement d'une lave sur un talus de digue n'engendre que peu d'érosion.



Figure 173 : Arrêt d'une lave après surverse sur une digue (source : étude ETRM)



Figure 174 : Exemple de déversement de lave sur digue, avec pas/peu d'érosion (surverse sur digue de fermeture du torrent de Saint Antoine à Modane (73) – source ETRM [4])

Sur le Piésan, on retiendra un point singulier sur la digue rive gauche (RG_TH2) en amont du pont communal, comme illustré précédemment, avec un ouvrage assez bas, une rupture ne peut être écartée.

- Les risques de rupture d'ensemble sont très peu probables et seraient liées à un défaut de conception. L'étude géotechnique conduite au chapitre 7 viendra étudier ce risque.
- Enfin, les risques de rupture par érosion interne sont écartés pour des phénomènes de lave torrentielle.

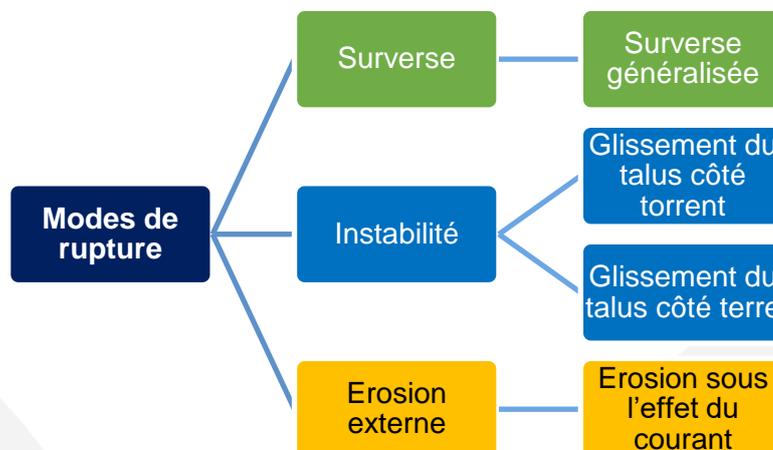


Figure 175 : Modes de rupture retenus

Le diagnostic approfondi du système d'endiguement puis l'étude « des venues d'eau dans la zone protégée » permettront de préciser et de localiser les scénarios de défaillance les plus probables ainsi que le processus et les conséquences de ceux-ci.

7. DIAGNOSTIC APPROFONDI DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET TENUE DES OUVRAGES

7.1 Compte-rendu de la visite de terrain approfondies (VTA)

7.1.1 Contexte et méthodologie de la VTA

Les observations ont été relevées sur le terrain et des photos géoréférencées ont été prises. La reconnaissance a porté sur les digues constitutives des rives droites et gauches du Piésan, côté rivière et côté terre. L'inspection des digues a été réalisée par deux Ingénieurs de Safège, spécialisés en hydraulique torrentielle.

Les désordres ont été relevés et sont répartis en 2 types : les désordres ponctuels et linéaires. L'analyse de ces désordres permettra par la suite de qualifier l'état général de chaque ouvrage constitutif du système d'endiguement.

L'état général des tronçons de la digue est défini à l'aide de classe d'urgences défini ci-dessous dont on retrouve la définition dans le tableau suivant :

Tableau 57 : Définition des classes d'urgence - Sirs

Niveau	Risque (SIRS)	Urgence d'intervention
0	Désordre n'entraînant pas de risque pour la digue actuellement et devant être surveillé année après année	Faible urgence – pas besoin d'intervention
1	Désordre pouvant entraîner un risque sur la digue à long terme / préservation pour éviter une dégradation plus importante / désordre altérant moyennement le revêtement de la digue	Pas de grande urgence - Désordre pouvant être traité dans un délai raisonnable (> 5 ans)
2	Désordre pouvant entraîner un risque sur la digue à court ou moyen termes / désordre altérant fortement le revêtement de la digue	Désordre ne pouvant être traité qu'à court ou moyen terme
3	Désordre pouvant entraîner un risque supposé pour la sûreté de la digue à très court terme / susceptible d'évoluer rapidement / désordre touchant au corps de digue	Désordre devant être traité de façon urgente

7.1.2 État antérieur des ouvrages

Les ouvrages du système d'endiguement sont visités annuellement et régulièrement entretenu par le RTM/ONF.

Cette VTA est néanmoins une première visite technique au sens de la réglementation sur les ouvrages hydrauliques. Il n'existe donc pas d'élément sur l'état antérieur de l'aménagement hydraulique.

7.1.3 Conditions de la visite

- Date de réalisation du diagnostic initial : 10 Octobre 2023
- Observateurs : Safège : Maxence CHAUVET / Mathieu VALENTIN
- Instruments : Notes papiers et Tablette géolocalisée, utilisation de Qfield.
- Conditions météorologiques : Temps ensoleillé, Piésan sec.
- Niveau de la rivière : Basses eaux (période automnale très sèche)
- Ouvrages visités : Digues du système d'endiguement et ouvrages associés
- Observations particulières : NA
- Accès et sens de la vite : Visite entièrement à pied des berges et du chenal du Piésan, d'amont en aval, en descendant rive gauche, puis en remontant rive droite. Visite également du chenal amont

qui fait l'objet d'une correction torrentielle (linéaire hors système d'endiguement), jusqu'au pont de la route forestière.

7.1.4 Compte-rendu de la visite

7.1.4.1 RG_TH1– état actuel

7.1.4.1.1 Inventaire des désordres

ID	PM	Type de désordres	Commentaire	Côté	Position	Photographie	Urgence	Suite à apporter
3	850-800	VEG : présence de végétation gênante	Présence de végétation arbustive	Crête	Crête		0	Entretien

7.1.4.1.2 Relevé des réseaux

Quelques barbacanes permettant de drainer la structure ont été observés sur le tronçon RG_TH1.



Figure 176 : Barbacanes présentes dans la digue de l'école

7.1.4.2 RG_TH2- état actuel

ID	PM	Type de désordres	Commentaire	Côté	Position	Photographie	Urgence	Suite à apporter
4	800-760	VEG : présence de végétation gênante	Présence de végétation arbustive	Rivière	Plusieurs parties de la digue		0	Entretien

7.1.4.3 RD_TH1- état actuel

ID	PM	Type de désordres	Commentaire	Côté	Position	Photographie	Urgence	Suite à apporter
5	800-765	VEG : présence de végétation gênante	Présence de végétation herbacée et arbustive	Rivière + crête	Plusieurs parties de la digue		0	Entretien

7.1.4.4 RG_TH3- état actuel – ce linéaire fait l'objet de travaux

ID	PM	Type de désordres	Commentaire	Côté	Position	Photographie	Urgence	Suite à apporter
5	650-300	ERF : érosion (longitudinale) due au torrent	Présence de nombreuses anses d'érosions	Rivière	Plusieurs parties de la digue		3	Travaux

7.1.4.5 RD_TH2- état actuel – ce linéaire fait l'objet de travaux

7.1.4.5.1 Inventaire des désordres

ID	PM	Type de désordres	Commentaire	Côté	Position	Photographie	Urgence	Suite à apporter
6	650-300	ERF : érosion (longitudinale) due au torrent	Présence de nombreuses anses d'érosions	Rivière	Plusieurs parties de la digue		3	Travaux

7.1.4.5.2 Relevé de réseaux

Un exutoire d'eau de pluie a été identifié au niveau du PK540.



Figure 177 : Conduite d'eau pluviale se rejetant dans le Piésan au niveau de la zone des travaux projetés en RD au PK540

7.1.4.6 Synthèse

L'état général des ouvrages est qualifié dans la dernière colonne du tableau au regard du nombre de désordres, des ouvrages environnants (ouvrages traversants, réseaux, ...) de l'état de la végétation, la nature de la structure et enfin de notre expertise sur les risques d'apparition de mécanismes de rupture.

Tableau 58 - Synthèse des désordres et état retenu des ouvrages du système d'endiguement

Rive	Désordres ponctuels	Désordres linéaires		Etat visuel général (à dire d'expert) des désordres			Etat retenu du tronçon
	Nombre	Nombre	Linéaire (ml)	1	2	3	
RG_TH1	0	1	55	-	-	-	Bon état
RG_TH2	0	1	35	-	-	-	Bon état
RD_TH1	0	1	35	-	-	-	Bon état
RG_TH3	0	1	375	-	-	ERF-1	Mauvais
RD_TH2	0	1	375	-	-	ERF-2	Mauvais

La cartographie suivante présente la localisation des désordres relevés lors des VTA.

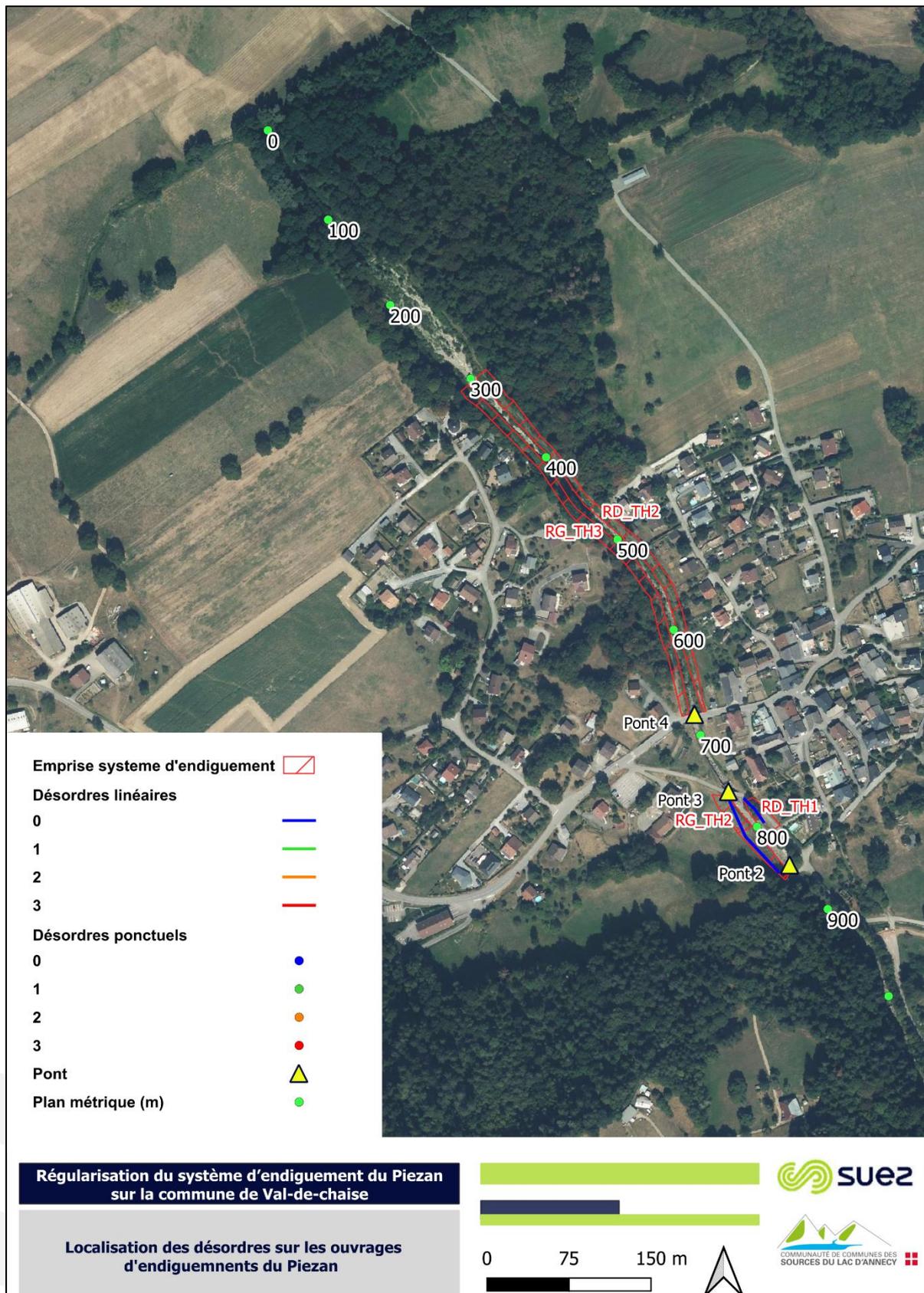


Figure 178 : Localisation des désordres sur les ouvrages d'endiguement du Piésan

Le tableau ci-après donne l'état retenu des ouvrages du système d'endiguement à l'état projet, tenant compte des tronçons qui vont faire l'objet de travaux.

Tableau 59 - Synthèse des désordres et état retenu des ouvrages du système d'endiguement à l'état projet

Rive	Désordres ponctuels	Désordres linéaires		Etat visuel général (à dire d'expert) des désordres			Etat retenu du tronçon
	Nombre	Nombre	Linéaire (ml)	1	2	3	
RG_TH1	0	1	55	-	-	-	Bon état
RG_TH2	0	1	35	-	-	-	Bon état
RD_TH1	0	1	35	-	-	-	Bon état
RG_TH3	0	0	-	-	-	-	Etat projet - neuf
RD_TH2	0	0	-	-	-	-	Etat projet - neuf

7.2 Méthode de caractérisation des probabilités de rupture

7.2.1 Modes de rupture retenus

Cette analyse sera menée uniquement pour les différents modes de rupture d'ores et déjà sélectionnés dans la partie « Modes de rupture retenus » de cette étude (paragraphe 6.3).

Les principaux modes de rupture d'une digue identifiés sont les suivants :

- Rupture par instabilité au glissement,
- Rupture par surverse,
- Rupture par érosion externe.

7.2.2 Détermination des probabilités de rupture

Pour chaque risque de défaillance étudié, l'analyse a été réalisée selon la grille suivante qui croise niveau de contrainte et niveau de résistance.

Figure 179 : Tableau de croisement des niveaux de résistance des digues avec les niveaux de sollicitation pour qualifier le risque de défaillance

Probabilité de défaillance		Niveau de sollicitation				
		Très Faible	Faible	Moyenne	Forte	Très Forte
Niveau de résistance	Très Forte	Très Faible	Très Faible	Faible	Faible	Moyen
	Forte	Très Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen
	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Fort
	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Fort	Fort
	Très Faible	Moyen	Moyen	Fort	Fort	Très Fort



Probabilité conditionnelle de défaillance	
En pourcentage	Qualification subjective
$P < 1\%$	Très Faible
$1\% < P < 5\%$	Faible
$5\% < P < 50\%$	Moyen
$50\% < P < 95\%$	Fort
$P > 95\%$	Très Fort

Nous nous autorisons à ajouter un 6^{ème} niveau de contrainte, qualifiée de « nulle » lorsque la contrainte peut aussi être qualifiée de « nulle ». C'est par exemple le cas d'une contrainte liée à une surverse lorsque cette dernière est purement impossible en raison d'une berge opposée nettement plus basse ou pour un scénario où la digue ne peut pas être atteinte par l'écoulement.

7.3 Caractérisation des probabilités de rupture

7.3.1 Scénarii de rupture considérés

Pour chaque scénario de rupture considéré, il peut y avoir un ou plusieurs modes conduisant à la réalisation du scénario de rupture. Le schéma hiérarchique suivant détaille pour chaque scénario de rupture les différents modes possibles, retenus suite à l'étude accidentologique réalisée en partie 6.

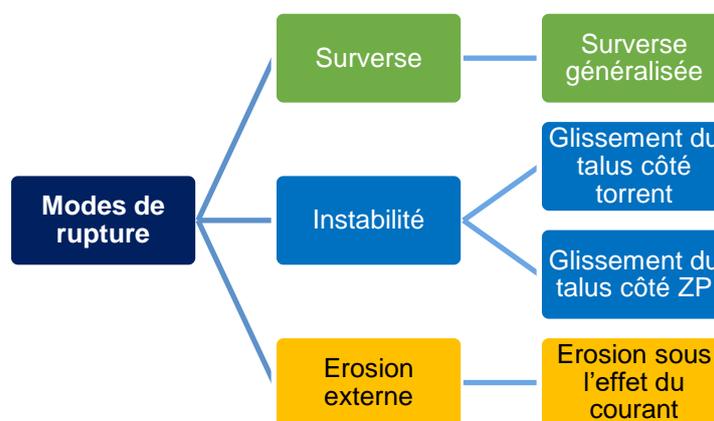


Figure 180 : Modes de rupture retenus

Les paragraphes suivants analysent le comportement de type lave torrentielle face aux phénomènes à l'origine des risques de rupture classiquement rencontrés en hydraulique fluviale.

Elle montrera que, pour des écoulements sous forme de lave torrentielle, la notion d'aggravation du phénomène liée à la rupture d'une digue est généralement absente et identifiera les quelques configurations particulières où il convient néanmoins d'être prudent.

7.3.2 Cas des laves torrentielles

7.3.2.1 Risque de défaillance par surverse

7.3.2.1.1 Qualification du niveau de résistance

Les tronçons de digues sont en remblais, sans protection de son talus coté terre. Leur résistance à la surverse est alors qualifiée de faible.

7.3.2.1.2 Qualification du niveau de contrainte

Lorsqu'aucune surverse n'est prévisible, le niveau de contrainte est nul.

Pour le cas du Piésan, la surverse ne peut concerner que des écoulements de type lave torrentielle, et tant que les digues sont longitudinales à la direction de l'écoulement (surverse latérale), lorsqu'une surverse est prévisible, les niveaux qualitatifs de contraintes suivants sont proposés (repris de l'EDD du Nant Trouble [12]) :

- Si la hauteur de dépassement de la digue (surverse) n'excède pas 1.5 m et que la crête de digue a une largeur dépassant 2 m, le niveau de contrainte est estimé très faible dans la mesure où la surverse devrait se limiter au dépôt d'un bourrelet latéral, ou tout au plus à un volume limité se déversant coté val.

- Si la hauteur de surverse dépasse 1.5 m, le niveau de contrainte est estimé faible au vu du caractère peu érosif des laves torrentielles.

Les scénarios étudiés entraînent une probabilité de surverse qui a été qualifiée pour chaque tronçon en fin de partie 4.1.3. L'analyse accidentologique menée au 6.3.1.2 et les éléments précédemment donnés permettent d'évaluer le niveau de contrainte comme suit pour un scénario de lave rare :

- Au droit du tronçon RG_TH2, le point faible de la digue (cf. 6.3.1.2) en amont immédiat du pont communal encourage à la prudence, sur le risque de rupture très local, on qualifiera le niveau de contrainte comme moyen localement ;
- Au droit des autres tronçons, le niveau de contrainte est jugé comme très faible.

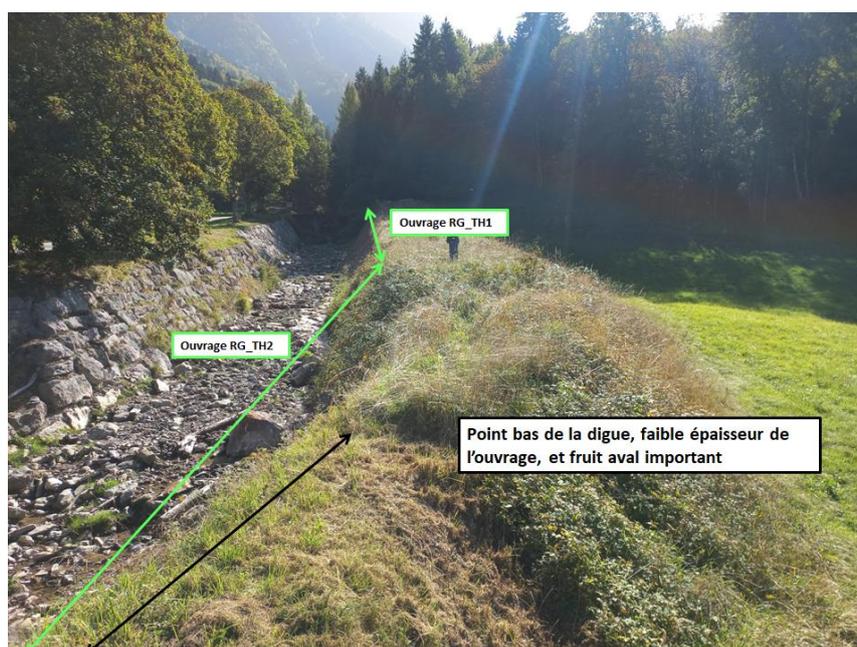


Figure 181 : vue depuis l'extrémité aval de l'ouvrage RG_TH2 du point "faible"

7.3.2.1.3 Résultats

Le tableau suivant croise le niveau de sollicitation et de résistance et présente la probabilité de rupture retenue pour les tronçons, pour les scénarios de lave fréquentes et rares :

Tableau 60 : Croisement entre le niveau de résistance et le niveau de contrainte pour qualifier le risque de défaillance par surverse pour un scénario de lave fréquente

	Résistance	Contrainte	Risque de défaillance
RG_TH1	Faible	Très faible	Faible
RG_TH2	Faible	Moyen	Moyen
RD_TH1	Faible	Nulle	Très faible
RG_TH3 (projet)	Faible	Très faible	Faible
RD_TH2 (projet)	Faible	Très faible	Faible

Tableau 61 : Croisement entre le niveau de résistance et le niveau de contrainte pour qualifier le risque de défaillance par surverse pour un scénario de lave rare

	Résistance	Contrainte	Risque de défaillance
RG_TH1	Faible	Très faible	Faible
RG_TH2	Faible	Moyen	Moyen
RD_TH1	Faible	Très faible	Faible
RG_TH3 (projet)	Faible	Très faible	Faible
RD_TH2 (projet)	Faible	Très faible	Faible

7.3.2.2 Rupture de défaillance par instabilité au glissement

7.3.2.2.1 Méthodologie de calcul

Les hypothèses géomécaniques retenues pour les calculs de stabilité de talus sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 62 : Caractéristiques géomécaniques retenues pour les calculs de stabilité - Source Confluence 2016

Formation	Caractéristiques mécaniques		
	Poids volumique humide	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
	γ_h (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
[R] – Remblais issus des dépôts torrentiels constituant la digue	19*	4	38
[1] Dépôts torrentiels / moraines	20*	5	40

La stabilité de talus est vérifiée à l'aide du logiciel d'écoulement interne et de stabilité de talus Geostudio 2020 (avec respectivement les modules SEEP et SLOPE).

Le facteur de sécurité F_s , rapport des forces résistant sur les forces motrices, est ici établi par la méthode de stabilité des tranches en utilisant la méthode de Bishop et est calculé par le module SLOPE de Géostudio.

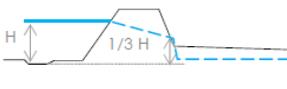
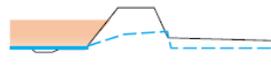
Les coefficients partiels γ_m suivants ont été appliqués conformément aux recommandations du CFBR afin d'obtenir le coefficient de modèle γ_d correspondant :

Tableau 63 : Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source : CFBR, 2015)

Situations	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan \phi'$	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient de modèle γ_d
normale d'exploitation	1,25	1	1,2
rare de crue	1,2	1	1,2
transitoire ou rare	1,1	1	1,2
exceptionnelle de crue (PHE)	1,1	1	1,2
extrêmes de crue, sismique ou autres	1	1	1,1

Par cohérence avec les études de dangers précédentes en contexte torrentiel, et afin de tester l'ensemble des sollicitations existantes au droit des digues, il sera étudié les situations de sollicitations suivantes :

Tableau 64 : Liste des sollicitations étudiés dans le cadre du glissement de talus (source : RTM – 2020)

Situation	Commentaire	Situation	Vérification à réaliser	Schéma de principe
Débit d'étiage	Les ouvrages sont saturés à une hauteur correspondant à l'étiage sur toute la largeur. Cette hypothèse est défavorable, car les digues sont souvent perchées par rapport au lit mineur du torrent. En étiage le fil d'eau n'est pas toujours au contact des digues. $H=0.2m$	Normale d'exploitation	Côté terre et torrent	
Surcharge engin d'entretien	Circulation pour entretien des crêtes de digue $Q=10kPa$	Normale d'exploitation	Côté terre et torrent	-
Crue liquide	Les ouvrages sont saturés côté torrent à la hauteur de la crue et côté terre au 1/3 de la hauteur de la crue. Cette hypothèse est également défavorable, car les crues sur ce torrent sont rapides, la digue n'a probablement pas le temps de se saturer. $H=1m$ (hauteur critique pour une crue liquide $T=100$ ans)	Normale d'exploitation	Côté terre	
Décru liquide	On suppose que la digue est encore partiellement saturée lors de la décrue.	Normale d'exploitation	Côté torrent	
Lave torrentielle en transit	Les ouvrages ne sont pas saturés car crue solide et très rapide. Des poussées peuvent se faire sur le talus côté terre. $H=-1m$ /crête de digue Paramètres géotechniques à retenir pour une lave : $\varphi=24$ kN/m ³ , $c=1$ kPa, $\varphi=30^\circ$	Situation extrême de crue	Côté terre	
Lave torrentielle avec point de dépôt en crue	La lave ne transite plus vers l'aval. Les matériaux déposés se saturent donc et une nappe se forme. Même modélisation que le cas de la crue et décrue liquide. $H=-1m$ /crête de digue Paramètres géotechniques à retenir pour une lave déjaugée : $\varphi=14$ kN/m ³ , $c=1$ kPa, $\varphi=30^\circ$	Extrême de crue	Côté terre	
Lave torrentielle avec point de dépôt en décrue	Idem	Extrême de crue	Côté torrent	
Séisme	Même hypothèses qu'étude de confluence : $ah/g = 0.120$ et $av/g = +/-0.06$	Situation extrême de séisme	Côté terre et torrent	-

Par souci d'exhaustivité, malgré l'enseignement limité apporté par certaines situations testées, il sera testé la stabilité de tous les talus.

Les protections en enrochements bétonnés et libres ne sont pas représentées dans la modélisation. Ces enrochements ont avant tout un rôle de protection contre l'affouillement des berges par l'action du torrent, il ne s'agit pas d'ouvrage de soutènement.

Les profils modélisés dans Géostudio sont présentés dans le paragraphe suivant :

- RG-TH1 et RG-TH2 :

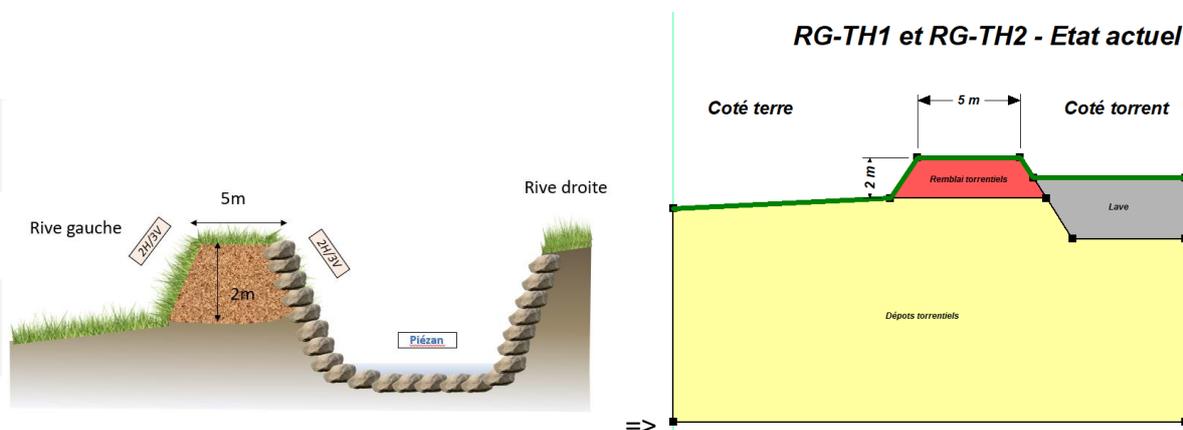


Figure 182 : Profils Géostudio du RG-TH1 et RG-TH2

- RD-TH1 :

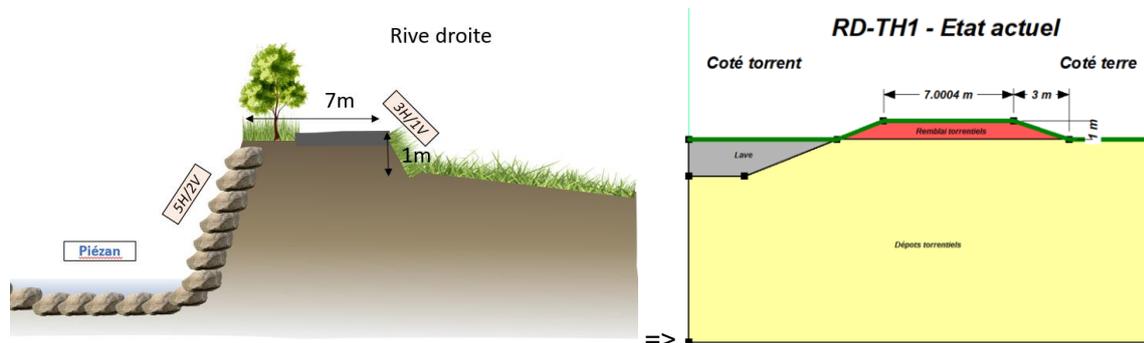


Figure 183 : Profils Géostudio du RD-TH1

- RG-TH3 :

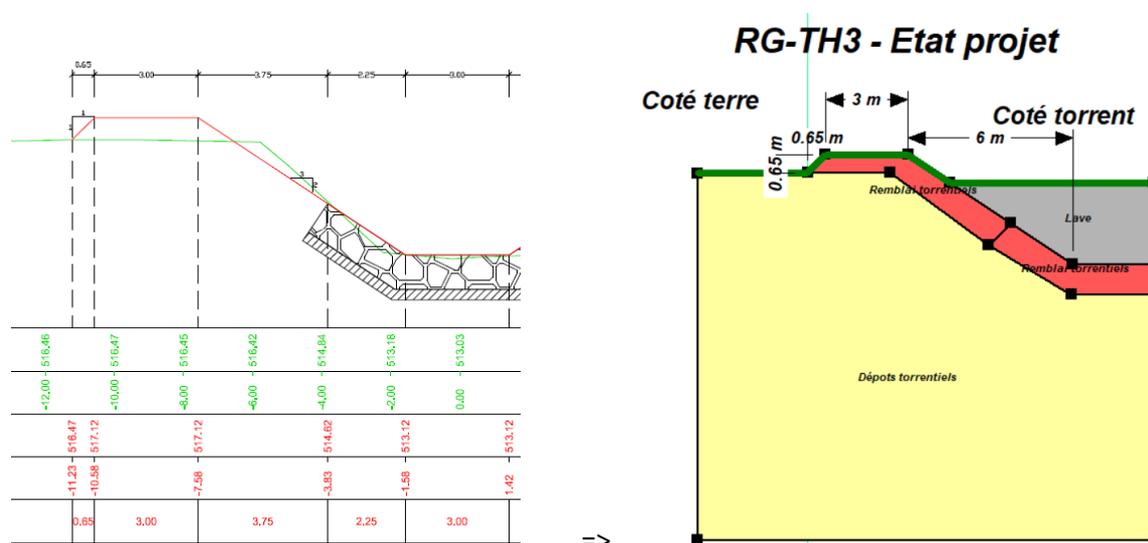


Figure 184 : Profils Géostudio du RG-TH3

- RD-TH2 :

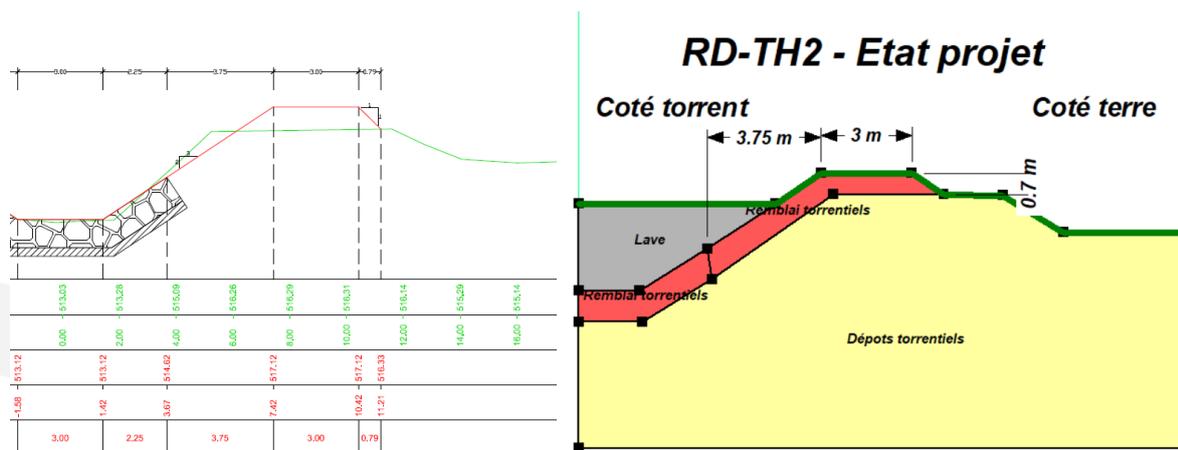


Figure 185 : Profils Géostudio du RD-TH2

7.3.2.2.2 Vérification de la stabilité des talus

Les résultats de l'analyse de stabilité sont synthétisés dans le tableau suivant.

Les sorties graphiques de chacune des situations est fournie en annexe de la présente étude.

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH1 et RG-TH2		RD-TH1		RG-TH3		RD-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre	FS coté torrent	FS coté terre	FS coté torrent	FS coté terre	FS coté torrent	FS coté terre
Pas de lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	1.24	1.36	2.53	4.05	1.30	3.37	1.37	3.32
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	1.20	1.33	2.28	2.87	1.27	1.79	1.28	1.78
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.120	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	1.35	1.45	2.33	3.55	1.30	3.30	1.33	3.08
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	1.96	1.36	3.80	2.61	3.33	2.07	2.26	1.84
	Crue liquide - Vidange rapide - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	1.13	1.36	1.93	4.03	3.37	1.10	1.14	3.01
Lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Extrême de crue FS cible : 1.1	2.55	1.62	5.04	5.07	2.97	4.22	2.82	4.15
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Extrême de crue FS cible : 1.1	1.77	1.59	3.43	3.59	2.31	2.24	2.13	2.22
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.121	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	1.76	1.38	3.39	3.55	2.24	3.30	2.18	3.08
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	4.50	1.62	9.29	3.34	6.33	4.02	5.29	2.01
	Crue liquide - Vidange rapide - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	2.28	1.62	4.46	5.06	3.02	4.25	2.60	3.77
Stabilité			Stable	Stable	Stable	Stable	Stable	Stable	Stable	Stable

Figure 186 : Synthèse des résultats de stabilité au talus de l'ensemble des tronçons homogènes

Il apparait que pour les digues du torrent du Piésan, tous les profils respectent les coefficients de sécurité fixé par le CFBR. Les digues sont stables.

Toutes les situations vérifient les critères de stabilité définis par le CFBR. Le risque de défaillance par instabilité au glissement est faible jusqu'au niveau de protection apparent.

7.3.2.3 Rupture par érosion externe

7.3.2.3.1 Qualification du niveau de résistance

Cas des digues protégées

Pour les digues protégées (radier et berges en enrochements en très bon état), **la résistance est estimée très forte**. Cette situation concerne l'ensemble des tronçons de la présente étude.

Cas des digues non protégées

Il n'y a pas de tronçon concerné sur le présent secteur d'étude.

7.3.2.3.2 Qualification du niveau de contrainte

Comme expliqué précédemment, les contraintes sur les berges au passage d'une lave torrentielle sont généralement limitées, avec peu ou pas d'érosion dans les parties rectilignes. En revanche, des configurations topographiques, géomorphologiques ou faits marquants en crue peuvent être à l'origine de plus fortes sollicitations : extrados, coude, redirection d'écoulement après basculement d'un arbre ou d'un bloc.

Dans le cas des digues du Piésan, les choix suivants ont été faits :

- Pour les laves qui mettent en charge les digues du torrent, l'aspect du lit étant relativement rectiligne au droit des ouvrages d'endiguement, le niveau de contrainte retenu est donc considéré comme faible dans ce cas ;
- Dans le cas où des éléments viendrait intensifier les risques d'érosions vis-à-vis des ouvrages (extrados, coude, redirection de l'écoulement), le niveau de contrainte sera considéré comme moyen ; on augmentera à moyen au droit du tronçon RG_TH2 du fait du pont en aval immédiat et du léger coude.

Le tableau suivant synthétise les différents niveaux de contraintes conservés pour les tronçons de digues :

Tableau 65 : Niveau de résistance à l'érosion des tronçons sur les digues du Piésan selon l'évènement de lave considéré

	Niveau de contrainte : Lave fréquente fluide	Niveau de contrainte : Lave fréquente moyennement visqueuse	Niveau de contrainte : Lave rare fluide	Niveau de contrainte : Lave rare moyennement visqueuse
RG_TH1	Faible	Faible	Faible	Faible
RG_TH2	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
RD_TH1	Faible	Faible	Faible	Faible
RG_TH3(projet)	Faible	Faible	Faible	Faible
RD_TH2 (projet)	Faible	Faible	Faible	Faible

7.3.2.3.3 Synthèse

Le tableau suivant croise le niveau de sollicitation et de résistance et présence la probabilité de rupture retenue pour les tronçons :

Tableau 66 : Croisement entre le niveau de résistance et le niveau de contrainte pour qualifier le risque de défaillance par érosion pour des scénarios rares

	Risque de défaillance			
	Niveau de contrainte : Lave fréquente fluide	Niveau de contrainte : Lave fréquente moyennement visqueuse	Niveau de contrainte : Lave rare fluide	Niveau de contrainte : Lave rare moyennement visqueuse
RG_TH1	Très Faible	Très Faible	Très Faible	Très Faible
RG_TH2	Faible	Faible	Faible	Faible
RD_TH1	Très Faible	Très Faible	Très Faible	Très Faible
RG_TH3 (projet)	Très Faible	Très Faible	Très Faible	Très Faible
RD_TH2 (projet)	Très Faible	Très Faible	Très Faible	Très Faible

7.3.3 Cas des crues à charriage

Les paragraphes précédents se sont concentrés sur des contraintes liées à des laves torrentielles qui correspondent aux types de crues prépondérantes pour ce type de période de retour. Les crues sous forme de charriage sont, de ce fait, développées dans le paragraphe suivant.

7.3.3.1 Surverse

Le lit du Piésan est calibré pour des laves torrentielles, aux sections d'écoulement largement supérieures à celles d'une crue liquide. Pour une crue sous forme de charriage, aucune surverse n'est à attendre. Aussi, **aucun risque de défaillance par surverse n'existe pour des crues à charriage.**

7.3.3.2 Erosion et affouillement

Concernant les risques de défaillances par affouillement et par érosion, les crues liquides ont un caractère érosif plus important qu'une lave torrentielle. Une crue liquide peut alors engendrer des érosions plus marquées qu'une crue plus rare sous forme de lave.

Toutefois, les débits restant « modérés » et contenus dans le lit qui est enroché en fond et en berge sur l'ensemble du linéaire, il est considéré que les crues liquides peuvent entraîner des dégradations locales sur le long terme du lit sans pour autant mettre en péril la structure du dispositif en un seul événement. Aussi, il est considéré que, devant le très bon état des ouvrages, pour des crues sous forme de charriage, le risque de défaillance par érosion et affouillement est faible.

7.4 Prise en compte des risques liés à la présence d'ouvrages traversants

Aucun ouvrage traversant n'a été relevé dans les digues du système d'endiguement ou à proximité immédiate.

7.5 Synthèse des probabilités des scénarii de rupture des ouvrages et définition du niveau de danger et du niveau de sûreté

7.5.1 Probabilités de rupture des scénarii étudiés

Les probabilités de rupture obtenues pour l'ensemble des scénarii définis dans le présent rapport en considérant un niveau de sollicitations équivalent aux différents événements sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 67 : Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour l'ensemble des scénarii définis, en considérant un événement de lave rare visqueuse

Tronçon homogène	Charrriage rare		Lave fréquente fluide		Lave fréquente visqueuse		Lave rare fluide		Lave rare visqueuse	
	Surverse	Erosion/ Affouillement	Surverse	Erosion/ Affouillement	Surverse	Erosion/ Affouillement	Surverse	Erosion/ Affouillement	Surverse	Erosion/ Affouillement
RG_TH1	P<1%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%
RG_TH2	P<1%	P<1%	P<5%	P<5%	P<5%	P<5%	5%<P<50%	P<5%	5%<P<50%	P<5%
RD_TH1	P<1%	P<1%	P<1%	P<1%	P<1%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%
RG_TH3	P<1%	P<1%	P<5%	P<1%	P<1%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%
RD_TH2	P<1%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%	P<5%	P<1%

En considérant le tableau de synthèse des probabilités de risque de rupture de l'ensemble des tronçons, il en est déduit que le système d'endiguement du Piésan garantit les conditions structurelles suffisantes permettant d'assurer un niveau de sûreté égal à un niveau équivalent à un épisode de lave fréquente voire légèrement supérieur, en considérant qu'il n'y ait pas d'obstruction au niveau des ouvrages traversant.

7.5.2 Estimation du niveau de sûreté

Le niveau de sûreté correspond au niveau d'eau pour lequel le système d'endiguement est considéré comme sûr. La probabilité de ruine de l'ouvrage pour le niveau de sûreté est au plus de 5%. Le niveau de protection découle directement du niveau de sûreté, il est inférieur ou égal au niveau de sûreté.

Tableau 68 : Synthèse des niveaux de sûreté estimés pour l'ensemble des tronçons homogènes du Piésan

Tronçon homogène	Niveau de sûreté par tronçon
RG_TH1	Crête de l'ouvrage
RG_TH2	Crête de l'ouvrage
RD_TH1	Crête de l'ouvrage
RG_TH3	Crête de l'ouvrage
RD_TH2	Crête de l'ouvrage

Le niveau de sûreté peut être fixé à la crête des ouvrages. Il est extrêmement délicat de définir une période de retour associée, compte tenu des phénomènes associés (front de lave, risque d'obstruction d'ouvrage) ; il s'agit d'une lave au-delà d'une lave fréquente mais à priori bien inférieure à une lave rare.

7.5.3 Estimation du niveau de danger

Au regard des probabilités de ruptures, il apparaît que le niveau de danger ne soit pas atteint. La situation la plus contraignante apparaît pour une lave rare du Piésan, selon une probabilité évaluée entre 5 et 50%.

Il a été décidé de ce fait de ne pas représenter de brèche mais plutôt des obstructions d'ouvrage qui sont plus susceptibles d'apparaître avant une brèche.

7.5.4 Choix du maître d'ouvrage des niveaux de protection

Au regard des analyses de défaillance, le niveau de protection peut être fixé théoriquement jusqu'au niveau de protection apparent du système d'endiguement.

L'entrée d'eau, notamment par influence des ouvrages traversants, peut se produire pour un aléa fréquent dans le cas d'un arrochage à une pile de pont ; cet événement représente une lave de quelques milliers de mètres cubes. Cependant, il n'est pas exclu qu'une lave d'ampleur plus importante (de l'ordre de l'évènement rare) puisse tout de même transiter jusqu'au tronçon aval sans obstruction des ouvrages traversants et que le niveau de crête des ouvrages RG_TH3 et RD_TH2 soit atteint (comportement observé lors de la crue de 2014). Aussi, en synthèse, ce niveau de protection :

- Correspond à la sous-poutre du pont de la route communale au droit lieu du premier lieu de référence ;
- Correspond à la limite de surverse des digues RD_TH2 et RG_TH3, 2 m en aval du pont de la route départementale, avec une revanche de l'ordre de 1.5 m pour tenir compte des incertitudes associés aux phénomènes torrentiels en jeu (notamment des fronts de laves dense ainsi que de l'influence du dépôt régressif depuis la plage de dépôt) ;
- Traduit donc un non-débordement de l'ensemble des digues et donc une zone protégée « pieds au sec ».

Le niveau de protection retenu correspond aux niveaux d'eau et de matériaux à chaque lieu de référence, comme suit :

- Lieu de référence n°1 (Sous-poutre pont communal) : 563.5 m NGF,

- Lieu de référence n°2 (1.5 m de revanche vis-à-vis de la crête de l'ouvrage RG_TH3, 2 m en aval du pont de la route départementale) : 551.1 m NGF.

8. ETUDE DE RISQUE DE VENUES D'EAU DANS ET EN DEHORS DE LA ZONE PROTEGEE

8.1 Généralités

La méthode conduit donc à définir des emprises maximales d'extensions de crues, qui ne vont pas correspondre à l'emprise des débordements d'une seule crue, mais correspondent à toutes les zones susceptibles d'être atteinte au cours d'au moins un évènement, selon le caractère aléatoire des crues torrentielles.

En d'autres termes, les zones délimitées par cette méthodologie représentent une enveloppe maximale d'extensions des crues qui pourraient apparaître, dans la gamme d'aléa retenu en termes de période de retour.

Pour tenir compte de cet aspect aléatoire et de toutes les incertitudes liées aux aléas torrentiels, il est proposé, comme dans l'EDD du Nant Trouble [10], d'associer un niveau de probabilité d'atteinte aux zones concernées : probabilités d'atteinte très probable, probable et peu probable. L'atteinte d'une zone concernée par une faible probabilité sera liée à un phénomène exceptionnel, largement supérieur au siècle ; à l'inverse, un secteur estimé impacté dès dépassement de la crue de protection sera concerné par un risque d'atteinte très probable.

Pour des débordements de lave torrentielle avec étalement, l'intensité de l'aléa diminue avec l'éloignement du torrent. Ce ne serait pas forcément le cas pour un changement total du lit, où le niveau d'aléa peut rester élevé dans un « nouveau lit » s'éloignant pourtant de l'axe initial d'écoulement. Le cas présent, un changement de lit du Piésan vers la zone protégée paraît complètement improbable.

Aussi, les secteurs présentant les probabilités d'atteintes les plus faibles sont aussi concernées par les niveaux d'intensité (hauteur de dépôt, vitesses) les plus faibles.

8.1.1 Scénarios de défaillance considérés

Les scénarios définis dans l'arrêté du 30 septembre 2019 sont les suivants :

- Le scénario 1 est celui du **fonctionnement nominal** du système d'endiguement quand le niveau des écoulements, sous l'effet de la crue, correspond au niveau de protection. On admettra que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de **rupture d'ouvrage de 5 %** au plus. En outre, des venues d'eau plus ou moins dangereuses sont possibles en dehors de la zone protégée.
- Le scénario 2 est représentatif d'une **défaillance fonctionnelle** du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection. La défaillance fonctionnelle, qui est réputée liée à la défaillance d'un dispositif de régulation des écoulements hydrauliques (batardeau qui n'est pas mis en place ou qui se rompt, vanne qui reste en position ouverte, station de pompage en panne, etc.), ne s'accompagne pas d'une défaillance structurelle des ouvrages. Il en résulte néanmoins des venues d'eau plus ou moins dangereuses dans la zone protégée ou une aggravation des venues d'eau en dehors de cette dernière.
- Le scénario 3 est représentatif d'une **défaillance structurelle** du système d'endiguement. Pour que ce scénario reflète une situation de terrain réaliste et porteuse d'enseignements pour les services en charge des secours aux personnes, le niveau d'aléa retenu doit être tel qu'il génère un **risque de rupture d'au moins un ouvrage supérieur à 50 %**.

Etude de dangers du système d'endiguement du Piésan

- Le scénario 4 est représentatif du comportement du système d'endiguement quand se produit l'**aléa de référence** du plan de prévention des risques naturels inondation quand un tel plan existe.

Ainsi, dans le cas de la présente étude, les scénarios suivants seront réalisés :

- Scénario 1 : Ce scénario correspond au scénario de fonctionnement nominal qui correspond au plus haut niveau de protection.
- Scénario 2 : Dans le cas du Piésan, aucun scénario 2 ne peut être proposé au vu de sa configuration (absence de dispositifs de régulations des écoulements hydrauliques).
- Scénario 3 : Ce scénario donnera lieu à une cartographie construite à partir de deux sous-scénarios sont proposés :
 - Scénario 3 a) : Événement de lave torrentielle rare combiné à une obstruction du ponceau agricole.
 - Scénario 3 b) : Événement de lave torrentielle rare combiné à une obstruction du pont communal.
- Scénario 4 : Aucun scénario 4 n'est proposé dans cette étude.

8.1.2 Hypothèses relatives aux scénarios et à la cartographie proposée

Les différents scénarios retenus et décrits précédemment reposent sur des hypothèses qui conditionnent les résultats qui seront observés. Il est proposé de les lister dans ce paragraphe :

- Le fond du lit ne présente pas d'engravement lié à une précédente crue qui viendrait diminuer la capacité de transit (sauf cas contraire précisés) ;
- Le lit est considéré comme à fond fixe ; les érosions (latérale et incision) pouvant apparaître (déstructuration d'un ouvrage, probabilité faible) ne sont pas représentées ;
- Les ouvrages de franchissement n'entraînent pas d'obstruction du lit (sauf cas contraire précisé) ;
- Les ouvrages associés sont en bon état et permettent d'assurer le bon fonctionnement du système d'endiguement.
- Aussi, les secteurs présentant les probabilités d'atteintes les plus faibles sont aussi concernées par les niveaux d'intensité (hauteur de dépôt, vitesses) les plus faibles.

L'analyse des conséquences en termes de débordements dans la zone protégée repose sur plusieurs approches complémentaires, vus en partie 4.1 du présent rapport : analyse géomorphologique, historiques des crues, modélisation permettant d'appréhender l'étalement de laves torrentielles, croisement avec les études antérieures du site (en particulier l'EDD de l'ONF/RTM 2019).

La méthode conduit donc à définir des emprises maximales d'extensions de crues, qui ne vont pas correspondre à l'emprise des débordements d'une seule crue, mais correspondent à toutes les zones susceptibles d'être atteinte au cours d'au moins un événement, selon le caractère aléatoire des crues torrentielles (notamment pour les scénarios 3).

En d'autres termes, les zones délimitées par cette méthodologie représentent une enveloppe maximale d'extensions des crues qui pourraient apparaître, dans la gamme d'aléa retenu en termes de période de retour.

Pour tenir compte de cet aspect aléatoire et de toutes les incertitudes liées aux aléas torrentiels, il est proposé, d'associer un niveau de probabilité d'atteinte aux zones concernées : probabilités d'atteinte très probable, probable et peu probable. L'atteinte d'une zone concernée par une faible probabilité sera liée à un phénomène exceptionnel, largement supérieur au siècle ; à l'inverse, un secteur estimé impacté dès dépassement de la crue de protection sera concerné par un risque d'atteinte très probable.

Pour des débordements de lave torrentielle avec étalement, l'intensité de l'aléa diminue avec l'éloignement du torrent. Ce ne serait pas forcément le cas pour un changement total du lit, où le niveau

d'aléa peut rester élevé dans un « nouveau lit » s'éloignant pourtant de l'axe initial d'écoulement. Le cas présent, un changement de lit du Piésan vers la zone parait improbable.

Dans cette logique, sur les secteurs concernés par des débordements de lave, il est considéré que :

- Au droit **des zones exposées à une atteinte très probable**, à proximité du torrent, la hauteur d'écoulement et/ou de dépôt peut dépasser 1 à 2 m, notamment par accumulation contre les faces amonts des bâtiments. Par ailleurs, la dynamique, liée à la vitesse et surtout aux possibles chocs de laves, est élevée. Aussi, **ces débordements sont qualifiés de très dangereux**.
- Au droit des zones exposées **à une atteinte probable**, généralement un peu plus éloignée du lit, la lave continue son étalement et sa dynamique décroît avec la distance. Il est estimé que les hauteurs de dépôts peuvent encore dépasser le mètre, notamment localement au droit de point bas ou contre les faces amont des bâtiments. Les débordements sont alors, sur ce secteur, **qualifiés de dangereux**.
- Enfin, sur les secteurs concernés par une **faible probabilité d'atteinte**, le processus d'étalement de la lave torrentielle se poursuit, à la faveur de la distance parcourue et d'une pente de plus en plus faible. Les vitesses et les hauteurs de dépôts diminuent. L'étendue occupée par de véritables dépôts de laves dépend du volume de débordement, de la rhéologie de la lave. En aval de ceux-ci, les terrains peuvent alors être concernés par des écoulements plus liquides, issus du ressuyage des matériaux ou d'écoulement d'eaux claires en fin de crue. Ces atteintes de la zone protégée sont qualifiées de **peu ou pas dangereuses**.

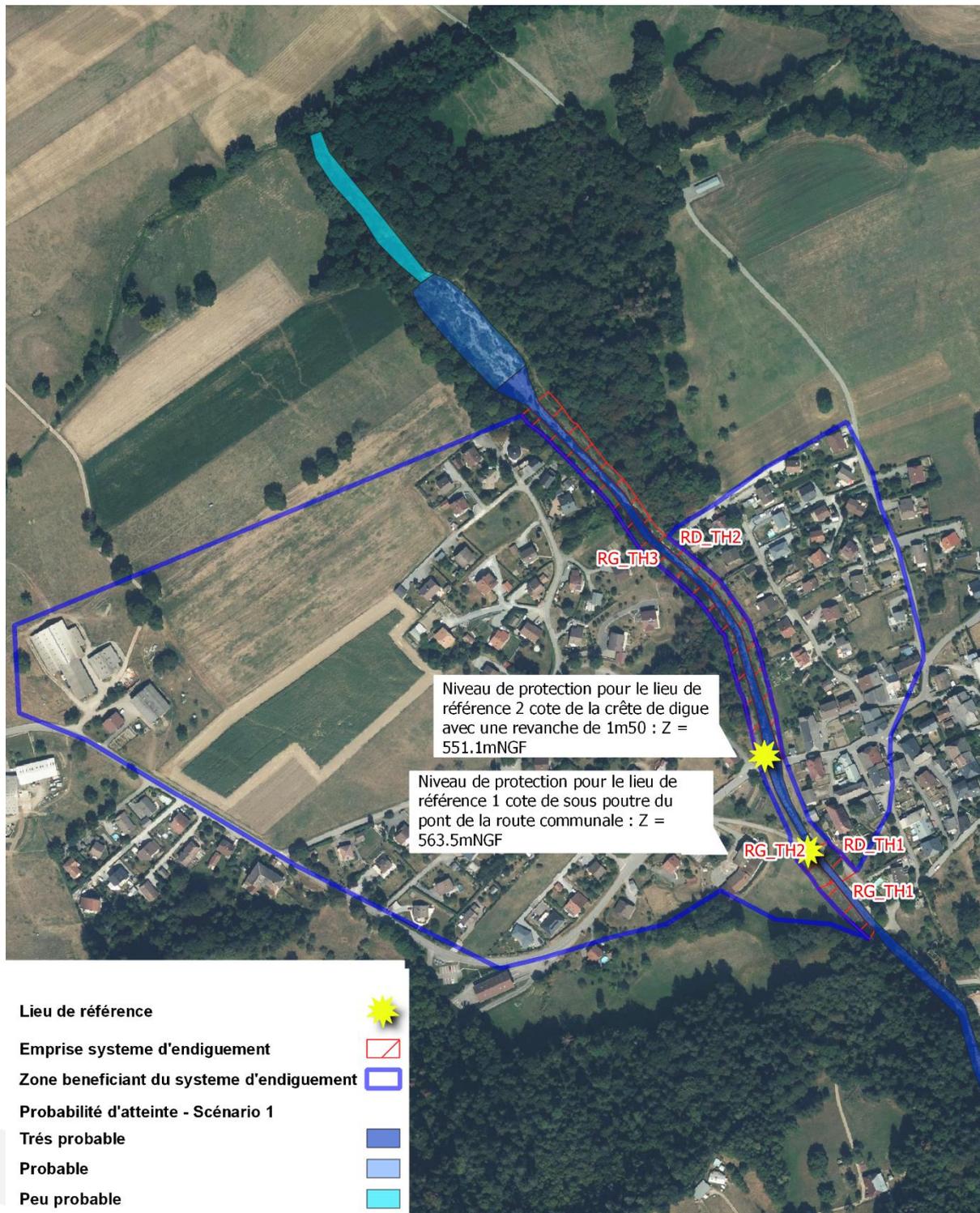
8.2 Scénario n°1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement

L'arrêté d'avril 2017 prévoit l'étude du fonctionnement nominal du système, quand le niveau de l'eau, correspond au plus haut niveau de protection.

Les risques de débordements, selon les différents aléas étudiés, ont été analysés au paragraphe 4.1.3.

Dans le cas du Piésan, la probabilité d'atteinte est la plus élevée dans le lit avec une décroissance de cette dernière d'amont en aval. La dangerosité est très élevée compte tenu de la vitesse, de la charge de matériaux des laves, et également des hauteurs de dépôts excédant le mètre.

La carte suivante a été établie sur la base d'interprétations faites sur le modèle hydraulique et présente les probabilités d'atteintes d'un événement apparenté à une lave fréquente sur le secteur pour le scénario 1, avec donc une absence de débordement dans la zone protégée.



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-chaise

Venues d'eau dangereuses - Etat projet - Probabilité d'atteinte d'une lave fréquente - Scénario1 - Fonctionnement nominal du système d'endiguement du Piésan

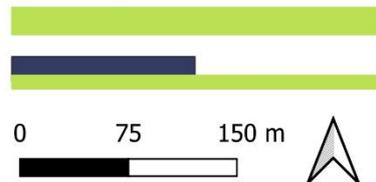


Figure 187 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement

8.3 Scénario n°2 : Défaillance fonctionnelle du système d'endiguement

L'arrêté d'avril 2017 prévoit l'étude d'une deuxième famille de scénarios « représentatifs d'une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection ».

Ce scénario ne s'accompagne pas d'une défaillance structurelle, il s'agit bien d'une défaillance liée au dysfonctionnement d'un dispositif de régulation des écoulements. Étant donné qu'il n'y a pas d'ouvrage de régulation sur le Piésan, aucun scénario réaliste ne peut être proposé.

Une crue chargée en matériaux pouvant entraîner des surverses et survenant après un engrèvement du lit (défaut de curage) est peu probable puisqu'il impliquerait une disponibilité en matériaux importante dans un intervalle de temps rapproché. **Ce scénario a donc été écarté.**

8.4 Scénario n°3 : Défaillance structurelle du système d'endiguement

L'arrêté d'avril 2017 demande l'étude d'une troisième famille de scénario « représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement. Pour que ce scénario reflète une situation de terrain réaliste et porteuse d'enseignements pour les services en charge des secours aux personnes, le niveau d'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture d'au moins un ouvrage supérieur à 50% ».

Ce scénario ne représente pas un événement en particulier mais une combinaison d'évènements possibles. Elle est basée sur une interprétation d'un ensemble de modélisations d'étalement de lave torrentielle et de l'interprétation de la géomorphologie locale.

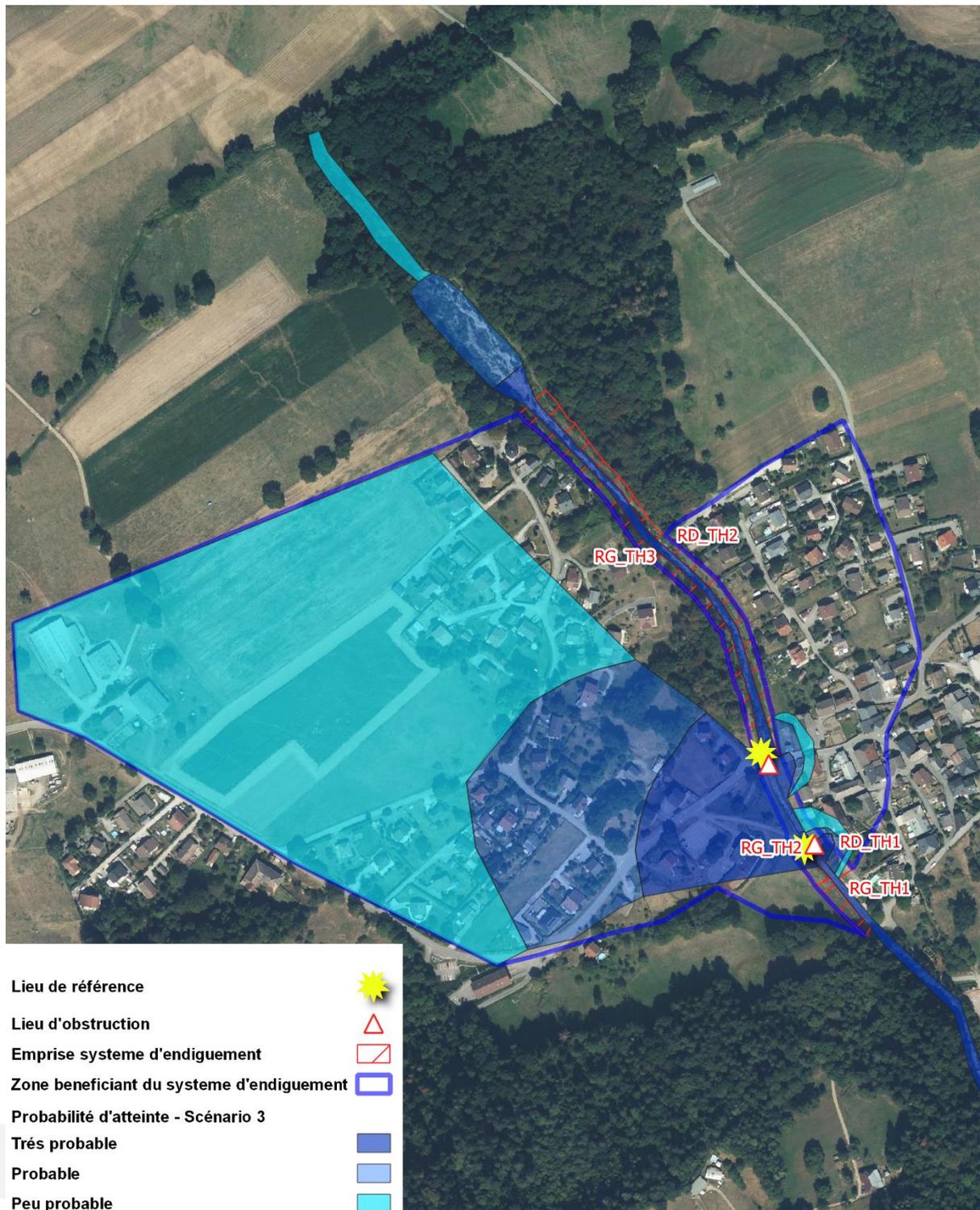
Le scénario n°3 intègre une combinaison des situations suivantes :

- Crue correspondant à la borne haute des scénarios fréquents de lave, avec obstruction des ponts de la route communale et de départementale et tronçon de digue RG_TH2 abaissé (risque de défaillance qualifié au plus de moyen) ;
- Crue correspondant à la borne haute des scénarios rares de lave, avec obstruction des ponts de la de la route communale et de départementale et tronçon de digue RG_TH2 abaissé (risque de défaillance qualifié au plus de moyen) ;

Les conséquences prévisibles sont les suivantes :

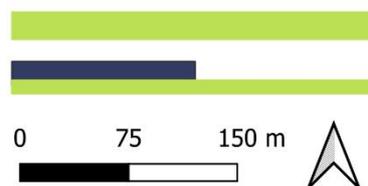
- Les laves surversent en grande partie en rive gauche avec des dépôts solides qui décroissent en quantité avec l'éloignement aux différents lieux d'obstruction, en rive droite des débordements locaux sont aussi attendus dans une moindre mesure. Compte tenu des incertitudes associées à ce type de simulation numérique dans un tel contexte, la surverse sur les ouvrages reste possible sur ce type d'évènement, mais resterait assez localisée, sans risque de propagation d'une lave sur une grande distance en arrière des ouvrages.
- Un volume de la lave est potentiellement toujours attendu au sein du lit du Piésan avec un arrêt probablement contenu dans la plage de dépôt ou son amont immédiat.
- Une grande partie de la rive gauche du cône de déjection est concernée par ces venues d'eau, notamment par des écoulements moins chargés en matériaux (fin de crue plus liquides/ dépôt de matériaux).

La dangerosité des venues d'eau décroît avec la probabilité d'atteinte. Pour ces scénarios, au droit des enjeux, on obtient des venues d'eau très dangereuses pour l'école élémentaire et les résidences situées relativement proche des ponts de la route communale et départementale.



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-chaise

Venues d'eau dangereuses - Etat projet - Probabilité d'atteinte d'une lave fréquente à rare - Scénario 3 - Défaillance du système d'endiguement du Piésan liée à l'obstruction des ponts de la route communale et départementale



 SUEZ



Figure 188 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan

9. PRESENTATION ET ANALYSE DE L'ORGANISATION MISE EN PLACE PAR LE GESTIONNAIRE POUR L'EXERCICE DE SES MISSIONS

Pour ne pas alourdir le présent document, l'organisation de la CCSLA est fournie en annexe. Cette organisation a été rédigée conformément à l'arrêté de 2022.

9. BIS – RECOMMANDATIONS

9.1 Analyse de l'organisation du gestionnaire

Les consignes écrites développées dans le document d'organisation sont adaptées aux moyens du syndicat, de l'ampleur des enjeux et sont adaptés au contexte hydraulique principalement imprévisibles et basé sur des crues très rapides.

Elles sont également rédigées conformément à l'arrêté d'aout 2022.

En situation hors-crue, les visites sont assez fréquentes, les accès bien identifiés et la procédure d'enregistrement est claire et suffisamment détaillée.

Il conviendra à la CCSLA d'installer des repères altimétriques marquant le niveau de protection au droit des deux lieux de référence, et d'en assurer l'entretien. Des repères doivent également être installés pour constater rapidement du niveau d'engrèvement du fond du lit.

9.2 Recommandations dans le but de pérenniser le système d'endiguement

La prise en compte d'un certain nombre de mesures (à minima) est fortement recommandée :

- Mettre à jour régulièrement les coordonnées et noms des personnels en charge et l'intégration de gestionnaires tiers comme :
 - Les technicien.ne.s de la CCSLA.
 - Le service technique de la commune et des parties prenantes du suivi en temps de crue des ouvrages
 - Les référent.e.s auprès des services de l'état.

→ **Priorité court terme et renouvellement constant**

- Mettre en place des mesures de gestion des matériaux (plan de gestion/mesures ponctuelles)

→ **Priorité court terme (1er semestre 2025)**

- Matérialisation des lieux de référence et des niveaux de protection, installation de repères altimétriques

→ **Priorité court terme (2025)**

- Il est recommandé d'attribuer un marché à bon de commande travaux d'urgence (type curage) afin de pouvoir réagir rapidement en cas d'épisodes très rapides

→ **Moyen terme**

- Il est envisageable d'augmenter le niveau de protection notamment en permettant une plus grande capacité de transit sous les différents ponts, voir même la suppression du pont amont au système d'endiguement (pont agricole).

→ **Long terme**

Tableau 69 : Préconisations pour la gestion des ouvrages

Action	Echéance d'initiation	Echéance de réalisation	Coût € ; €€ ou €€€ <i>Du - au + cher</i>	Difficulté 1 ; 2 ou 3 <i>Du - au + compliqué</i>
Protocoles de gestion de crise et exercices	Moyen terme	Régulièrement	€	1
Mettre à jour les contacts	Court terme	Régulièrement	€	1
Mesures de gestion des matériaux	Court terme	Court terme	€	2
Matérialiser les lieux de références	Court terme	Moyen terme	€	1
Marché à bons de commande travaux	Moyen terme	Moyen terme	€	2
Augmenter niveau de protection	Long terme	Long terme	€€€	3

10. CARTOGRAPHIES

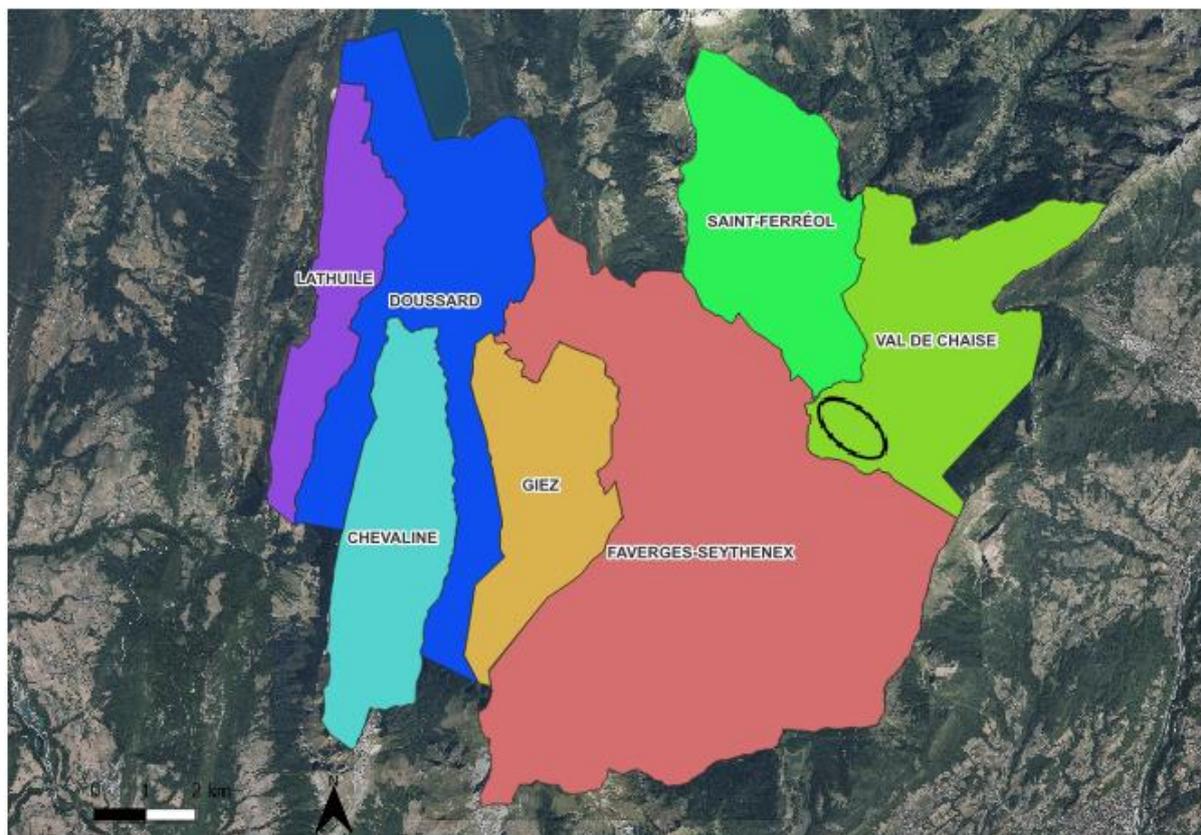


Figure 189 : Limites administratives du territoire relevant de la CCSLA, et localisation de la commune de Val de Chaise dans ce territoire (rond noir)

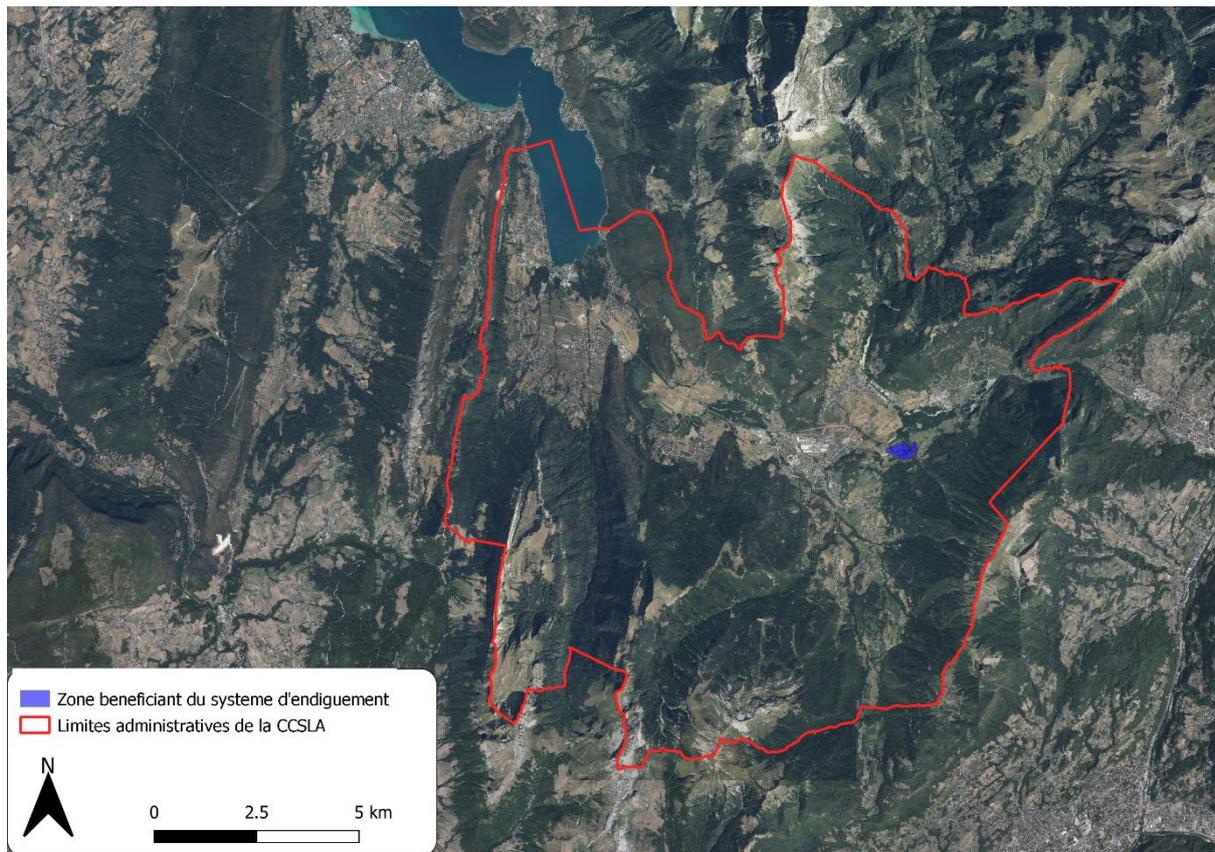


Figure 190 : Limites administratives du CCSLA

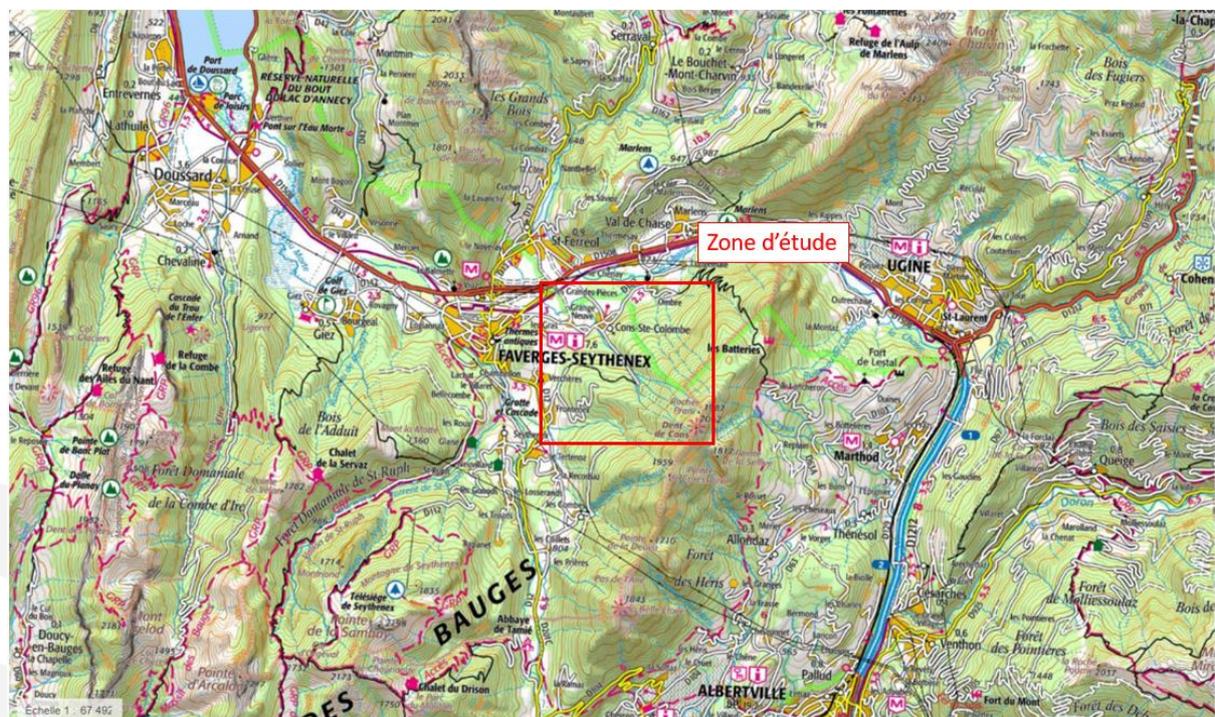
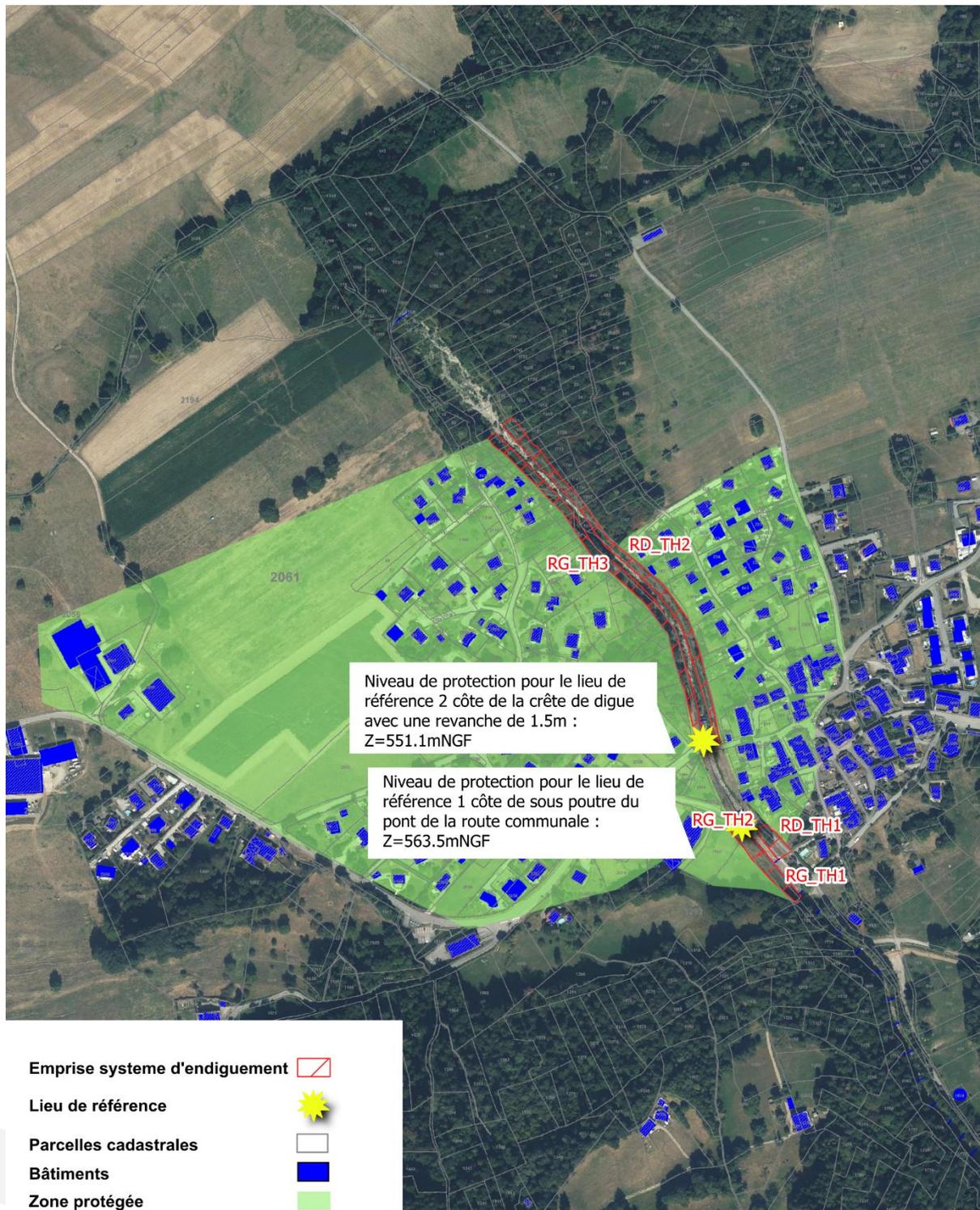


Figure 191 : Localisation de la zone d'étude du Piésan (source : Géoportail IGN)



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-chaise

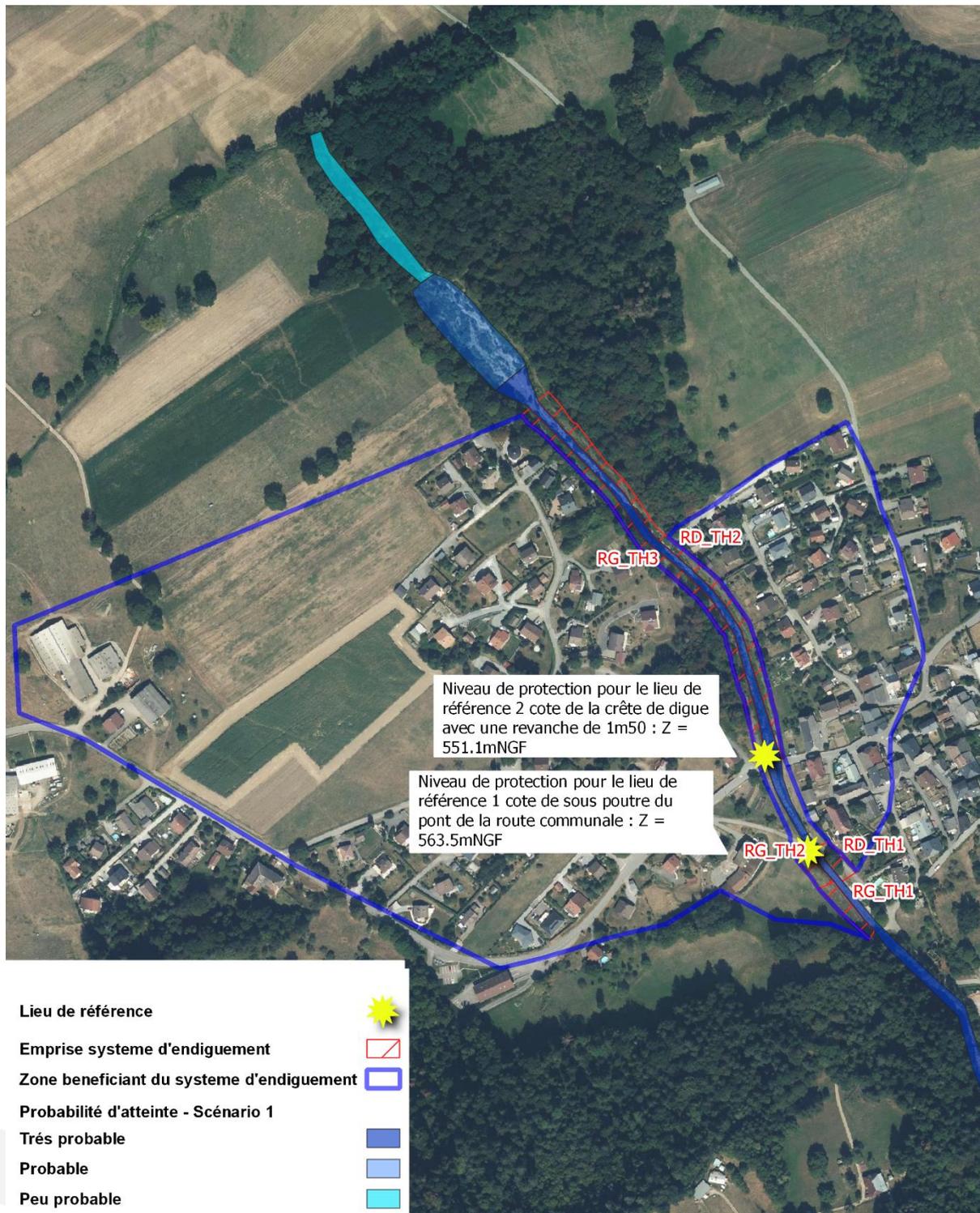
Zone de protection et lieux de références



 suez



Figure 192 : Carte positionnant la zone protégée et les deux lieux de références



Régularisation du système d'endiguement du Piésan sur la commune de Val-de-chaise

Venues d'eau dangereuses - Etat projet - Probabilité d'atteinte d'une lave fréquente - Scénario1 - Fonctionnement nominal du système d'endiguement du Piésan

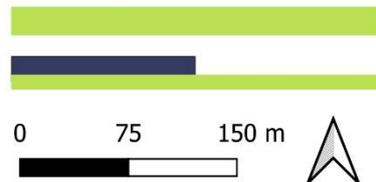


Figure 193 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 1 - fonctionnement nominal du système d'endiguement

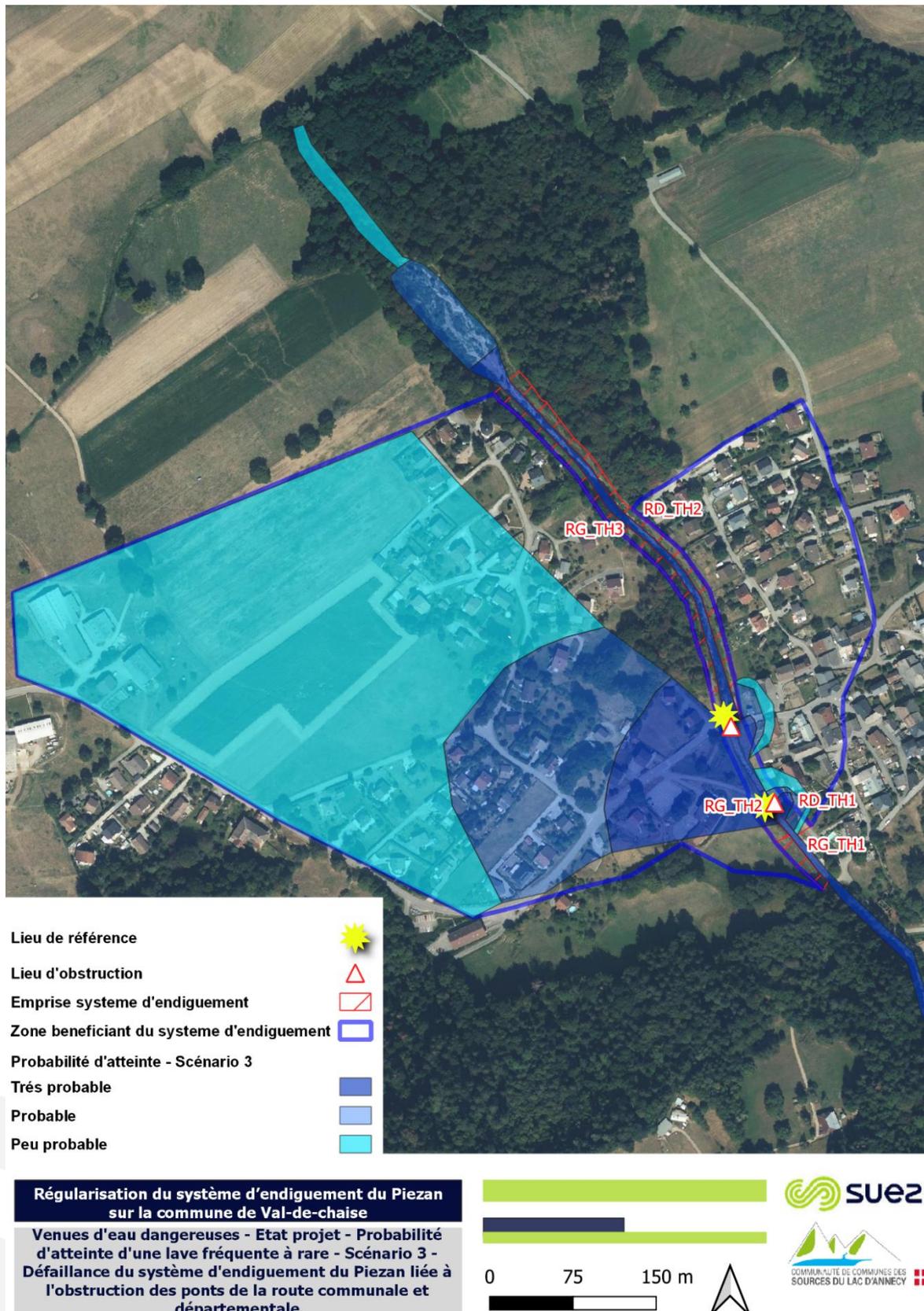


Figure 194 : Cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario 3 – obstruction du pont de la route communale pour une lave fréquente à rare du Piésan

ANNEXES

Annexe 1 : Synthèse des résultats relatifs à l'étude du glissement

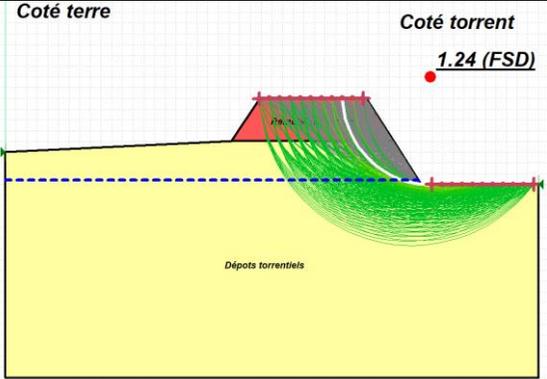
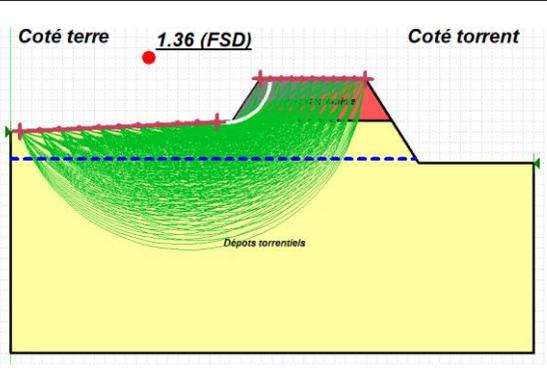
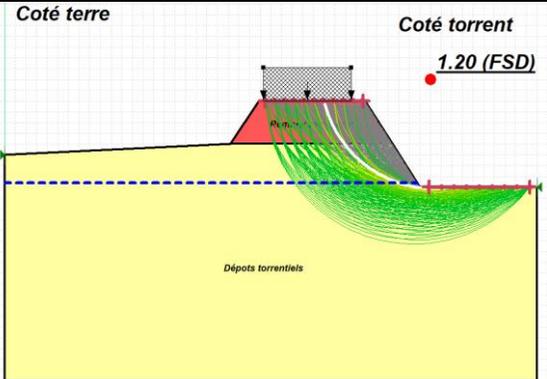
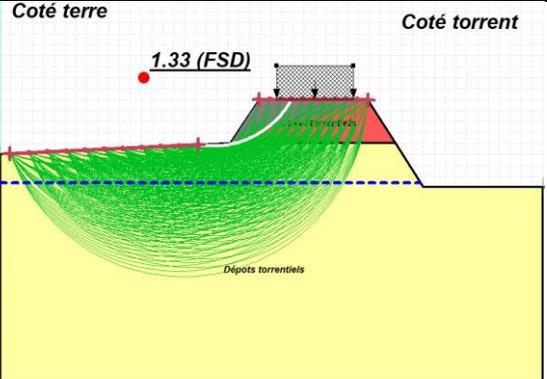
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH1 et RG-TH2		RD-TH1	
			FS coté torrent	FS coté terre	FS coté torrent	FS coté terre
Pas de lave résiduelle	Débit d'étiage - $H=0,2m$	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	1.24	1.36	2.53	4.05
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	1.20	1.33	2.28	2.87
	Débit d'étiage - Séisme $av/g = +/- 0.06$ et $ah/g = 0.120$	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	1.35	1.45	2.33	3.55
	Crue liquide - Pic de crue - $H = -1m$ /crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	1.96	1.36	3.80	2.61
	Crue liquide - Vidange rapide - $H = -1m$ /crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	1.13	1.36	1.93	4.03
Lave résiduelle	Débit d'étiage - $H=0,2m$	Extrême de crue FS cible : 1.1	2.55	1.62	5.04	5.07
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Extrême de crue FS cible : 1.1	1.77	1.59	3.43	3.59
	Débit d'étiage - Séisme $av/g = +/- 0.06$ et $ah/g = 0.121$	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	1.76	1.38	3.39	3.55
	Crue liquide - Pic de crue - $H = -1m$ /crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	4.50	1.62	9.29	3.34
	Crue liquide - Vidange rapide - $H = -1m$ /crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	2.28	1.62	4.46	5.06
Stabilité			Stable	Stable	Stable	Stable

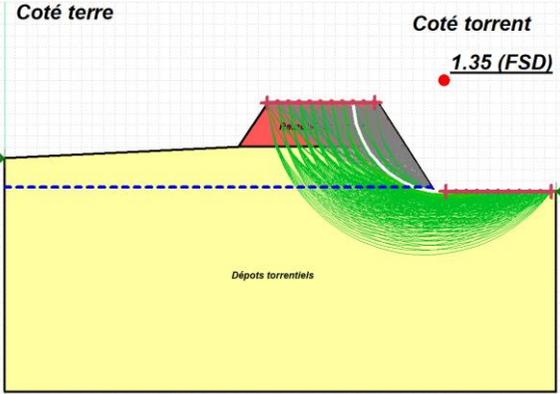
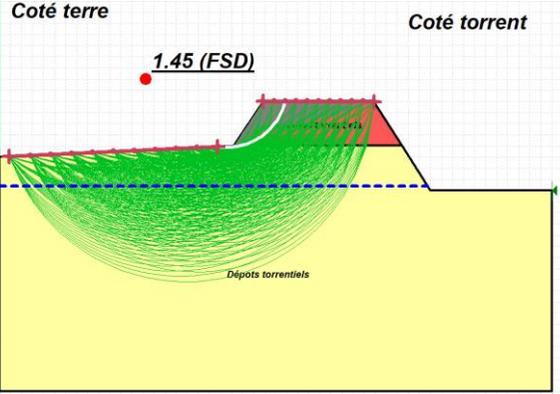
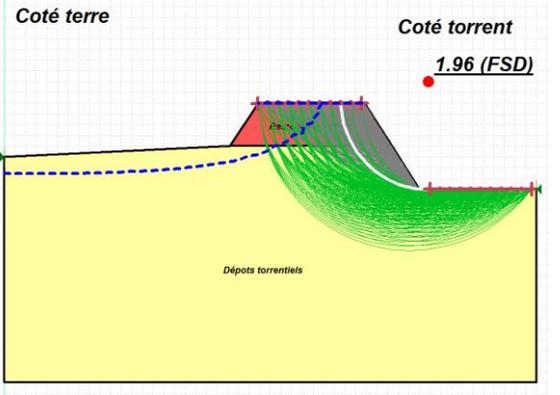
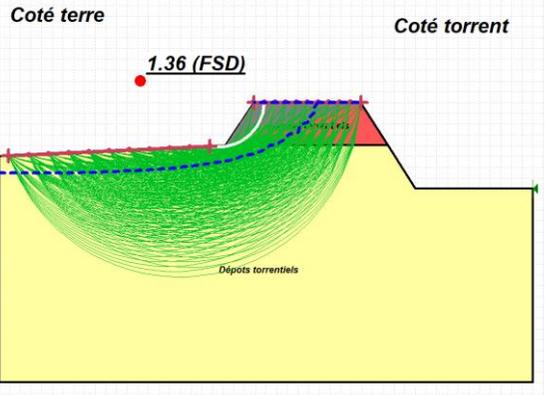
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH3		RD-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre	FS coté torrent	FS coté terre
Pas de lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	1.30	3.37	1.37	3.32
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	1.27	1.79	1.28	1.78
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.120	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	1.30	3.30	1.33	3.08
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	3.33	2.07	2.26	1.84
	Crue liquide - Vidange rapide - H= -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	3.37	1.10	1.14	3.01
Lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Extrême de crue FS cible : 1.1	2.97	4.22	2.82	4.15
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Extrême de crue FS cible : 1.1	2.31	2.24	2.13	2.22
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.121	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	2.24	3.30	2.18	3.08
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	6.33	4.02	5.29	2.01
	Crue liquide - Vidange rapide - H= -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	3.02	4.25	2.60	3.77
Stabilité			Stable	Stable	Stable	Stable

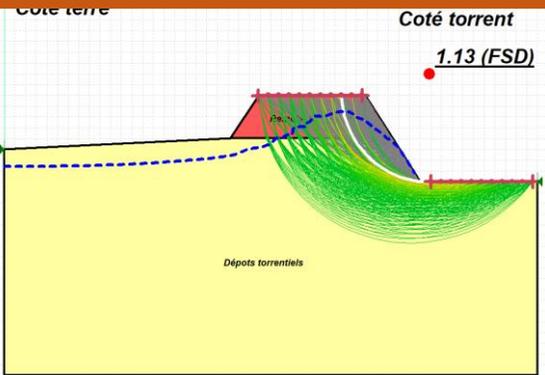
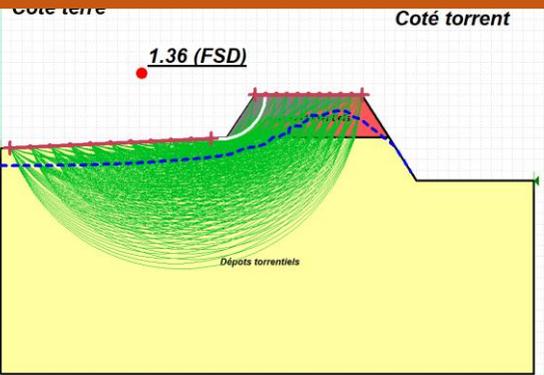
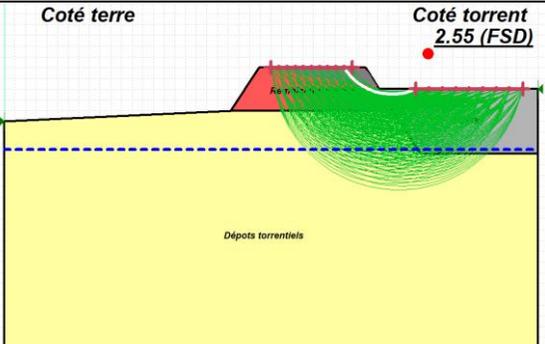
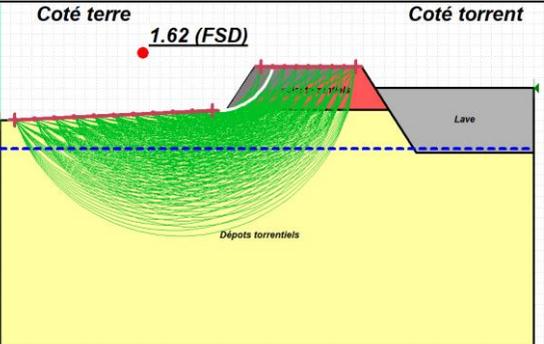
Facteur de surdimensionnement

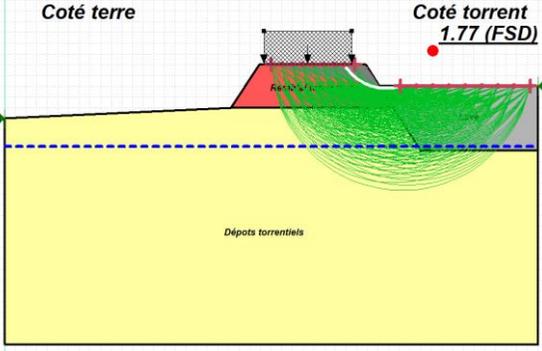
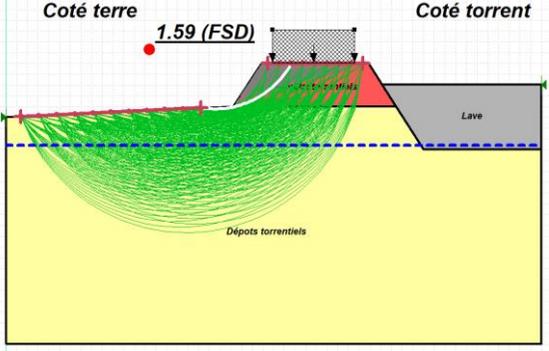
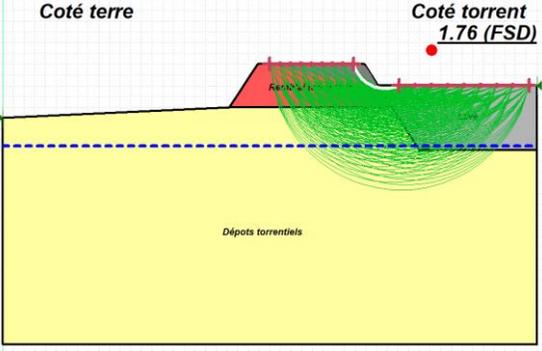
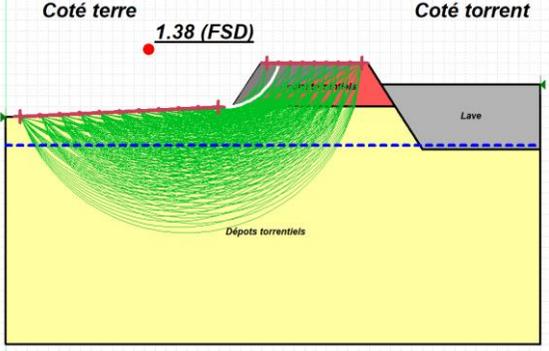
- $\leq 0.90 - 1.00$
- $1.00 - 1.10$
- $1.10 - 1.20$
- $1.20 - 1.30$
- $1.30 - 1.40$
- $1.40 - 1.50$
- ≥ 1.50

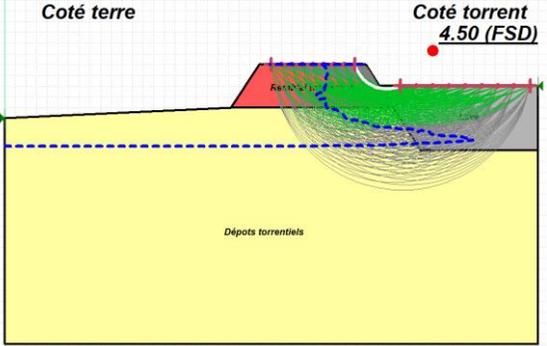
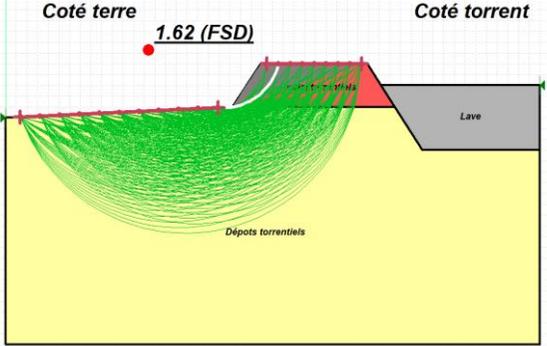
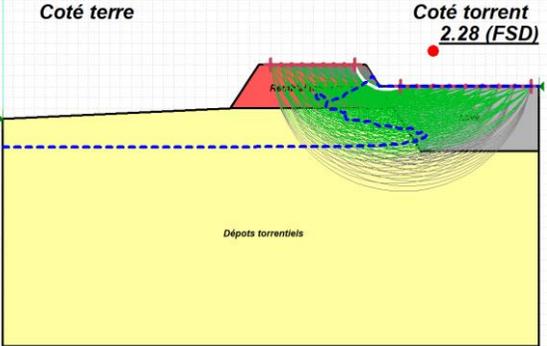
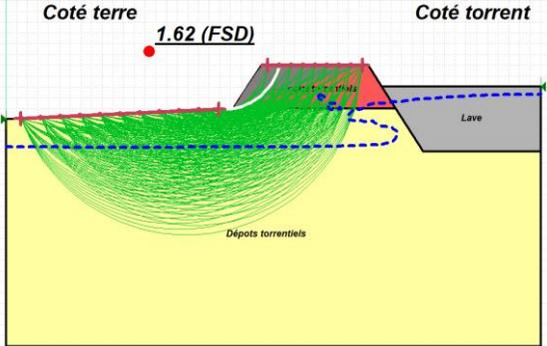
Profil RG-TH1 et RG-TH2

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH1 et RG-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
Pas de lave résiduelle	Débit d'étéage - H=0,2m	Normale d'exploitation FS cible : 1.2		
	Débit d'étéage - Surcharge de 10kPa en crête	Normale d'exploitation FS cible : 1.2		

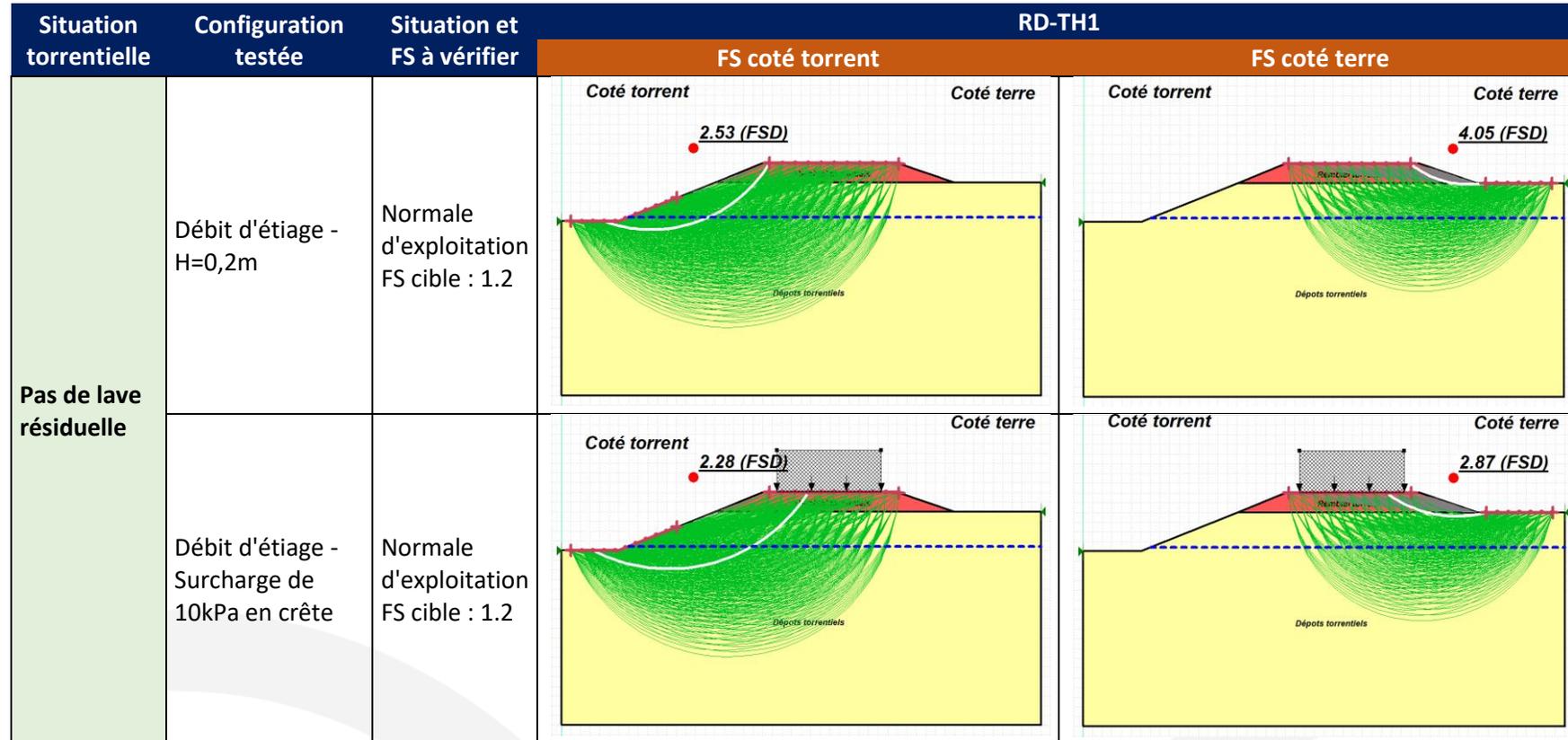
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH1 et RG-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.120	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1		
	Crue liquide - Pic de crue - H = - 1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		

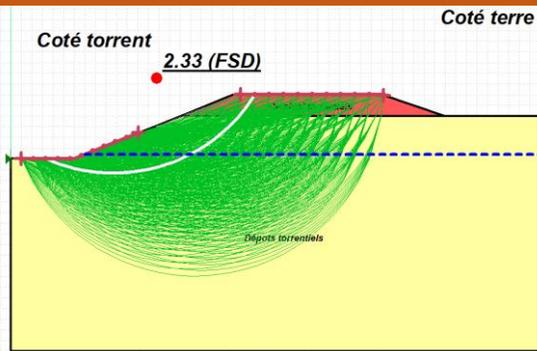
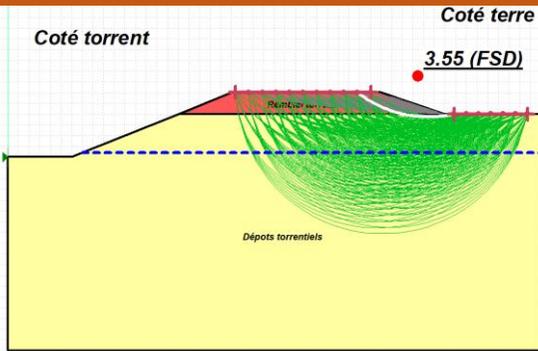
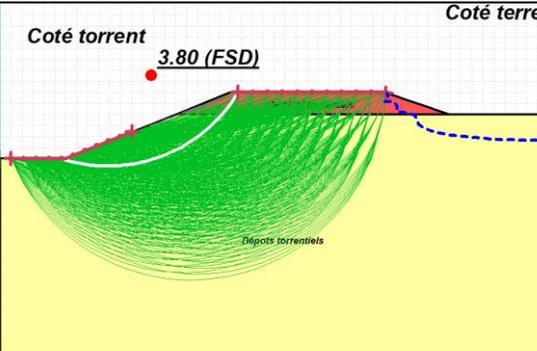
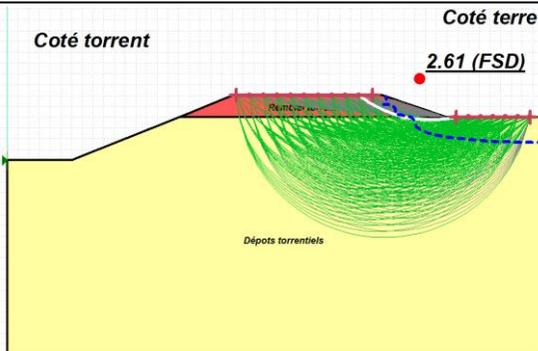
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH1 et RG-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Vidange rapide - H= -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		
Lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Extrême de crue FS cible : 1.1		

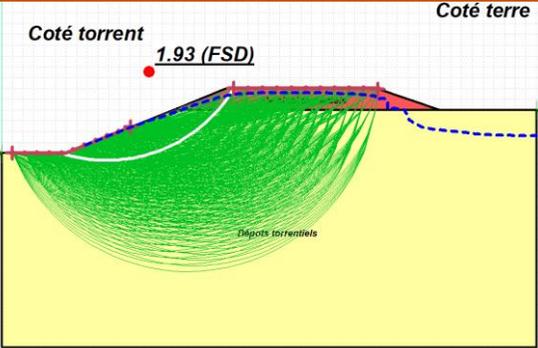
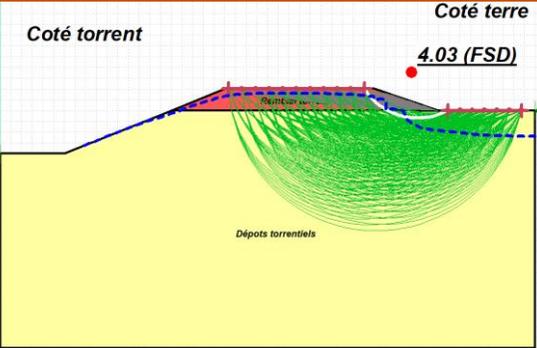
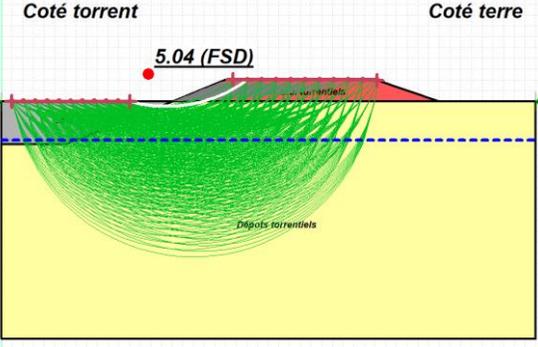
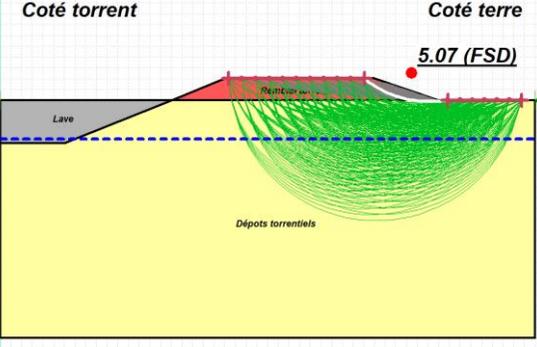
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH1 et RG-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Extrême de crue FS cible : 1.1		
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.121	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1		

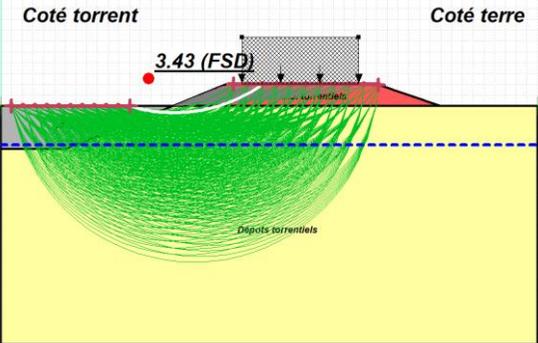
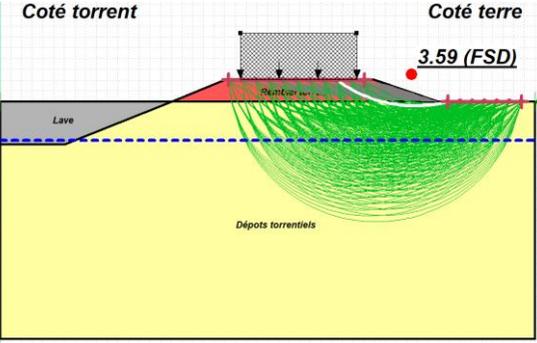
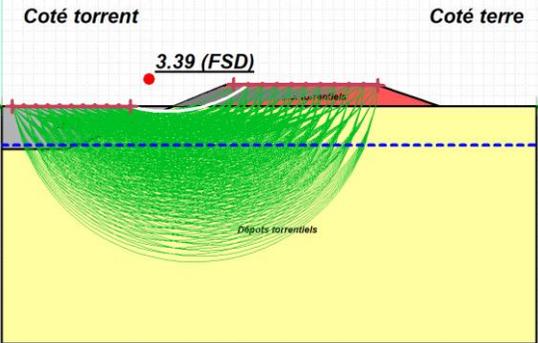
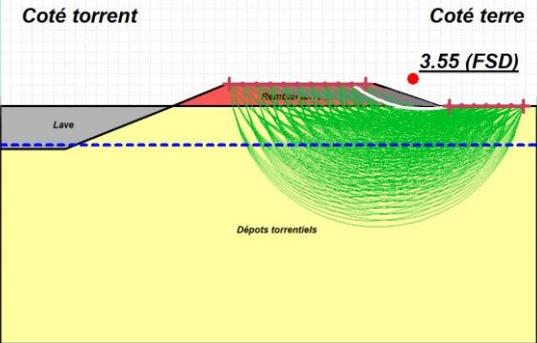
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH1 et RG-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		
	Crue liquide - Vidange rapide - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		

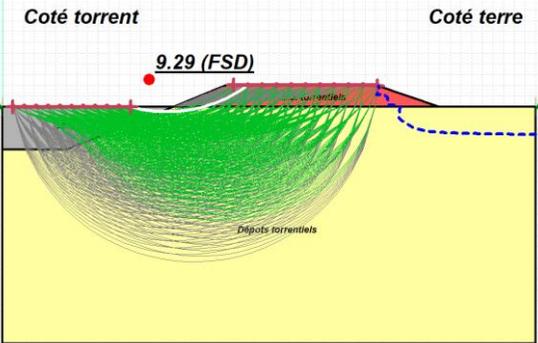
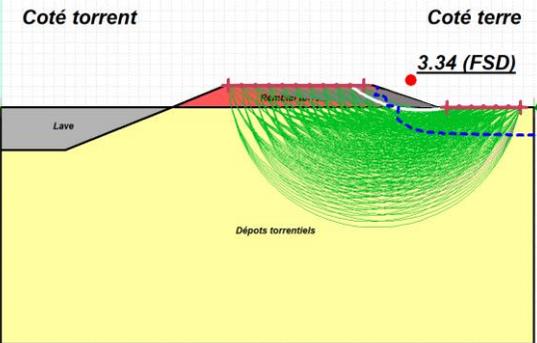
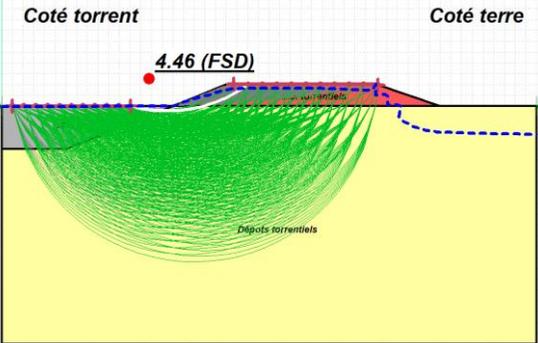
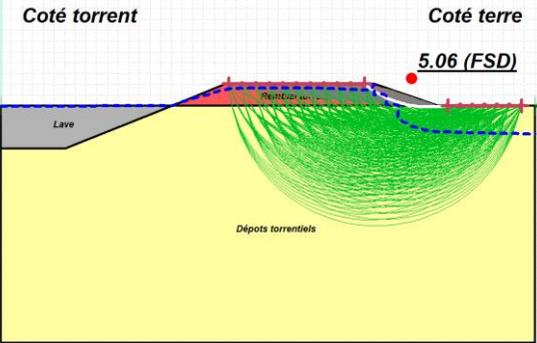
Profil RD-TH1



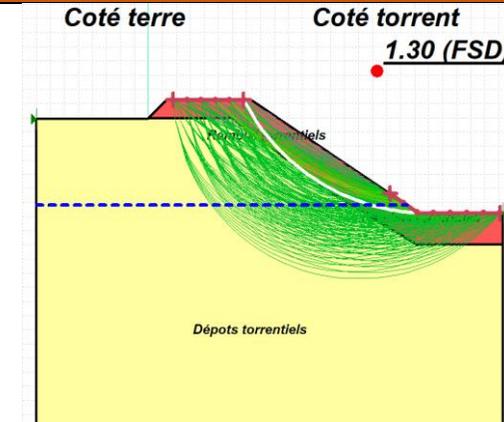
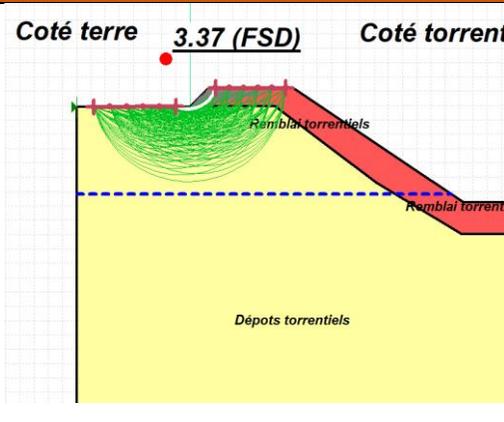
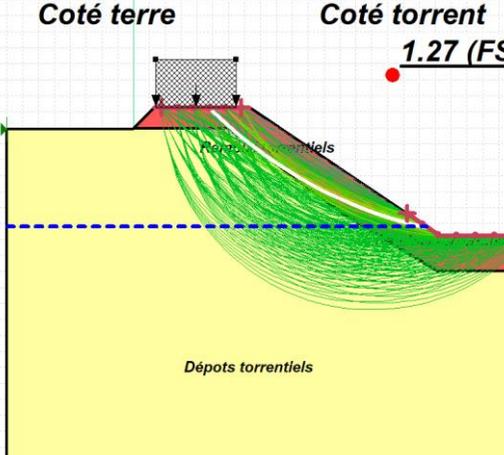
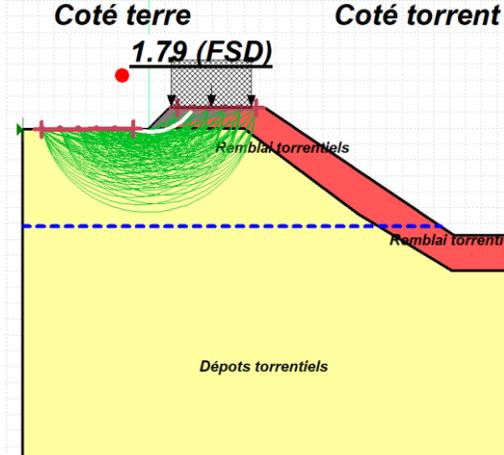
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH1	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.120	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1		
	Crue liquide - Pic de crue - H = - 1m/crête de digue	Normale d'exploitation FS cible : 1.2		

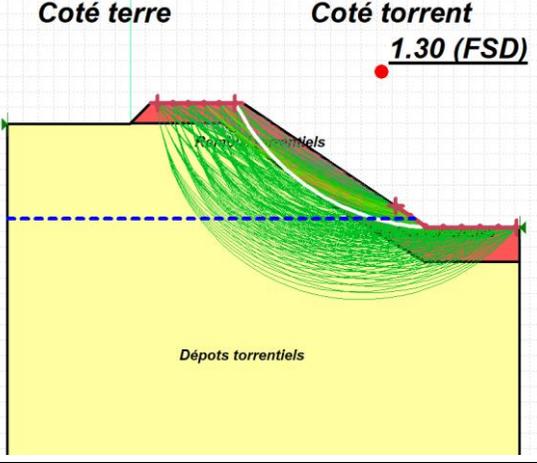
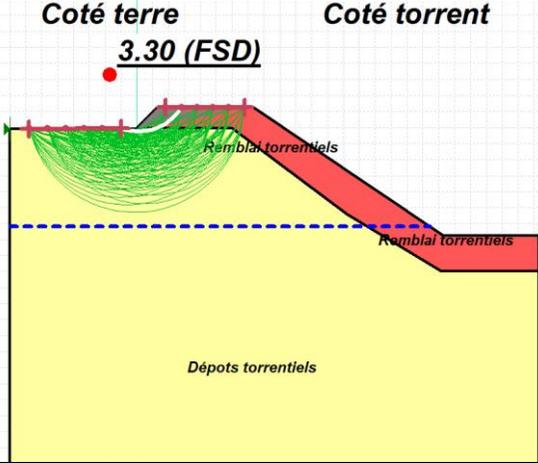
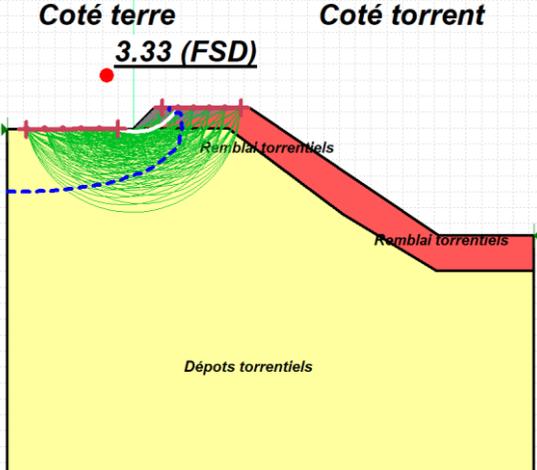
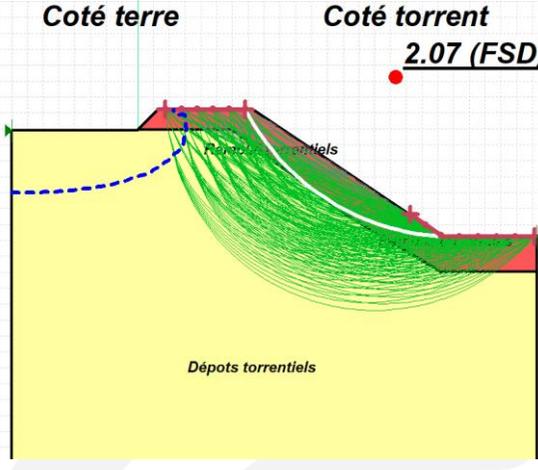
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH1	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Vidange rapide - H= -1m/crête de digue	Normale d'exploitation FS cible : 1.2		
Lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Extrême de crue FS cible : 1.1		

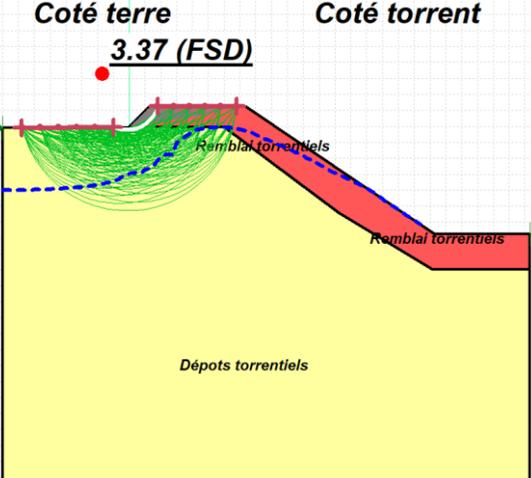
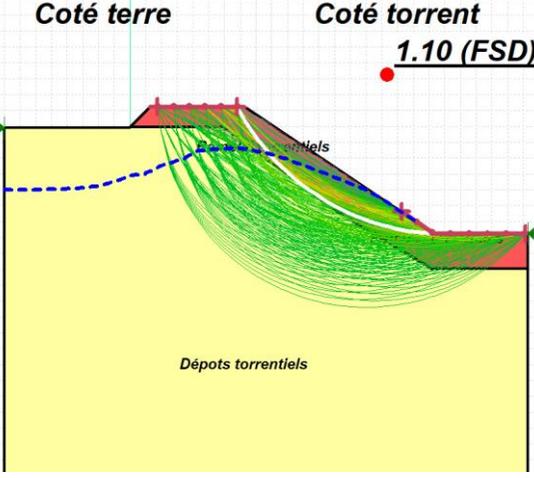
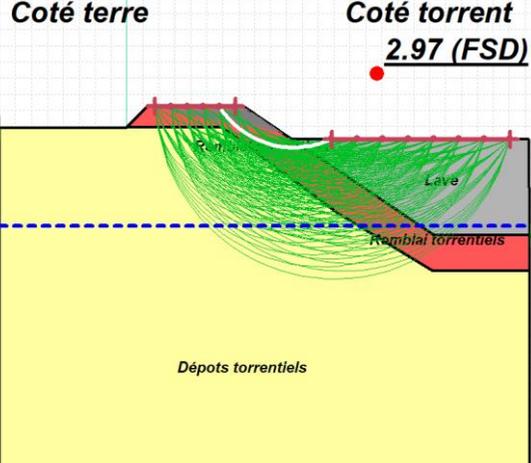
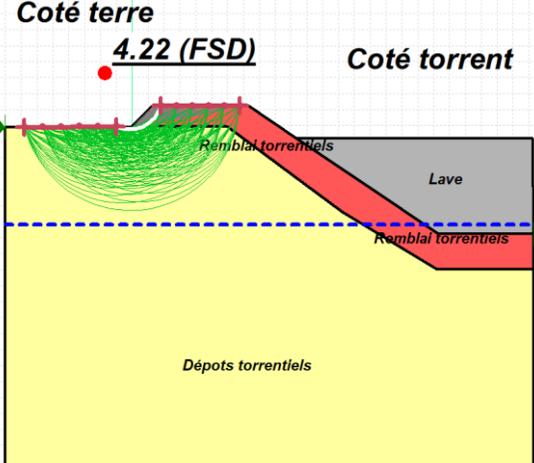
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH1	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Extrême de crue FS cible : 1.1		
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.121	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1		

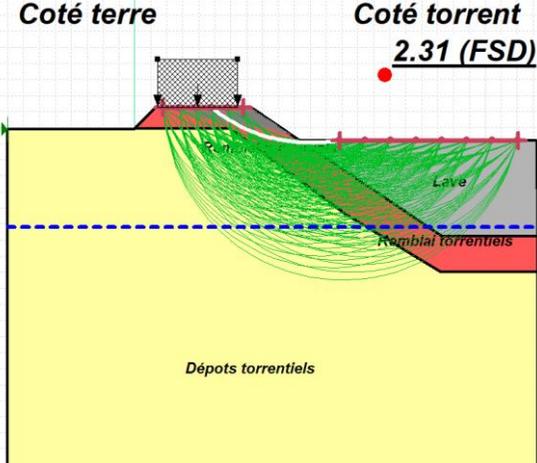
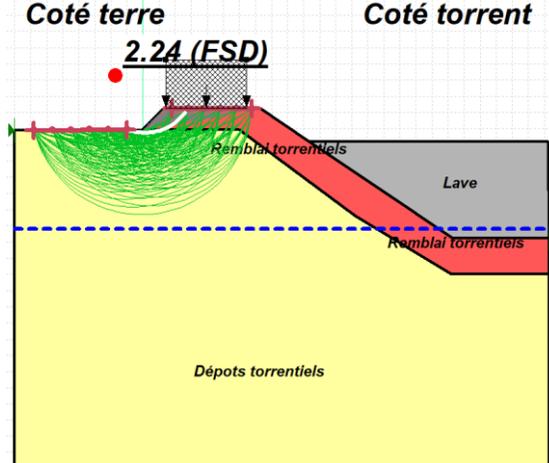
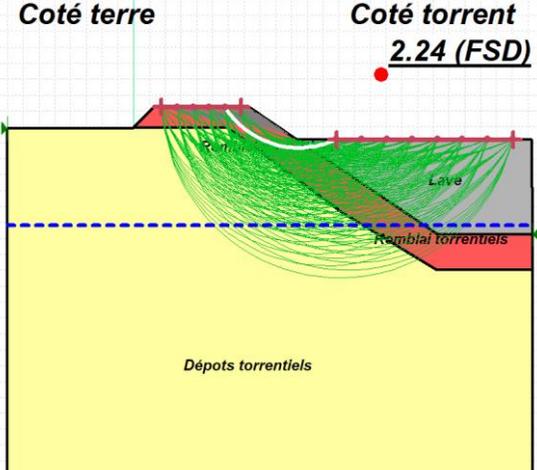
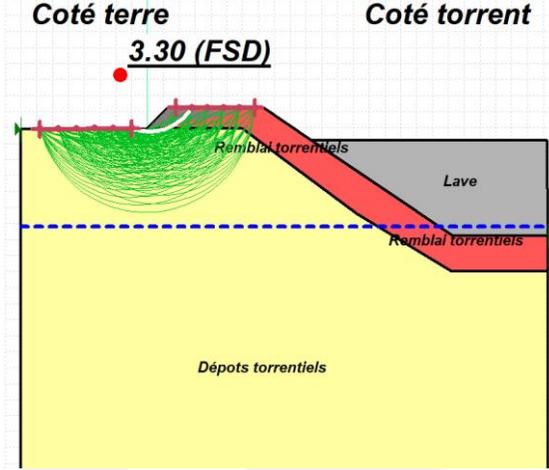
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH1	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		
	Crue liquide - Vidange rapide - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		

Profil RG-TH3

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH13	
			FS coté torrent	FS coté terre
Pas de lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	<p>Coté terre Coté torrent</p> <p>1.30 (FSD)</p> 	<p>Coté terre Coté torrent</p> <p>3.37 (FSD)</p> 
			<p>Coté terre Coté torrent</p> <p>1.27 (FSD)</p> 	<p>Coté terre Coté torrent</p> <p>1.79 (FSD)</p> 

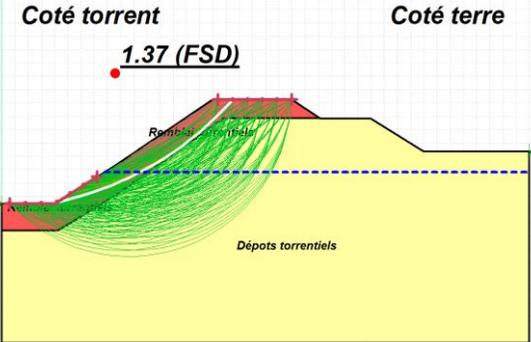
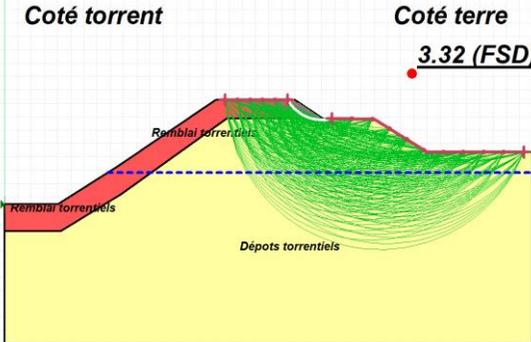
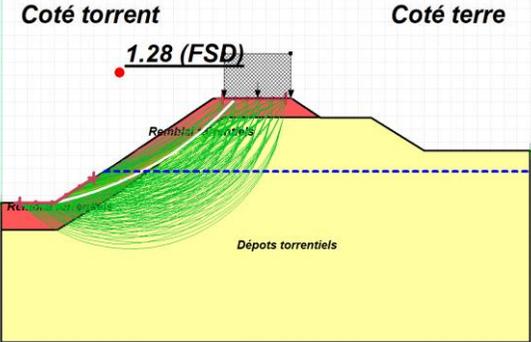
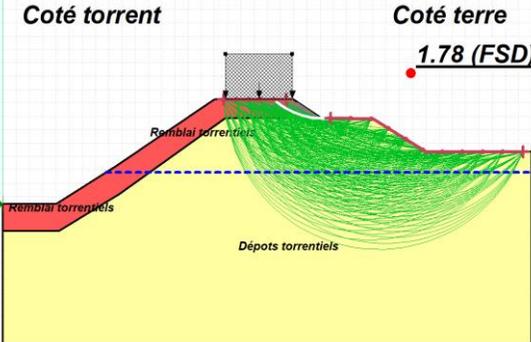
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH13			
			FS coté torrent		FS coté terre	
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.120	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	<p>Coté terre</p> <p>Coté torrent</p> <p>1.30 (FSD)</p> 	<p>Coté terre</p> <p>Coté torrent</p> <p>3.30 (FSD)</p> 		
	Crue liquide - Pic de crue - H = - 1m/crête de digue	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	<p>Coté terre</p> <p>Coté torrent</p> <p>3.33 (FSD)</p> 	<p>Coté terre</p> <p>Coté torrent</p> <p>2.07 (FSD)</p> 		

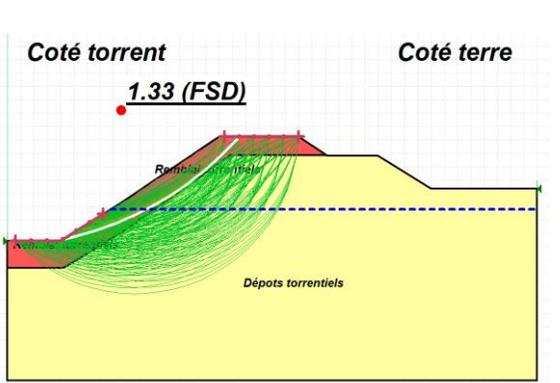
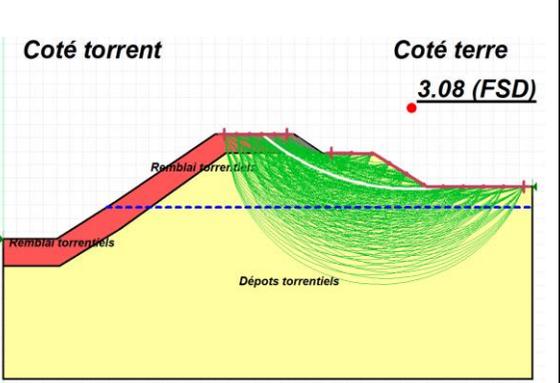
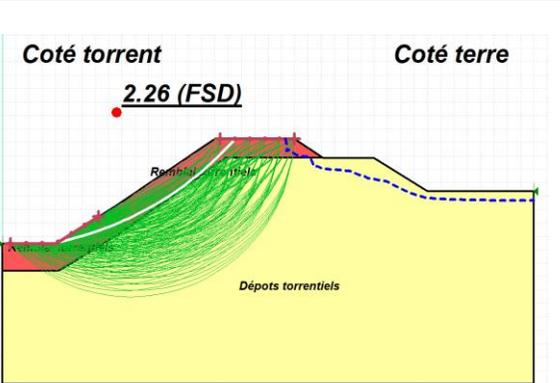
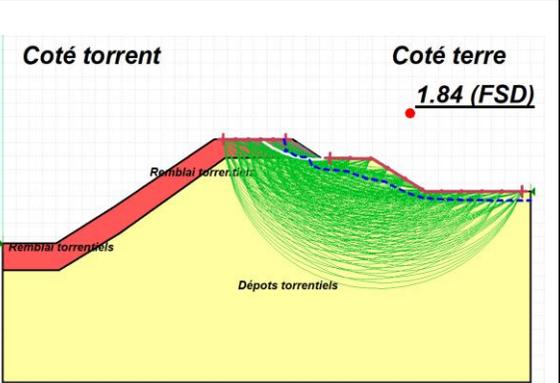
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH13	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Vidange rapide - H= -1m/crête de digue	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	<p>Coté terre 3.37 (FSD)</p> 	<p>Coté torrent 1.10 (FSD)</p> 
Lave résiduelle	Débit d'étéage - H=0,2m	Extrême de crue FS cible : 1.1	<p>Coté terre</p> 	<p>Coté terre 4.22 (FSD)</p> 

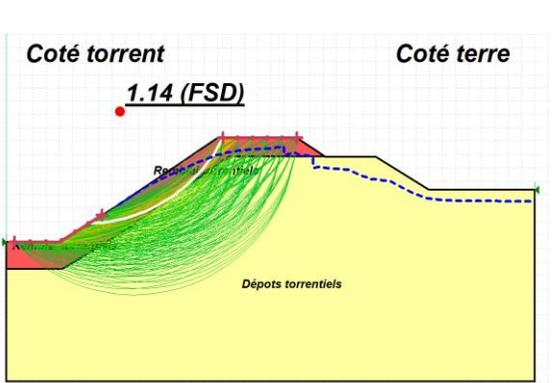
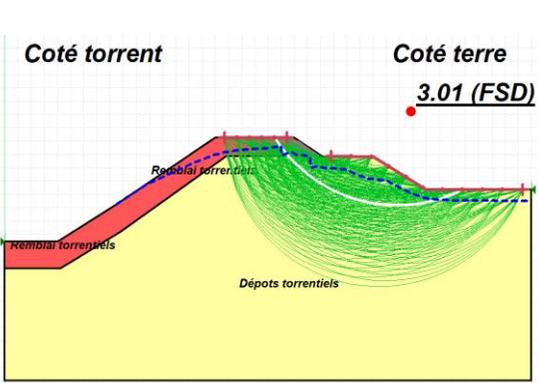
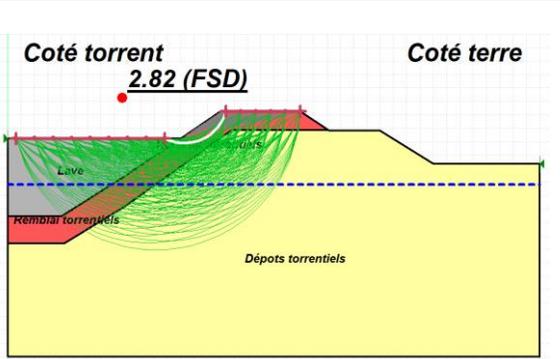
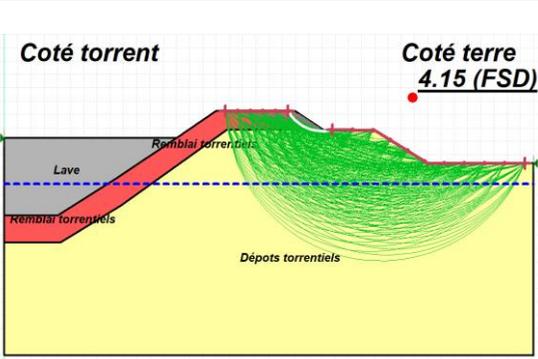
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH13	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Extrême de crue FS cible : 1.1	<p>Coté terre / Coté torrent 2.31 (FSD)</p> 	<p>Coté terre / Coté torrent 2.24 (FSD)</p> 
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.121	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	<p>Coté terre / Coté torrent 2.24 (FSD)</p> 	<p>Coté terre / Coté torrent 3.30 (FSD)</p> 

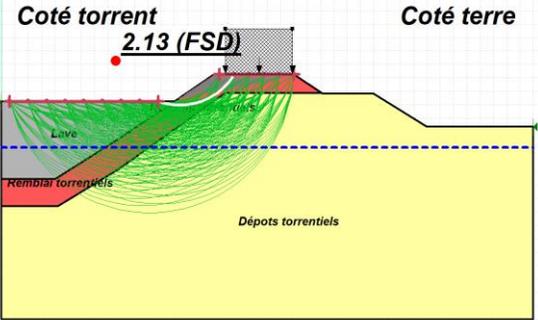
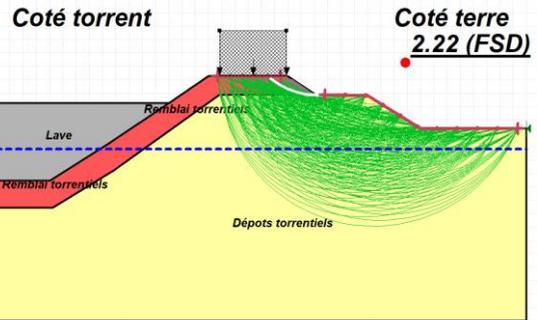
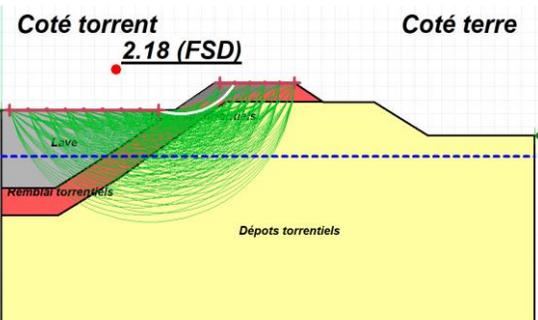
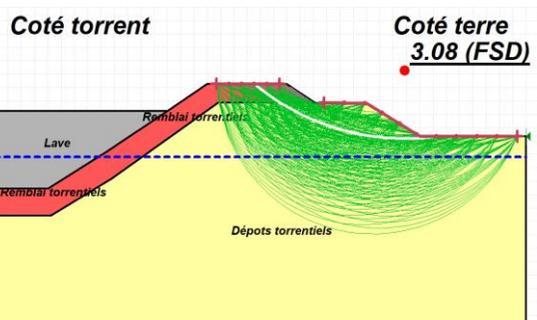
Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RG-TH13	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1	<p>Coté terre Coté torrent 6.33 (FSD)</p>	<p>Coté terre Coté torrent 4.02 (FSD)</p>
			<p>Coté terre Coté torrent 3.02 (FSD)</p>	<p>Coté terre Coté torrent 4.25 (FSD)</p>

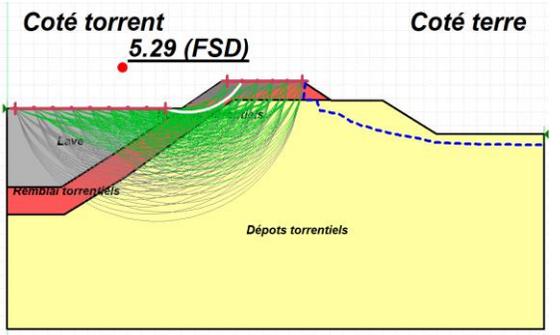
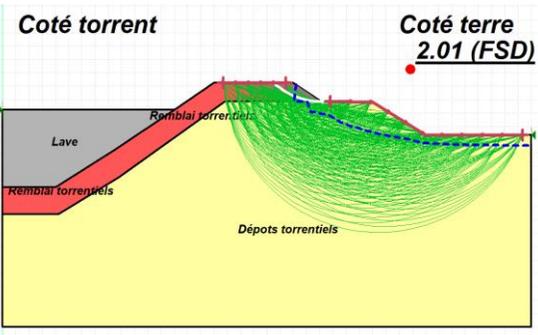
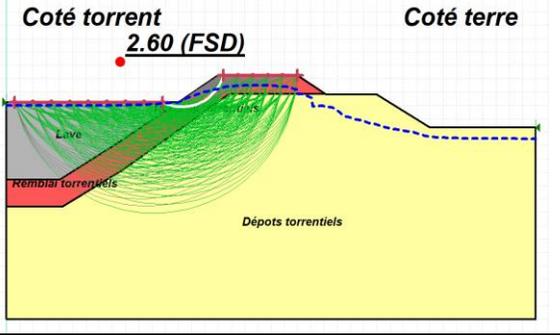
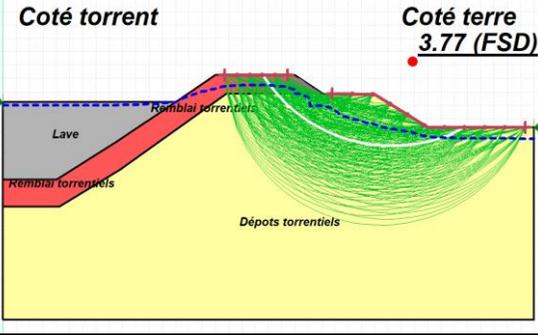
Profil RD-TH2

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
Pas de lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Normale d'exploitation FS cible : 1.2		
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Normale d'exploitation FS cible : 1.2		

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.120	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1	<p>Coté torrent</p> <p>1.33 (FSD)</p>  <p>Coté terre</p>	<p>Coté torrent</p> <p>3.08 (FSD)</p>  <p>Coté terre</p>
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Normale d'exploitation FS cible : 1.2	<p>Coté torrent</p> <p>2.26 (FSD)</p>  <p>Coté terre</p>	<p>Coté torrent</p> <p>1.84 (FSD)</p>  <p>Coté terre</p>

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Vidange rapide - H= -1m/crête de digue	Normale d'exploitation FS cible : 1.2		
Lave résiduelle	Débit d'étiage - H=0,2m	Extrême de crue FS cible : 1.1		

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Débit d'étiage - Surcharge de 10kPa en crête	Extrême de crue FS cible : 1.1		
	Débit d'étiage - Séisme av/g = +/- 0.06 et ah/g = 0.121	Accidentelle / Séisme FS cible : 1.1		

Situation torrentielle	Configuration testée	Situation et FS à vérifier	RD-TH2	
			FS coté torrent	FS coté terre
	Crue liquide - Pic de crue - H = -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		
	Crue liquide - Vidange rapide - H= -1m/crête de digue	Extrême de crue FS cible : 1.1		

Annexe 2 : Rapport géotechnique – Confluence 2016

CONSULTING

Safège Le Bourget du Lac
Rue Savoie Technolac Bat
73370 Le Bourget-du-Lac
Tel. : 04 79 20 42 30

www.suez.com/fr/consulting-conseil-et-ingenierie

