

CONSULTING

Etudes de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny

Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24-ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE





Document B



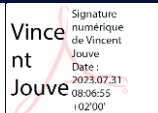
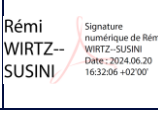


SAFEGE opérant sous la marque SUEZ Consulting (SIREN n° 542 021 829) « Ce document a été réalisé par du personnel de SAFEGE SAS (opérant sous la marque commerciale SUEZ Consulting) ; SAFEGE SAS est un organisme agréé en tant qu'intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, conformément à l'arrêté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

Numéro du Projet : 20CRA102

Intitulé du Projet : Etudes de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny

Intitulé du Document : DOCUMENT B - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne" Arve-RG-BONNE-26.24-ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

Contrôle données entrée	Réunion de démarrage	RACI Agrément	Check List (EDD)
			

Version	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
A	WIRTZ-SUSINI Rémi	 Rémi WIRTZ-- SUSINI <small>Signature numérique de Rémi WIRTZ--SUSINI Date: 2023.08.02 16:49:53 +02'00'</small>	PESTEL Arnaud	 A.PE STEL <small>Signature numérique de A.PESTEL Date: 2023.08.03 16:41:00 +02'00'</small>	JOUVE Vincent	 Vince nt Jouve <small>Signature numérique de Vincent Jouve Date: 2023.07.31 08:06:55 +02'00'</small>	31/07/2023	Version initiale
B	WIRTZ-SUSINI Rémi	 Rémi WIRTZ-- SUSINI <small>Signature numérique de Rémi WIRTZ--SUSINI Date: 2024.06.20 16:32:06 +02'00'</small>	VANDEKERCKHOVE Thibaut	 Thibaut Vandeker ckhove <small>Signature numérique de Thibaut Vandekerckhove Date: 2024.06.20 19:14:43 +02'00'</small>	BOUSSAA Farid	 Boussa a Farid <small>Signature numérique de Boussa Farid Date: 2024.06.21 10:32:51 +02'00'</small>	24/06/2024	Version reprise à la suite des remarques de la DREAL/POH d'octobre 2023

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.

Table des matières

Bibliographie.....	12
4..... Caractérisation des aléas naturels	16
4.1 Hydrologie, hydraulique et morphologie globale	16
4.1.1 Présentation du bassin versant	16
4.1.2 Les données hydrométriques	19
4.1.3 Apports du Giffre	21
4.1.4 Environnement hydro-morphologique	22
4.1.5 Environnement géologique et hydrogéologique	26
4.1.6 Environnement naturel	28
4.2 Analyse hydrologique locale	31
4.2.1 Régime hydrologique au droit de notre zone d'étude	31
4.2.2 Débits caractéristiques et hydrogrammes des crues	32
4.2.3 Les crues historiques.....	35
4.2.4 Influence aval	37
4.3 Analyse hydraulique.....	38
4.3.1 Le code de calculs Telemac-2D	38
4.3.2 Emprise du modèle.....	38
4.3.3 Modélisation des ponts et ouvrages.....	39
4.3.4 Le calage du modèle	39
4.3.5 Résultats de la modélisation	40
4.4 Risque sismique	47
4.4.1 Position des ouvrages vis-à-vis des séismes.....	47
4.4.2 Evolution de la réglementation	47
4.5 Mouvements de terrain.....	48
4.6 Les embâcles et leurs effets potentiels.....	48
4.7 Les évolutions morphologiques du lit de l'Arve et du Borne	49
4.8 Les laves torrentielles et leurs effets potentiels	55
5..... Description du système d'endiguement	56
5.1 Ouvrages existants.....	56
5.1.1 Identification et localisation des ouvrages.....	56
5.1.2 Caractéristiques des digues actuelles (avant travaux).....	57
5.1.3 Autres ouvrages	74
5.1.4 Description des sources d'agression.....	77
5.2 Description des ouvrages en phase avant-projet	78
5.2.1 Rappels de l'AVP structurel - 2018	78

5.2.2	Avant-projet optimisé – 2022.....	79
5.2.3	Phasage des travaux.....	102
5.3	Description fonctionnelle du système d'endiguement.....	104
6.....	Retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement.....	107
6.1	Présentation de la démarche.....	107
6.1.1	Obligations réglementaires.....	107
6.1.2	Méthodologie.....	107
6.2	Défaillances, accidents, incidents et évolutions lentes survenus sur les ouvrages.....	108
6.2.1	Crues historiques sur le système.....	108
6.2.2	Synthèse des observations – typologie des désordres (VTA).....	109
6.2.3	Autres évènements particuliers survenus sur le site.....	116
6.2.4	Retour d'expérience sur des ouvrages gérés par le SM3A.....	116
6.2.5	Exemples connus d'incidents et d'accidents survenus sur des ouvrages similaires.....	117
6.3	Scénarios de défaillance probables.....	122
6.3.1	Analyse accidentologique.....	123
6.3.2	Synthèse sur les scénarios de défaillance probables.....	126
7.....	Diagnostic approfondi des éléments constitutifs du système d'endiguement et tenue des ouvrages.....	128
7.1	Diagnostic approfondi sur les digues rive droite du Borne.....	128
7.1.1	Niveau de protection.....	129
7.1.2	Niveau de danger.....	129
7.2	Diagnostic et reconnaissances sur les digues de l'Arve (EDD CNR de 2019)	130
7.2.1	Reconnaissances géophysiques.....	130
7.2.2	Evaluation de la stabilité des digues existantes (Arve rive gauche).....	133
7.3	Mission G2 – Avant-Projet de confortement des digues de l'Arve rive gauche	134
7.3.1	Reconnaissances géotechniques de 2021.....	134
7.3.2	Prédimensionnement et étude de stabilité des digues en remblais.....	138
7.3.3	Stabilité des berges et dimensionnement des enrochements.....	141
7.3.4	Prédimensionnement des solutions de soutènement.....	142
7.3.5	Prise en compte des aspects hydrogéologiques.....	145
7.3.6	Recommandations concernant l'érosion interne.....	146
7.4	Arve RG (Avant-projet de confortement) – vérification de la tenue des ouvrages.....	147
7.4.1	Principes généraux.....	148
7.4.2	Objectif de protection.....	150
7.4.3	Méthode de vérification de la tenue des ouvrages.....	150

7.4.4	Caractérisation des probabilités de rupture des digues	153
7.5	Conclusions	200
7.6	Moyens mis en œuvre pour assurer l'entretien, la surveillance et les réparations courantes des ouvrages	200

8..... ÉTUDE DES RISQUES DE VENUES D'EAU DANS ET EN DEHORS DE LA ZONE PROTÉGÉE 201

8.1	Généralités	201
8.1.1	Les scénarios découlant de l'analyse des modes de défaillance	201
8.1.2	Cartographie des venues d'eau	202
8.2	Scénario 1 : Fonctionnement nominal.....	202
8.3	Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle	206
8.4	Scénario 3 : Défaillance structurelle.....	210

9..... Présentation et analyse de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour l'exercice de ses missions 218

9.1	Organisation du gestionnaire	218
9.1.1	Pôles et services chargés de la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement.....	218
9.1.2	Organisation des missions de surveillance générale	219
9.1.3	Organisation des interventions programmées	220
9.1.4	Organisation lors d'un désordre détecté sur ouvrage	221
9.1.5	Entreprises et prestataires sous contrat.....	221
9.2	Consignes de surveillance et d'exploitation des ouvrages hors période de crise 222	
9.2.1	Consignes générales de surveillance.....	222
9.2.2	Consignes d'exploitation des ouvrages.....	223
9.3	Procédure d'information et de communication	227
9.3.1	Chaine de responsabilité	227
9.3.2	Liens avec certains acteurs spécifiques de la gestion de crise	228
9.3.3	Organisation en cas de crise.....	228
9.4	Moyens d'information sur les crues ou les épisodes météorologiques à risque.....	228
9.4.1	Les limites techniques	228
9.4.2	Dispositifs de veille opérés par les services de l'Etat.....	232
9.4.3	Stations hydrométriques.....	238
9.4.4	Astreinte	239
9.5	Consignes de surveillance des ouvrages en période de crise	240
9.5.1	Chaine de responsabilité et rôle des acteurs en gestion de crise.....	240

9.5.2	Détails et processus de décision du dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise	241
9.5.3	Visites post-crue	245
9.5.4	Interventions post-crue	247
9.6	Analyse des PCS.....	247
9.7	Adéquation des moyens mis en place pour la surveillance et l'entretien courant avec l'objectif de protection garanti	248
9.7.1	Entretien, surveillance et exploitation	248
9.7.2	Veille et information	249
9.7.3	Alerte et mise en sécurité	249
9.8	Barrières de sécurités	249
9.8.1	Définition des barrières de sécurité	249
9.8.2	Respect des barrières de sécurités identifiées	250
9.....	BIS. Recommandation de l'organisme agréé qui réalise l'étude de dangers	251
9.1.1	Pendant les travaux : Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau	251
9.1.2	Après travaux : Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau	252
9.1.3	Surveillance vis-à-vis du séisme	254
9.1.4	Gestion des ouvrages	256
9.1.5	Arrêté ministériel du 8 août 2022 et analyse de l'organisation du gestionnaire	256
9.1.6	Conclusion	256
10...	Cartographies.....	258
10.1	Limites administratives.....	258
10.1.1	Limites administratives relevant du SM3A et zone protégée du système d'endiguement.....	258
10.1.2	Cartographie des venues d'eau	261
10.2	Scénario 1 : Fonctionnement nominal.....	261
10.3	Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle	265
10.4	Scénario 3 : Défaillance structurelle.....	269
Annexe 1	: Analyse des Enjeux	277
Annexe 2	: AVP ARVE	278
Annexe 3	: Cartographies	279
Annexe 4	: EDD CNR 2019	280
Annexe 5	: DIAGNOSTIC RESEAUX TRAVERSANTS	281
Annexe 6	: VISITE TECHNIQUE APPROFONDIE	282

Table des illustrations

Figure 1 : Bassin versant de l'Arve avec ces principaux affluents (source : étude ISL)	17
Figure 2 : Bassin versant du Borne (source : étude EDF). Découpage en deux sous bassins versants	19
Figure 3 : Stations de références au sein du réseau hydrométrique du SPC Alpes du nord	20
Figure 4 : Extrait des cartes géologiques d'Annemasse et d'Annecy-Bonneville au 1/50000 du BRGM.....	27
Figure 5 : Schéma en coupe de la géologie du site	27
Figure 6 : Débit moyen mensuel de l'Arve à Sallanches – Période 1965 – 2018 – Source banque HYDRO	31
Figure 7 : Débit moyen mensuel du Borne à Saint-Jean-de-Sixt – Période 1964 – 2018 – Source banque HYDRO.....	32
Figure 8 : Hydrogrammes de crues relatifs à la crue centennale de l'Arve	34
Figure 9 : Hydrogrammes de crues relatifs à la crue centennale du Borne	35
Figure 10 : Construction de la courbe de tarage à l'aval du modèle	38
Figure 11 : Périmètre du modèle hydraulique (rose).....	39
Figure 12 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - état actuel	42
Figure 13 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - digues rive droite et rive gauche en état actuel et lignes d'eau ...	42
Figure 14 : Profil en long Borne (Source : CNR) – calage des digues projetées	43
Figure 15 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel	44
Figure 16 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel.....	45
Figure 17 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue)	46
Figure 18 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source www.haute-savoie.gouv.fr	47
Figure 19 : Profil en Long - Evolution morphologique - Prison de Bonneville – Source Hydratech – Juillet 2013	50
Figure 20 : Profil en Long - Evolution morphologique – Aval Bonze – Source Hydratech – Juillet 2013.....	51
Figure 21 : Profil en long du Borne à hauteur de la zone d'étude – SOGREAH 1998	52
Figure 22 : Photographie de la confluence Borne/Arve - CNR.....	53
Figure 23 : Évolution des niveaux sur le cône de déjection Borne – ETRM	54
Figure 24 : Carte de localisation des tronçons du système d'endiguement de Bonneville Entre Arve et Borne – état actuel	56
Figure 25 : Bordets 2 - T02 Merlon : Profil historique - Acthys Diffusion / Photo du profil de digue vue vers l'aval (CNR)	58
Figure 26 : Les Bordets T02 : Profil historique - Acthys Diffusion	59
Figure 27 : Les Bordets T02 : Profil de digue très végétalisé en crête comme en talus amont (CNR).....	59
Figure 28 : Localisation des différentes formes de digues secteur BORDET - T01	60
Figure 29 : Les Bordets T01 : Profil historique - Acthys Diffusion	60
Figure 30 : Les Bordets T01 : Vu depuis la rive droite, zone de SOCOPA – CNR	61
Figure 31 : Les Places T02 : Profil historique - Acthys Diffusion / Profil de digue – CNR	62
Figure 32 : Les Places T01 : Profils historiques - Acthys Diffusion	63
Figure 33 : Les Places T01 : Profil de digue aval / amont – CNR	63
Figure 34 : Localisation des différentes formes de digues secteur BOIS JOLIVET A.....	64
Figure 35 : Bois Jolivet A : Vue en crête du profil de digue – CNR	65
Figure 36 : Bois Jolivet A : Profils historiques - Acthys Diffusion	65
Figure 37 : Merlon Prison : Profil historique - Acthys Diffusion / Vue du talus amont depuis la rive opposée - CNR	66
Figure 38 : Bois Jolivet B : Profil de digue – CNR.....	66
Figure 39 : Bois Jolivet B : Profils historiques - Acthys Diffusion	67
Figure 40 : Localisation des différentes formes de digues secteur QUEUE DU BORNE.....	68
Figure 41 : Queue du Borne : Profils historiques - Acthys Diffusion / Profil de digue – CNR.....	68
Figure 42 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - état actuel	71
Figure 43 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - digues rive droite et rive gauche en état actuel et lignes d'eau ...	71
Figure 44 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel	72
Figure 45 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel.....	73

Figure 46 : Seuil aval au pont de l'Europe, vue vers l'amont - CNR.....	75
Figure 47 : Réseaux traversants sur les digues de l'Arve	76
Figure 48 – profil en long - définition des crêtes de digue.....	78
Figure 49 : Profil type de l'AVP structurel de 2018.	79
Figure 50 - Vues en plan de la sectorisation des digues en tronçons homogènes (rive gauche et rive droite de l'Arve) 82	
Figure 51 : Profil type RG-T1	83
Figure 52 : Profil type RG-T2	84
Figure 53 : Profil type RG - T3	85
Figure 54 : Profil type RG-T5	87
Figure 55 : Profil type RG-T7	88
Figure 56 : Profil type RG-T8	89
Figure 57 : Profil type RG-T9	90
Figure 58 : Profil type RG-T10 au droit de la maison.....	91
Figure 59 : Profil type RG-T11	93
Figure 60 : Profil type RG-T12	94
Figure 61 : Profil type RG-T15	95
Figure 62 : Profil type RG-T16	96
Figure 63 : Profil type RG-T18	98
Figure 64 : Profil type RG-T19	99
Figure 65 : Etanchéité au droit des pistes d'exploitation.	100
Figure 66 : Voies d'accès au système d'endiguement – digues de l'Arve rive gauche	101
Figure 67 : Voies d'accès au système d'endiguement – digues du Borne rive droite	101
Figure 68 - Phasage des travaux	102
Figure 69 : Planning prévisionnel des travaux	103
Figure 70 - Niveau de référence de l'état actuel (source : EDD Bonneville Ayze, CNR, 2019).....	103
Figure 71 : Venues d'eau pour une crue de temps de retour 100 ans, à la suite d'une brèche en état de travaux (phase 1 et 2 réalisées)	105
Figure 72 : Cartographie des venues d'eau en Q100 Arve à l'état final	106
Figure 73 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude - Source S.M.3.A.	108
Figure 74 : Localisation des endiguements concernés par la VTA de 2020 sur les digues du Borne	110
Figure 75 : Localisation des linéaires de digue de l'Arve concernés par la VTA.....	113
Figure 76 : Merlon de la maison d'arrêt en rive gauche de l'Arve : érosion en pied / affaissement.....	115
Figure 77 : Meylan, Ile d'Amour et Isère amont, courbe de Charlet (photos : AD Isère).....	119
Figure 78 : Rupture de la digue en rive gauche.....	121
Figure 79 : Début de renard hydraulique RG en amont de la brèche	122
Figure 80 : Schéma de principe d'une rupture par surverse	123
Figure 81 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe.....	124
Figure 82 : Schéma de principe d'une rupture par effet de renard hydraulique	124
Figure 83 : Schéma de principe de rupture d'ensemble.....	125
Figure 84 - Localisation des campagnes de reconnaissances géophysiques	130
Figure 85 - Définition schématique des paramètres de prédimensionnement des murs de soutènement	143
Figure 86 : Emprise de la paroi berlinoise (sur environ 20 ml)	144
Figure 87 - dispositions constructives au droit des pistes d'exploitation.....	147
Figure 88 - Ouvrages concernés par l'étude - Arve RG	148
Figure 89 - Arbre type de probabilité	151
Figure 90 - vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [5])	153
Figure 91 - Recommandation de vérification de la sécurité structurale de la digue à la liquéfaction (recommandation du MEDDE, 2014 [5]).....	153
Figure 92 - accélération maximale de référence au niveau du sol en fonction de la zone de sismicité (Source : Recommandation du MEDDE, 2014 [5]).....	154
Figure 93 - paramètre de sol en fonction de la classe de sol (Source : Recommandation du MEDDE, 2014 [5])	154
Figure 94 - Modes de rupture considérés.....	155
Figure 95 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par surverse	156
Figure 96 - Vitesse d'écoulement sur le talus d'une digue en surverse - Cerema [7]	157
Figure 97 - valeurs limites de dimensionnement de la résistance à l'érosion pour des mesures anti-érosions sélectionnées (source : Hewlett et al. – 1987 [8])	158

Figure 98 - mécanisme d'érosion par surverse en fonction des matériaux de la digue	159
Figure 99 - Largeur en crête et probabilité conditionnelle associée	160
Figure 100 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - digues rive droite et rive gauche en état actuel et lignes d'eau	161
Figure 101 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel.....	161
Figure 102 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel.....	162
Figure 103 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue)	163
Figure 104 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai)	165
Figure 105 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (mur faisant office de digue)	165
Figure 106 - Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source: CFBR, 2015 [9])	166
Figure 107 - schéma du phénomène de suffusion.....	175
Figure 108 - Schéma du phénomène d'érosion de contact.....	176
Figure 109 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit.....	177
Figure 110 - Synthèse des facteurs aggravants vis à vis de l'érosion de conduit.....	181
Figure 111 - Probabilités de défaillance par érosion de conduit des tronçons.....	183
Figure 112 - Schéma du phénomène d'érosion régressive.....	184
Figure 113 - Rose des vents à Bonneville (Source : Meteoblue)	185
Figure 114 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe	186
Figure 115 - Valeurs de résistance à la contrainte d'arrachement de différents matériaux et techniques en cours d'eau (Source : B. Lachat)	187
Figure 116 – Contraintes tractrices limites en fonction du matériau- Guide Génie'Alp 2013	187
Figure 117 - Synthèse des facteurs aggravant vis-à-vis de l'érosion externe.....	194
Figure 118 - Probabilités de défaillance par érosion externe des tronçons	195
Figure 119 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1	203
Figure 120 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1	204
Figure 121 : Cartographie des venus d'eau du scénario 1.....	205
Figure 122 : Localisation du clapet anti-retour du réseau « bois Jolivet » - en jaune	206
Figure 123 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2	207
Figure 124 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2	208
Figure 125 : Cartographie des venus d'eau du scénario 2.....	209
Figure 126 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle (en situation projet)	211
Figure 127 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 1h après la rupture.....	212
Figure 128 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 2h après la rupture.....	213
Figure 129 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 3h après la rupture.....	214
Figure 130 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3	215
Figure 131 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3	216
Figure 132 : Cartographie des venus d'eau du scénario 3.....	217
Figure 133 : Station de référence par tronçon de l'Arve.....	237
Figure 134 : Dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise	242
Figure 135 : Consignes de sécurité en cas de débordements	248
Figure 136 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection.....	253
Figure 137 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source www.haute-savoie.gouv.fr	255
Figure 138 : Limites administratives du territoire relevant du SM3A	259
Figure 139 : Zone protégée par le système d'endiguement « Bonneville entre Arve et Borne »	260
Figure 140 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1	262
Figure 141 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1	263
Figure 142 : Cartographie des venus d'eau du scénario 1.....	264
Figure 143 : Localisation du clapet anti-retour du réseau « bois Jolivet » - en jaune	265
Figure 144 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2	266
Figure 145 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2	267
Figure 146 : Cartographie des venus d'eau du scénario 2.....	268
Figure 147 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle (en situation projet)	270
Figure 148 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 1h après la rupture.....	271
Figure 149 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 2h après la rupture.....	272

Figure 150 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 3h après la rupture.....273
 Figure 151 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3274
 Figure 152 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3275
 Figure 153 : Cartographie des venus d'eau du scénario 3.....276

Liste des tableaux

Tableau 1 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO 20
 Tableau 2 : Débits de pointe pour des crues du Giffre..... 21
 Tableau 3 : faune à enjeux écologiques moyen et fort..... 31
 Tableau 4 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze pour les crues de l'Arve – source : CNR 33
 Tableau 5 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze pour les crues du Borne – source : CNR 33
 Tableau 6 : Description des crues historiques – source étude historique réalisée par Acthys Diffusion [2] 37
 Tableau 7 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve..... 48
 Tableau 8 : Ponts présents sur la zone d'étude – Borne 48
 Tableau 9 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants 69
 Tableau 10 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants (bis) 69
 Tableau 11 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve..... 74
 Tableau 12 : Ponts présents sur la zone d'étude – Borne..... 74
 Tableau 13 : Liste des seuils dans le lit de l'Arve et du Borne sur la zone d'étude..... 75
 Tableau 14 : Caractéristiques des buses 76
 Tableau 15 - Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu dans l'AVP optimisé au droit de chaque secteur 82
 Tableau 16 : Débits estimés et mesurés durant différentes crues de l'Arve et/ou du Borne dans le secteur de l'endiguement..... 108
 Tableau 17 : Hiérarchisation de l'état de fragilité des endiguements du Borne 112
 Tableau 18 : Hiérarchisation de l'état de fragilité des endiguements de l'Arve (rive gauche et rive droite) 116
 Tableau 19 : Identification des Situations dangereuses et Potentiels de danger pouvant intervenir sur une digue de protection contre les inondations (source : CNR, 2019)..... 127
 Tableau 20 - Estimation du niveau de protection de chacun des tronçons (Source : EDD ARVE-RG-BONNE-26.24-ARVE-RIVE-GAUCHE-ET-BORNE-RIVE-DROITE) 129
 Tableau 21 - Estimation du niveau de danger de chacun des tronçons (Source : EDD ARVE-RG-BONNE-26.24-ARVE-RIVE-GAUCHE-ET-BORNE-RIVE-DROITE) 129
 Tableau 22 : Synthèse extraite de l'EDD de 2019 avec Arve en état actuel (CNR)..... 133
 Tableau 23 - Liste des Essais in-situ réalisés en Arve Rive gauche - campagne de reconnaissance 2021..... 135
 Tableau 24 - Résultats des essais pressiométriques..... 136
 Tableau 25 - Résultats des essais de perméabilité in-situ 137
 Tableau 26 - Caractéristiques mécaniques obtenues sur les sols testés sur les boîtes de cisaillement 138
 Tableau 27 - Coefficients partiels et de modèle à l'ELU stabilité d'ensemble au glissement 139
 Tableau 28 - Caractéristiques géométriques des digues/berges de la rive gauche..... 140
 Tableau 29 - Synthèse des calculs de stabilité au glissement des talus côté Arve et aval 141
 Tableau 30 - Dimensionnement des enrochements de protection et des épis pour les différents tronçons de l'Arve ... 142
 Tableau 31 - Synthèse du prédimensionnement des murs de soutènement sur les tronçons concernés..... 143
 Tableau 32 - Calcul des temps de percolation pour les profils considérés en fonction des coefficients de perméabilité retenus..... 145
 Tableau 33 - Temps de crue/décru pour les profils considérés déterminés à partir des limnigramme de crue 146
 Tableau 34 : Objectifs de protection du système d'endiguement 150
 Tableau 35 : Probabilité conditionnelle proposée par Vick (2002) 152
 Tableau 36 - grille de probabilités conditionnelles pour la progression de l'érosion par surverse jusqu'à la rupture 160
 Tableau 37 - Probabilité de rupture à la surverse 164
 Tableau 38 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après le CFBR (pour $F_s > 1,10$) 167
 Tableau 39 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après Vick (Pour $F_s < 1,10$) 167
 Tableau 40 - probabilités conditionnelles pour l'instabilité des talus au glissement 168
 Tableau 41 - Probabilités conditionnelles pour la propagation du glissement jusqu'à la rupture 168
 Tableau 42 - Synthèse de l'analyse à l'érosion interne de l'EDD CNR 2019 176

Tableau 43 - Grille de probabilité pour l'initiation de l'érosion externe.....	189
Tableau 44 - Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale Q_{100}	196
Tableau 45 : Niveaux de danger et de protection du système d'endiguement	200
Tableau 46 : Technique de confortement de digue après dessouchage	226
Tableau 47 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO	239
Tableau 48 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés pendant les travaux (digue de l'Arve rive gauche).....	251
Tableau 49 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés après les travaux (digue de l'Arve rive gauche)	253
Tableau 50 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés après les travaux (digue du Borne rive droite).....	253

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SOGREAH pour S.M.3.A., *Etude des transports solides sur l'Arve*, Réf. 550490, Avril 2000.
- [2] SOGREAH Ingénierie Conseils pour Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Borne (S.M.3.A.) et D.D.A.F. de Haute Savoie, *Etude Générale d'Aménagement Hydraulique du Borne*, Septembre 1989.
- [3] SOGREAH LEDOUX CONSULTANTS pour S.M.3.A., *Plan de Gestion des Matériaux solides de l'Arve*, Réf. 2814036, Janvier 2004.
- [4] Hydratech pour S.M.3.A., *Analyse des évolutions topographiques du lit de l'Arve*, Ref 0163102, Juillet 2013..
- [5] HYDROGÉOTECHNIQUE pour SM3A, *RAPPORT D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE, Mission G1 (ES)*, Réf. : C.17.52067, Septembre 2017.
- [6] Acthys Diffusion pour SM3A, *Etude pour la restauration des systèmes d'endiguement de l'Arve et du Borne, Etude historique, Rapport principal et Fiches d'information historiques (FIH) par système d'endiguement*, Réf. : V1, Juillet 2017.
- [7] P.P.R. *Inondation de l'Arve, Commune de Bonneville, prescrit par l'arrêté préfectoral D.D.A.F. – R.T.M. 99/19 DU 25 Juin 1999..*
- [8] *Circulaire du 16 avril 2010 relative aux études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales.*
- [9] *Arrêté du 30 septembre 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.*
- [10] Degrees of Belief : Subjective Probability and Engineering Judgment – Steven G. Vick – 2002.
- [11] Reagan, R. T., Mosteller, F., & Youtz, C. (1989). Quantitative meanings of verbal probability expressions. *Journal of Applied Psychology*, 74(3), 433–442. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.74.3.433>.
- [12] *Risque sismique et sécurité des ouvrages hydraulique - MEDDE-DGPR, Octobre 2014.*
- [13] *The International Levee Handbook. CIRIA. (2013).*
- [14] *guide international sur les digues - CEREMA - 2019.*
- [15] H. Hewlett, L. Boorman, and M. Bramley. *Guide to the design of reinforced grass waterways Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), London, the United Kingdom, 1987.*
- [16] *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai - CFBR, Octobre 2015.*
- [17] Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement.
- [18] *arrêté N°12-007 du préfet coordinateur du bassin Rhône-Méditerranée en date du 10 Janvier 2012 reconnaissant le bassin versant de l'Arve comme périmètre d'intervention du Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents (SM3A).*

- [19] LOI n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République (1).
- [20] SM3A, Convention cadre de mutualisation de moyens et de gestion des systèmes d'endiguement de l'Etat, C18-008, 19 janvier 2017..
- [21] 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.
- [22] LOI n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles.
- [23] LOI n° 2017-1838 du 30 décembre 2017 relative à l'exercice des compétences des collectivités territoriales dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (1).
- [24] LOI n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles.
- [25] SOGREAH pour S.M.3.A., Etude Hydrologique, 1991.
- [26] EGIS eau pour S.M.3.A., Etude d'inondabilité de la vallée de l'Arve, Rapport Partie 1 : diagnostic de l'inondabilité de la vallée de l'Arve, Ref GRI 04605X , Mai 2012.
- [27] EGIS eau pour S.M.3.A., Etude d'inondabilité de la vallée de l'Arve, Rapport Partie 2 : étude de faisabilité pour l'optimisation de la participation des champs d'expansion à l'écrêtement des crues de l'Arve, Ref GRI 04605X, Mai 2012.
- [28] ARTELIA ASCONITE pour S.M.3.A., Définition d'une stratégie relative à l'hydromorphologie pour le SAGE du bassin versant de l'Arve, Etat des lieux / Diagnostic, 2014.
- [29] ARTELIA pour S.M.3.A, Inventaires et Diagnostic des ouvrages de protection hydraulique sur l'Arve, Diagnostic initial des ouvrages, Diagnostic des ouvrages, Ref 4 12 1713 R7 INDB, secteur ARVE-RD-MAGLA-49.37, Juin 2014.
- [30] ISL pour S.M.3.A, ETUDE DE FAISABILITE POUR L'OPTIMISATION DES AMENAGEMENTS DE PROTECTION DES CRUES DE LA MOYENNE ET BASSE VALLEE DE L'ARVE, Analyse de l'hydrologie globale du bassin versant (A2), 15F-145-RL-2 INDB, 08/06/2016.
- [31] CNR pour SM3A, Dossier d'ouvrage, Système d'endiguement Bonneville entre Arve et Borne commune de Bonneville, Réf. DIGP-AH 2018-326-01, Mars 2018.
- [32] SAGE Ingénierie pour DDT74, Diagnostic géotechnique des digues de l'ARVE sur les Communes de BONNEVILLE et SALLANCHES MARCHE N°09086, Le Bouchet T01, Bois Jolivet A, Trésor Public T02 Les Révées, Réf : RP. 4612, Septembre 2010.
- [33] CNR pour SM3A, Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St Pierre en Faucigny, Secteur de Bonneville – Dossier d'ouvrage, Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne", Mai 2018.
- [34] CNR pour SM3A, Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St Pierre en Faucigny, Secteur de Bonneville – Dossier d'ouvrage, Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne", Mai 2018.
- [35] Mosaïque environnement pour SM3A - Diagnostic environnemental Aménagement des digues de l'Arve et du Borne aval – Rapport Provisoire – Avril 2018.
- [36] SOGREAH pour SM3A, ETUDE GENERALE D'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE DU BORNE, Novembre 1998.

- [37] *Arbeausolutions pour SM3A, SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC DE LA VÉGÉTATION IMPLANTÉE SUR 3 DES SYSTÈMES D'ENDIGUEMENTS DU SM3A, Version 1 du 13/07/2017.*
- [38] *SM3A, Consignes générales de surveillance et d'exploitation. Ouvrages classés en systèmes d'endiguement, 30 novembre 2015..*
- [39] «Document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM) – Commune de Bonneville - en cours d'élaboration».
- [40] «SAFEGE pour DTT74, DIAGNOSTICS GÉOTECHNIQUES DE DIGUES DU DOMAINE PUBLIC FLUVIAL DE L'ARVE, Bordets T01 et T02 et Lisière du Clos, Réf : RP. 10CCY040, Avril 2011.».
- [41] «Plan communal de sauvegarde – Commune de Saint Pierre en Faucigny – 10/10/2014».
- [42] «Plan communal de sauvegarde – Commune de Bonneville – 13/04/2016».
- [43] «Géotechnique Rhône Alpes pour SM3A, RAPPORT D'ETUDE MISSION GEOTECHNIQUE G1 ES ETUDE GEOTECHNIQUE DE LA DIGUE DU QUAI JEAN BAPTISTE REY, Réf. : Dossier 2014-07-4, Juillet 2014.».
- [44] «GEOS INGENIEURS CONSEILS SA pour SM3A, CONTRE SEUIL DU PONT DE L'EUROPE BONNEVILLE, SONDAGES GEOTECHNIQUES, pied de digue de Bois Jolivet, Réf. : GEOS 5415a.RI, Avril 2003.».
- [45] «ETRM et TERE0 pour S.M.3.A., Plan de gestion des matériaux solides du Borne et de ses affluents, Novembre 2018».
- [46] «Document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM) – Commune de Saint Pierre en Faucigny - approuvé en 2017».
- [47] «Analyse critique de l'hydrologie de l'Arve – Elaboration du cahier des charges de l'étude sur les champs d'expansion des crues de l'Arve - Ecole Centrale de Lyon, Rapport de stage de CECCATO Adeline pour le S.M.3.A. , Aout 2007».
- [48] «VTA Notice générale référencée DIGP 2017-087-01 et fiches synthèses de Mai 2017, CNR/Arbeausolutions».
- [49] «Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Comité Français des Barrages et Réservoirs. DRAFT Juin 2010».
- [50] «RAPPORT D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE, Mission G1 (ES), Réf. : C.17.52067, Septembre 2017,» HYDROGÉOTECHNIQUE pour SM3A.
- [51] «MALLET T., DEGOUTTE G., ROYET P., Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales : définitions, conséquences et responsabilités, Colloque sur les Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence,».
- [52] «ARTELIA pour SM3A INVENTAIRES ET DIAGNOSTICS DES OUVRAGES DE PROTECTION HYDRAULIQUE SUR L'ARVE RAPPORT DE PHASE 2 : Recueil et analyse des données Digues de Corbière, Bouchet, Bois Jolivet A, Jean Baptiste Rey (Crotte), Merlon Prison, Place T01 et T02, B,» ARTELIA pour SM3A.
- [53] «IMG pour SM3A ÉTUDE DE DANGERS SUR LES DIGUES DE BONNEVILLE, AYZE, ET SAINT-PIERRE-EN FAUCIGNY RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES, digues Vorziers, Bois Jolivet A et B, Queue du Borne, Merlon Prison, Place T01 et T02, les Bordets 2 et Merlon des Bordets ; les B».

- [54] [En ligne]. Available: <http://www.haute-savoie.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-protection-de-la-population/Protection-civile/Risques-majeurs/Dossier-departemental-des-risques-majeurs>.
- [55] [En ligne]. Available: <http://www.franceseisme.fr/donnees/intensites/carte.php>.
- [56] [En ligne]. Available: <http://www.legifrance.gouv.fr>.
- [57] «Etude de dangers sur les digues de Bonneville, Ayze et Saint-Pierre en Faucigny – Reconnaissances géotechniques – Rapport d'étude géotechnique Mission G1 (ES) – 2017 – HYDROGÉOTECHNIQUE».
- [58] «Etude des crues extrêmes du Borne à Saint-Pierre-en-Faucigny (149 km²) par la méthode SCHADEX pour SM3A, EDF, indice A, H-44200966-2020-000007, 14/01/2020».
- [59] «Etude de dangers des digues de la confluence Arve Borne, VTA de mars 2017, Notice générale et Annexes, Réf. : DIGP 2017-087, Juillet 2017.» CNR pour SM3A.
- [60] «Estimation de l'aléa crue de l'Arve à Bonneville (1353 km²), à la station EDF/DTG du Pont Neuf à Arthaz/Reignier (1635 km²) et au Pont d'Etrembières (1875 km²) par la méthode SCHADEX pour SM3A, EDF, indice A, H-44200966-2020-000284, 07/10/2020».
- [63] «DEROO L. FRY J.-J. Projet national ERINOH Thème H Erosion interne – Approches et besoins en matière d'ingénierie, Juillet 2014.».
- [64] «Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville – Etude d'Avant-Projet – Annexe 1 – Définition des profils type de confortement, Groupement Suez Consulting/CNR/Biotec, Mai 2021.».
- [65] «Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville. Tronçon Pont Royal RD1203 – Confluence Arve/Borne (PM0 à 1380 sur le Borne). Mission d'ingénierie géotechnique G2 – stade AVP). CNR/Safege. Mai 2021.».
- [66] «CNR pour SM3A, Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St Pierre en Faucigny: Avant-Projet de confortement, Juin 2018.».
- [67] «CNR pour SM3A, Etude Hydraulique de reprise de modèle de l'Arve - 2021».
- [68] «CIGB ICOLD, Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundation, Bulletin 1xx, Internal erosion processes and engineering assessment, 22 January 2013.».
- [69] «BEGUIN R., Étude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre, Thèse, 2011».
- [70] «Avant-Projet de confortement référencé DIGP 2018-625-02 de Décembre 2018, CNR».
- [71] «Acthys Diffusion pour SM3A, Etude pour la restauration des systèmes d'endiguement de l'Arve et du Borne, Etude historique, Rapport principal et Fiches d'information historiques (FIH) par système d'endiguement, Réf. : V1, Juillet 2017.».
- [72] «VTA Notice générale référencée DIGP 2020-633-00 et fiches synthèses d'Octobre 2020, CNR/Safege».
- [73] SAGE Ingénierie pour DTT74, Diagnostic géotechnique des digues de l'ARVE sur les Communes de BONNEVILLE et SALLANCHES MARCHE N°09086, Le Bouchet T01, Bois Jolivet A, Trésor Public T02 Les Révées, Réf : RP. 4612, Septembre 2010..
- [74] Etude de dangers - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne" - CNR, Juillet 2019.

4. CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS

Les systèmes d'endiguements s'inscrivent 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 Hydrologie, hydraulique et morphologie globale

4.1.1 Présentation du bassin versant

4.1.1.1 Bassin versant de l'Arve

Référence : Dossier préliminaire d'établissement du SAGE Arve

Le bassin versant de l'Arve s'étend sur **2078 km²** (dont 102 km² sur le territoire Suisse). Son altitude varie entre 330 m sur la commune de Chevrier et 4810 m au sommet du Mont-Blanc. 60% du bassin versant se situe à une altitude supérieure à 1000 m et 20% à plus de 2000 m d'altitude.

Les quantités de précipitations mesurées sur le bassin sont élevées, marquées par l'importance des précipitations neigeuses. Les températures sont variées mais restent globalement faibles. Ces données climatiques sont néanmoins susceptibles d'être modifiées plus qu'ailleurs par le dérèglement climatique. Les mesures de températures effectuées sur les Alpes du Nord depuis un siècle indiquent en effet un réchauffement deux fois supérieur aux moyennes mondiales.

L'Arve prend ses sources dans le Massif du Mont-Blanc, au sein du col de Balme, près d'Argentière. Il chemine sur une distance de 107,8 km pour rejoindre le Rhône, dont il est le premier affluent. Son embouchure est située 1 km en aval du lac Léman, au lieu-dit de La Jonction, proche de Genève. L'Arve arrose au total 31 communes, 26 en France et 5 en Suisse. Son bassin versant s'étend sur 2 078 km² (dont 102 km² sur le territoire Suisse). Son réseau hydrographique compte 1700 km de cours d'eau dont 80 km en territoire helvétique. 437 torrents et rivières sont structurés autour des principales vallées que sont l'Arve, le Giffre, le Borne, la Menoge et le Foron du Chablais Genevois.

La figure ci-dessous est une cartographie du bassin versant de l'Arve :

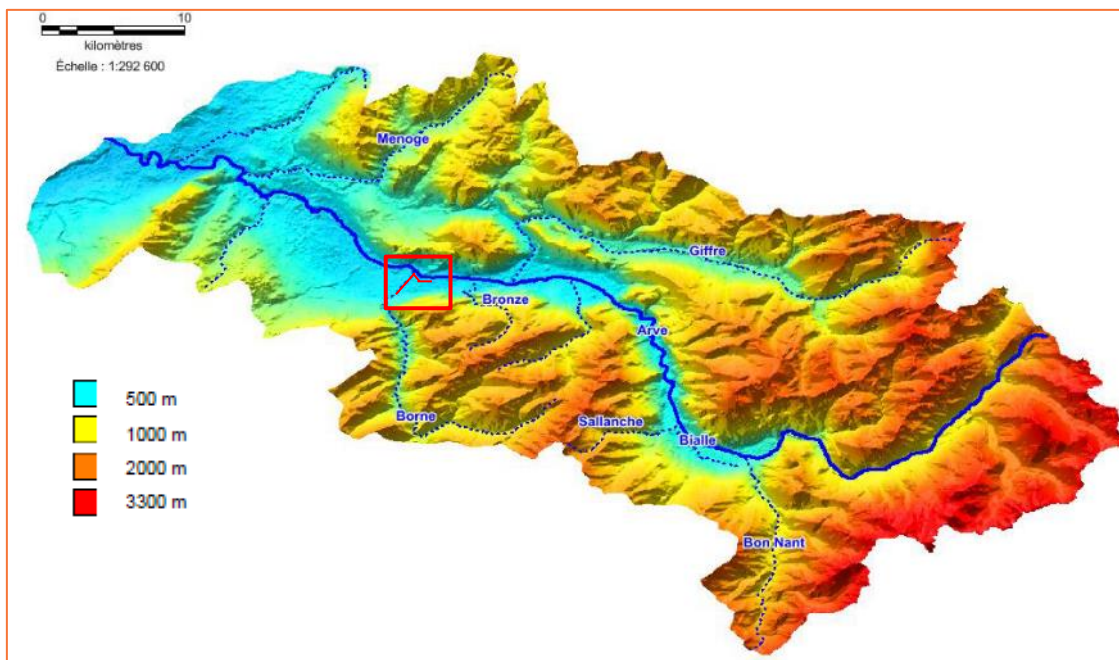


Figure 1 : Bassin versant de l'Arve avec ces principaux affluents (source : étude ISL)

On distingue trois grandes régions naturelles sur le périmètre d'étude :

- L'Avant-Pays, d'une altitude moyenne, composé de chaînons calcaires et de plateaux molassiques ou morainiques : Salève, plaine de Saint-Julien, Bas-Faucigny, Bas-Chablais,
- Les Préalpes calcaires découpées en deux massifs : le Chablais s'étendant à l'Est jusqu'aux sommets du Haut Giffre, et le massif des bornes, comprenant la chaîne des Aravis,
- Les massifs cristallins externes, comprenant les reliefs composés de roches issues du socle : massif du Mont-Blanc et Aiguilles Rouges.

L'Arve, affluent de rive gauche du Rhône qu'il rejoint à la Jonction (alt. 372 m) en aval de la ville de Genève, prend sa source au pays du Mont Blanc, au col de Balme (alt. 2192 m), près de la frontière suisse du Valais. Elle représente, avec un parcours de 107 km (dont 98 km en France), l'axe structurant du périmètre et le principal cours d'eau de la Haute-Savoie.

Le régime hydrologique de l'Arve n'est pas le même sur l'ensemble du bassin versant : il se transforme graduellement et devient plus complexe d'amont vers l'aval. L'ensemble du bassin versant peut-être défini en 3 secteurs :

- **Le haut bassin :**

Le haut bassin constitué entre autres par la vallée de Chamonix, est caractéristique des torrents de régime glaciaire et nival. Il s'agit de torrents issus du massif du Mont-Blanc et du massif des Aiguilles Rouges, dominés par la présence de glaciers.

- **Le bassin intermédiaire :**

Le bassin intermédiaire est représenté par la vallée de l'Arve et les vallées du Giffre et du Borne. Les précipitations y sont fortes et se traduisent par des débits très importants. Les crues qui en résultent se manifestent surtout au printemps avec la concomitance de la fonte de la neige et des précipitations.

- **Le bassin aval :**

Le relief du bassin aval de l'Arve et de la Menoge reçoit des précipitations dont les maximas se situent entre l'automne et le printemps. Le régime pluvial du bassin aval est à peu près inverse au régime glaciaire du bassin amont : les crues sur le bassin aval de l'Arve peuvent donc survenir en toutes saisons, même si les mois de juin-juillet-août puis octobre-novembre sont les plus à risques.

La zone d'étude se situe dans le bassin intermédiaire où le régime hydrologique peut être caractérisé de nivo-pluvial. Les hautes eaux correspondent à la fonte des neiges et des zones glaciaires (mai-juin-juillet). Il s'agit d'un régime hydrologique complexe avec des écoulements abondants et des variations saisonnières qui reflètent les influences multiples de chacune des parties du versant au cours d'une année hydrologique.

4.1.1.2 Bassin versant du Borne

Le Borne prend sa source au pied du Mont Fleurie en Haute Savoie (Altitude 2511m), le sommet de la chaîne des Aravis est la Pointe Percée située à 2750m d'altitude. Dans sa partie haute, il s'écoule selon un axe est-ouest, traverse la commune du Grand-Bornand, s'incurve vers le nord pour rejoindre la plaine de Saint-Pierre-en-Faucigny, puis se jette dans l'Arve à Bonneville. Au grand Bornand le Borne reçoit en rive droite les eaux du torrent du Chinailon, principal affluent.

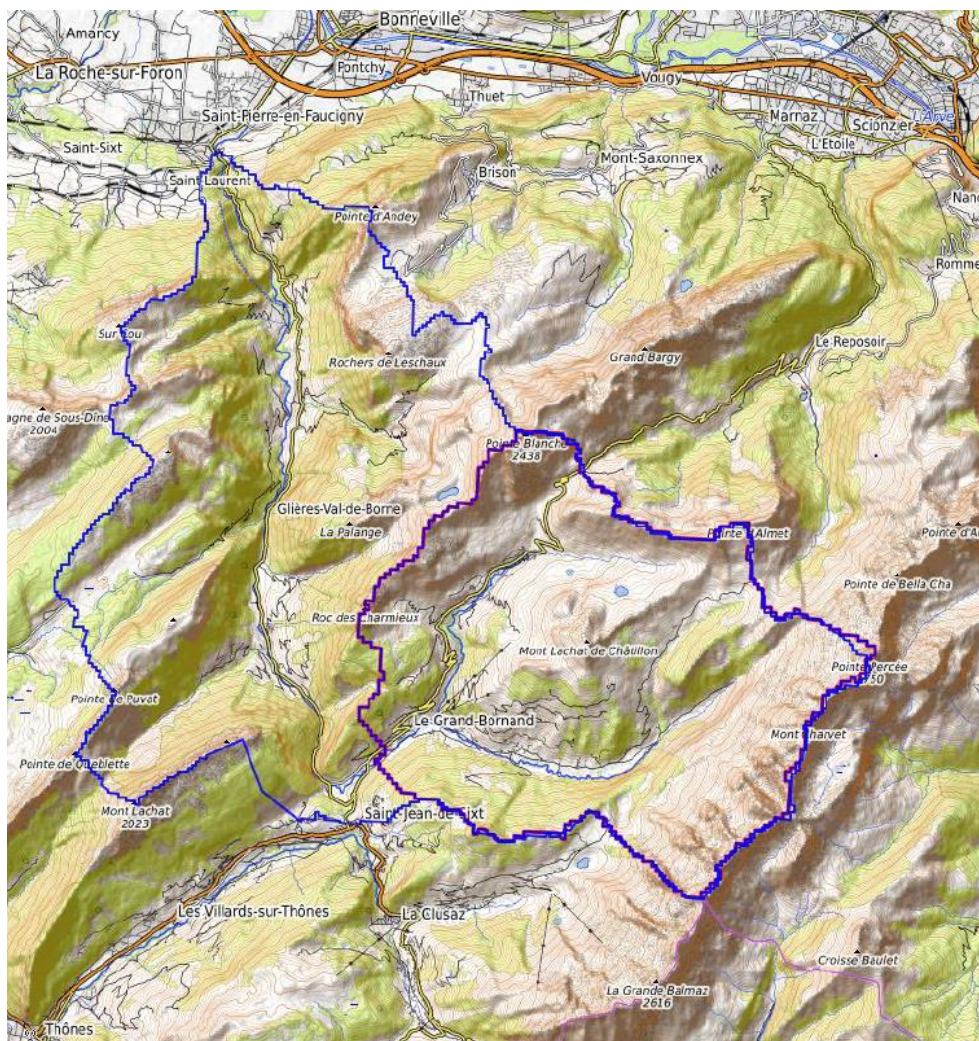


Figure 2 : Bassin versant du Borne (source : étude EDF). Découpage en deux sous bassins versants

4.1.2 Les données hydrométriques

L'Arve possède cinq stations hydrométriques de mesures, le Borne en possède trois dont deux avec des résultats exploitables. Elles sont référencées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO

Nom de la station	Code	Gestionnaire	Superficie du bassin versant (km ²)	Altitude	Hauteur - données disponibles	Débits - données disponibles
L'Arve à Chamonix-Mont Blanc	V0144010	DREAL	205	1020	1981-2018	1936-2018
L'Arve à Sallanches	V0154010	DREAL	514	535	1979-2018	1965-2018
L'Arve [le Nant d'Orlier] à Magland [Chez Party]	V0056410	DREAL	-	496	2011-2018	2011-2018
L'Arve [le Nant du Crêt] à Magland [Chez Gaudy]	V0056510	DREAL	-	495	2014-2018	2014-2018
L'Arve à Arthaz-Pont-Notre-Dame	V0222010	EDF	1664	410	-	1961-2015
Le Borne à Saint-Jean-de-Sixt	V0205420	DREAL	65	882	1980-2018	1964-2018
Le Borne à Saint-Laurent-les-Bains	V5045810	EDF	63	617	-	1969-2015
Le Borne à Saint Pierre en Faucigny (nommé par erreur Saint Pierre en Rumily)	-	-	142		-	1948-1968

Les stations de référence sur la zone d'étude seront :

- Pour l'Arve, la station de Sallanches située à une trentaine de kilomètres en amont de Bonneville ;
- Pour le Borne, la station de Saint-Jean-de-Sixt située à une vingtaine de kilomètres en amont de Bonneville.

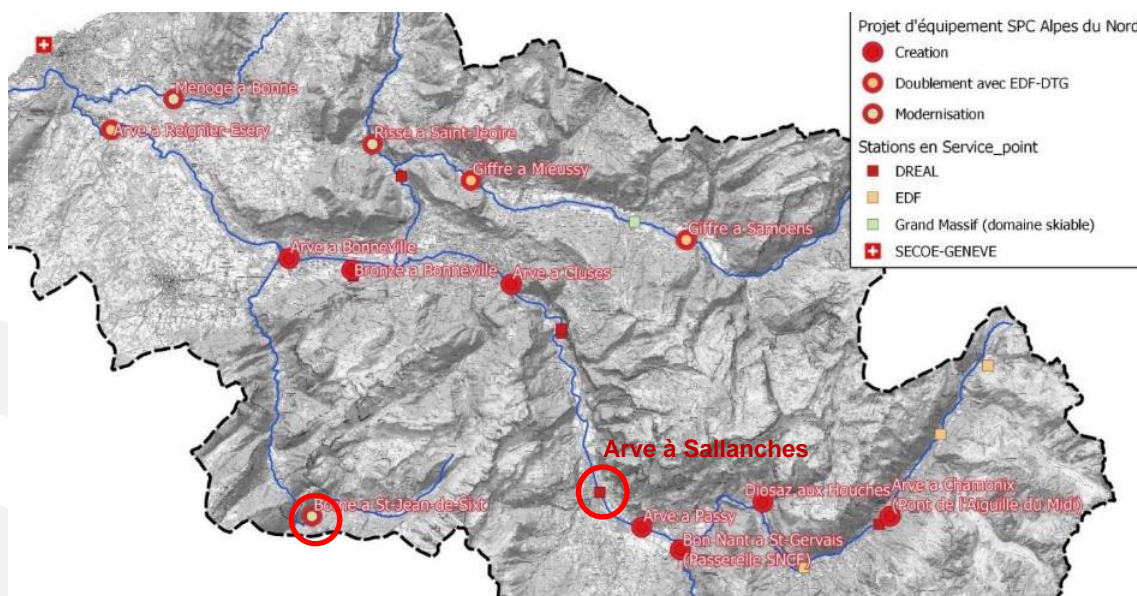


Figure 3 : Stations de références au sein du réseau hydrométrique du SPC Alpes du nord

Plusieurs études hydrologiques ont été réalisées sur le Borne et l'Arve (ISL, SUEZ Consulting, CNR, ...). Le SM3A a retenu l'étude EDF, réalisée en 2020 dans le cadre du projet de confortement des digues du Borne et de l'Arve à Bonneville et Ayze.

Les débits retenus pour la présente étude sont donnés dans le §4.3. Ces débits de pointe sont sécuritaires par rapports aux autres études, ce qui maximise les lignes d'eau modélisées et donc la protection contre les inondations.

4.1.3 Apports du Giffre

Le Giffre est un affluent rive droite de l'Arve qui se rejette dans l'Arve en amont direct de la zone d'étude. Son bassin versant, de 456 km², est de nature karstique, ce qui complique l'estimation de ces débits de pointe. Sa surface représente environ 32% de la surface du bassin de l'Arve à Bonneville. Les débits de pointe maximum du Giffre et les débits à Bonneville et Thyez de l'Arve, varient suivant les sources d'information. Le tableau suivant synthétise un extrait de l'étude ISL 2016 et de l'étude, réalisée par Hydratec en 2014.

Tableau 2 : Débits de pointe pour des crues du Giffre

	Station	Surface BV (km ²)	Q10 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)
Giffre Etude ISL 2016	Taninges	325	331	552
Giffre Etude Hydratech 2014	Taninges	325	342	647
Giffre Etude Hydratech 2014	Marignier	475	439	790

En crue décennale, la valeur de l'étude Hydratech est très proche de celle calculée par l'étude ISL. Cette concordance s'explique par le fait que le débit de pointe Q10 est évaluée par analyse statistique à partir d'une chronique de plus de 10 ans (voire 64 ans suivant les stations). L'écart, beaucoup plus important sur le débit de pointe Q100 (95 m³/s) proviendrait, d'après ISL, d'une potentielle surestimation des débits à la station de Taninges d'environ 30%.

Pour les calculs des crues de l'Arve, les hydrogrammes définis dans la récente étude d'EDF et retenus pour le dimensionnement du projet sont utilisés. En revanche, pour le système de prévision en cas de crue, il est important de retenir les données de l'étude Hydratech 2014 qui sont plus fiables dans la mesure où l'étude hydrologique a été menée spécifiquement pour le Giffre (source CNR).

En d'autres termes, le Giffre est un des principaux affluents de l'Arve, en particulier en amont de Bonneville (zone d'étude). La montée des crues du Giffre, qui participe grandement à l'augmentation des débits de l'Arve (réponse rapide du BV du Giffre), est à surveiller. Par exemple, la crue centennale du Giffre estimée par Hydratec est l'équivalent d'une Q20 de l'Arve (Estimation EDF, 2020).

Il est à noter que le SM3A a mis en place des seuils d'alerte (niveaux de vigilance - Vigicrues) à la station limnimétrique du Giffre [Plan Sépharin] à Marignier. Ces niveaux sont présentés ci-après et sont intégrés au chapitre 9 :

rivière	GIFFRE AVAL				
GIFFRE	Station de référence : MARIGNIER [Plan Séraphin]				
niveau de vigilance	crues historiques			zone de transition	
	date	hauteur	débit	hauteur	débit
	22 sept 1968	4m30		4m30 à 4m50	540 à 580 m ³ /s
	1 ^{er} mai 2015	3m91	456 m ³ /s		
				3m30 à 3m50	330 à 370 m ³ /s
	23 déc 2022	3m14	293 m ³ /s		
	.31 mai 2010		210 m ³ /s à Taninges		
	4 janvier 2018	2m80	241 m ³ /s	2m60 à 2m80	200 à 240 m ³ /s

Seuils retenus pour les changements de couleur de Vigilance Crues (tronçon Giffre aval)

4.1.4 Environnement hydro-morphologique

4.1.4.1 Evolution historique

Source : SOGREA pour S.M.3.A., Etude des transports solides sur l'Arve, Réf. 550490, Avril 2000.

Anciennement, l'Arve divaguait dans sa plaine alluviale, n'étant contrainte, en crue, que par les pieds des versants et des cônes alluviaux de ses tributaires. L'Arve avait alors un lit en tresse caractérisé par de multiples bras et de nombreuses sinuosités. Les travaux d'endiguement sont probablement très anciens et datent très certainement des premières installations de l'homme aux abords de la rivière.

Cependant, ce n'est qu'à partir du début du 18^{ème} siècle que des travaux de correction coordonnés vont être mis en œuvre, à l'initiative du gouvernement Sarde.

Bien qu'endiguée sur plusieurs sections de son cours, l'Arve conservait jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle, des latitudes de divagation et de submersion d'un lit majeur important, qui conditionnait l'ensemble de son équilibre, qu'on pouvait considérer comme relativement stable (au moins à l'échelle humaine).

Les décennies d'après-guerre ont vu s'effectuer une transformation radicale de cet équilibre :

- Par les extractions de matériaux dont il a résulté, depuis Chedde jusqu'au Rhône, un enfoncement généralisé du lit,
- Par les multiples formes d'occupation des sols (urbanisation) qui ont réduit (souvent par remblai et endiguement) le domaine d'extension de la rivière,

- Par les actions nombreuses de confortement des ouvrages ou des berges, et de fixation du lit.

Source : SOGREAH Ingénierie Conseils pour Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Borne (S.M.3.A.) et D.D.A.F. de Haute Savoie, Etude Générale d'Aménagement Hydraulique du Borne, Septembre 1989 [1].

Le même constat peut être fait pour le lit du Borne. Anciennement torrent de montagne, il est aujourd'hui un cours d'eau presque complètement artificiel, rectiligne depuis la sortie des gorges du Haut-Rumily en aval du seuil du diable jusqu'à la confluence avec l'Arve. Dès 1730, les riverains ont cherché à se protéger des crues dévastatrices du Borne sur les plaines productrices qui venaient couper la route de la Roche - Bonneville, en mettant en place un système d'endiguement. Cette fixation du lit, couplée aux différentes extractions de matériaux pour la création de l'autoroute blanche un peu plus tard (1970), a nécessité la création d'ouvrages de corrections torrentielles un peu partout sur son linéaire pour limiter l'incision du cours d'eau.

Aujourd'hui le phénomène semble être stabilisé sur les deux cours d'eau grâce aux ouvrages hydrauliques et notamment les seuils de correction torrentielle mis en place à des niveaux très bas. Les seuils maintiennent un profil en long en marge d'escalier dont aucun ne peut être effacé. Par ailleurs, le SAGE prévoit, dans ses dispositions RIV 4 à RIV 6 du sous-objectif « Restaurer la morphologie des cours d'eau dégradés », une étude pour connaître les possibilités de modification du transport solide et une restauration morphologique de certains tronçons. L'état actuel est donc peut-être un profil minimum qui peut, si les études le juge pertinent, être revu à la hausse. Le profil en long présentant les évolutions morphologiques est disponible au 4.7.

Historiquement, la dynamique sédimentaire du Borne a été perturbée par la mise en place des premiers endiguements sur le Borne (secteur amont de Dessy), entraînant une tendance à l'incision du lit sur son secteur amont et à l'exhaussement de celui-ci sur le secteur aval situé en aval du pont RD1203 (objet de cette étude).

Cette tendance a évolué et c'est à partir des années 1950 qu'on commence à assister à un phénomène inattendu d'enfoncement progressif du lit de l'Arve, puis du Borne, en lien avec une rupture du transit sédimentaire. Plusieurs facteurs semblent expliquer le phénomène :

- Pour partie, faible, la fin du Petit Âge Glaciaire depuis 1850, ayant pour conséquence l'extinction naturelle de nombreux torrents sur les bassins versants, et donc une baisse de l'apport sédimentaire dans la vallée,
- Pour une majeure partie un ensemble de facteur en lien avec l'activité anthropique :
 - L'endiguement, lui-même, qui restreignant l'espace de divagation des deux rivières conduit par « effet rebond » à un enfoncement du lit,
 - La construction d'importants barrages hydroélectriques, en particulier sur l'Arve (Emosson, Les Houches...), sur le Giffre (Taninges Pressy) et sur le Borne (Beffay), coupant de facto l'alimentation en matériaux sédimentaire plus en aval.
 - L'extraction massive de matériaux dans le lit de l'Arve qui servait à la construction et les infrastructures routières. Environ 15 millions de m³ ont été extraits. Ces opérations de « curage » du lit ont eu un impact important sur les fonds de la rivière, avec des incisions pouvant atteindre 5 à 10 m dans certains secteurs (en particulier à proximité des anciennes

gravières). Ce facteur est probablement le plus important et a pu impacter les affluents (dont le Borne).

Il en résulte finalement que le lit de l'Arve s'est enfoncé largement de plusieurs mètres, et par effet domino certains affluents, donc le Borne, réglant au passage pour partie les problématiques d'inondation, mais générant en contrepartie des problèmes d'instabilités des abords des rivières et même d'effondrement de la capacité de la ressource en eau souterraine (effondrement du toit de la nappe phréatique).

Il est apparu la nécessité de stabiliser l'évolution du profil en long de l'Arve et du Borne, par la multiplication de seuils le long de la confluence.

A ce jour et d'après les informations recueillies, le phénomène d'incision semble plus ou moins stabilisé. L'analyse comparative des profils en long du fil d'eau d'étiage de l'Arve entre Passy et la frontière suisse depuis 2009 (période 2009-2020) montre un arrêt du phénomène d'incision voire de légers dépôts par endroits.

4.1.4.2 Les phénomènes naturels

Source : SOGREAH LEDOUX CONSULTANTS pour S.M.3.A., Plan de Gestion des Matériaux solides de l'Arve, Réf. 2814036, Janvier 2004

Sans évoquer les changements climatiques qui ne sont sensibles que sur des périodes très longues et dont les effets apparaissent négligeables comparés aux autres facteurs d'évolution, les modifications d'origine naturelle concernent plus particulièrement les mouvements de terrain et l'évolution des glaciers (rupture de poches glacières). Ces phénomènes ont pu être à l'origine de profondes modifications de l'état du cours d'eau (changements de lit, engravements importants d'un tronçon, destructions partielles ou totales d'aménagements, d'habitations ...). Parmi ces derniers on peut citer le glissement des Posettes ou le phénomène de lave torrentielle sur le Bonnant en 1892 qui a fait 175 morts à Saint-Gervais.

4.1.4.3 L'intervention de l'Homme

Source : SOGREAH LEDOUX CONSULTANTS pour S.M.3.A., Plan de Gestion des Matériaux solides de l'Arve, Réf. 2814036, Janvier 2004

C'est incontestablement l'intervention humaine qui est à l'origine des plus fortes modifications des cours d'eau observées ces dernières décennies.

L'endiguement du lit de l'Arve :

Les modifications anthropiques ont débuté au 17ème siècle avec les aménagements d'endiguement visant à protéger les zones où allait se développer l'urbanisation. Ce n'est qu'à partir du 18ème siècle qu'un endiguement durable a commencé à se mettre en place et s'est poursuivi activement au 20ème siècle pour couvrir aujourd'hui les $\frac{3}{4}$ du linéaire de l'Arve.

L'Arve est une rivière torrentielle, qui divaguait naturellement sur une grande largeur et sur un lit formé de bancs de graviers sans végétation. L'endiguement, associé aux extractions, a participé à la fixation du cours d'eau dans un seul lit. Certains bancs de graviers ne se sont plus retrouvés alors noyés qu'au cours des crues. L'Arve y a déposé les matériaux fins, fertiles, ce qui a permis à la végétation de se développer. Au cours des crues suivantes, la végétation a limité les vitesses d'écoulement et a retenu encore plus de matériaux fins. Ceci a participé à l'exhaussement des bancs. A terme, on s'attend à l'établissement d'un milieu artificiel constituée d'une rivière figée dans un seul lit et des bancs fixes, végétalisés.

Parallèlement à ces travaux d'endiguement, les principales interventions qui ont contribué à l'évolution rapide du lit sont :

- **La création de barrages hydroélectriques, dont le barrage des Houches en 1953** : Ces aménagements interceptent une partie des matériaux solides transités en amont et contribuent à l'incision du lit en aval. Au niveau du barrage des Houches, sur les 180 000 m³ de matériaux arrivant dès l'amont, seuls 15 000 m³ transitent au travers du barrage ;
- **Le remblaiement du lit majeur de l'Arve** dont l'effet est de réduire les possibilités d'écrêtement des crues ;
- **Les extractions massives réalisées dans le lit, entre 1950 et 1983** : On estime aujourd'hui qu'environ 10 millions de m³ de matériaux ont été extraits entre 1950 et 1983 de l'Arve, auxquels il faudrait ajouter les très importantes extractions effectuées sur le tronçon suisse au début du 20^{ème} siècle. Sachant que, dans l'état naturel, en supposant que chaque tronçon de l'Arve se trouve en équilibre, le transport annuel par charriage dans l'Arve est d'environ 100 000 m³, il faudrait au moins 100 ans pour reconstituer le stock alluvial, en supposant que l'alimentation en matériaux n'ait pas été modifiée, ce qui n'est pas le cas ;
- **Les aménagements de correction torrentielle sur les affluents** : les travaux de restauration des terrains en montagne entrepris avec succès par les services RTM et l'allègement de la pression pastorale ont conduit à limiter l'érosion des versants et réduire les apports de matériaux solides dans l'Arve.

Il a résulté de ces différentes interventions une chenalisation généralisée du lit de l'Arve en aval du barrage des Houches, avec formation de bancs végétalisés, et des enfoncements considérables depuis Servoz jusqu'à la confluence avec le Rhône, atteignant une profondeur d'environ 12 mètres au Fayet, ce qui est le record d'enfoncement des rivières alluviales françaises.

D'importants travaux de fixation du lit et de consolidation des ouvrages ont dû être entrepris depuis cette incision, souvent dans l'urgence comme le seuil du Fayet ou le seuil de la Sardagne. Aujourd'hui le transport solide à l'échelle de l'Arve est régulé et le phénomène d'incision s'est, semble-t-il, considérablement ralenti voire annulé.

4.1.4.4 Morphologie actuelle

L'Arve : Source : Hydratech pour S.M.3.A., Analyse des évolutions topographiques du lit de l'Arve, Réf. 0163102, Juillet 2013

Aujourd'hui, le lit tout en divagations de l'Arve a été fixé par les différents systèmes d'endiguement mis en place dans la région de Bonneville. L'incision liée à ce phénomène, combinée avec l'extraction massive des matériaux du lit, a laissé des séquelles dans le paysage. La plupart des ouvrages de protection contre les crues étant désormais perchés, menaçant parfois leur stabilité. Le secteur étudié, Seuil aval Bonneville – Seuil Marignier, semble connaître aujourd'hui une stabilisation du phénomène d'incision. Cette stabilisation est maintenue par la mise en place de seuils le long du lit de l'Arve. Dans la zone d'étude, deux seuils sont à noter :

- le seuil d'Anterne situés à environ 7 km en amont de la confluence avec le Borne ;
- Et celui de la STEP de Bonneville à 400 m en aval de la confluence avec le Borne.

Le Borne : A proximité de Bonneville, située en aval de son cône de déjection, le Borne à une pente d'environ 1%. Le linéaire est parfaitement endigué depuis la sortie des Gorges du Haut-Rumily et plusieurs seuils ont été créés pour contrer le phénomène d'incision qui en résultait en concomitance avec les extractions de matériaux dans le lit. Les ouvrages de protection contre les crues sont aujourd'hui pour la plupart perchés, la

Q1000 (230 m³/s) ne les mettant pas tous en charge. Le phénomène d'incision est stabilisé, le transport solide est désormais peu abondant et est régulé par les seuils en amont : Seuil Métral, Seuil du Diable ainsi que le Seuil en aval de la confluence avec l'Arve.

4.1.5 Environnement géologique et hydrogéologique

Ce paragraphe est extrait du rapport géotechnique réalisé par la société Hydrogéotechnique Sud Est en août 2017.

Les cartes géologiques (éditions du BRGM) au 1/50000 n°654 d'Annemasse et n°678 d'Annecy-Bonneville montrent que les zones d'étude se situent, sous les formations de surface et d'altération non mentionnées par le document, au niveau des formations suivantes :

- Au droit des digues « Les Bordets » et « Les Places » : les alluvions de l'Arve (Fz),
- Au droit des digues « Merlon Prison » et « Queue du Borne » : les alluvions de l'Arve et du Borne (Fz),
- Au droit des digues « Bois Jolivet B », « Vorziers » et « Dessy » : les alluvions du cône de déjection du Borne.

Selon les notices : « **Fz (Fz1, Fz2)**. Alluvions fluviales des fonds de vallée (galets, sables et limons). On a pu localement distinguer le lit majeur (Fz1) et le lit mineur (Fz2). Pour l'Arve, l'épaisseur des alluvions correspondantes s'établit en moyenne autour de 5m, avec des extrêmes de 2m (Étrembières) et de plus de 10m à la Jonction (Genève). » ; « Leur épaisseur n'est pas connue avec précision encore aujourd'hui. S'il est évident qu'en surface les alluvions sont modernes et par conséquent cartographiées sous la notation Fz, il est cependant difficile d'estimer l'âge de leur base. Comme le relève Lombard (1985, p. 151-152), dans la vallée de l'Arve, "la couverture quaternaire est épaisse et étendue ; les indices d'accidents profonds sont rares...". Des lignes structurales et morphologiques couvertes ont marqué le cours inférieur de l'Arve ou du moins celui de son premier glacier près de Genève. Plus haut, entre le Salève et Bonneville, aucun affleurement ne montre d'accident du soubassement ayant précédé l'invasion glaciaire" »

À noter qu'en partie Sud de « Dessy », la carte géologique fait mention de formations morainiques et de formations calcaires, qui pourraient se retrouver localement à faible profondeur.

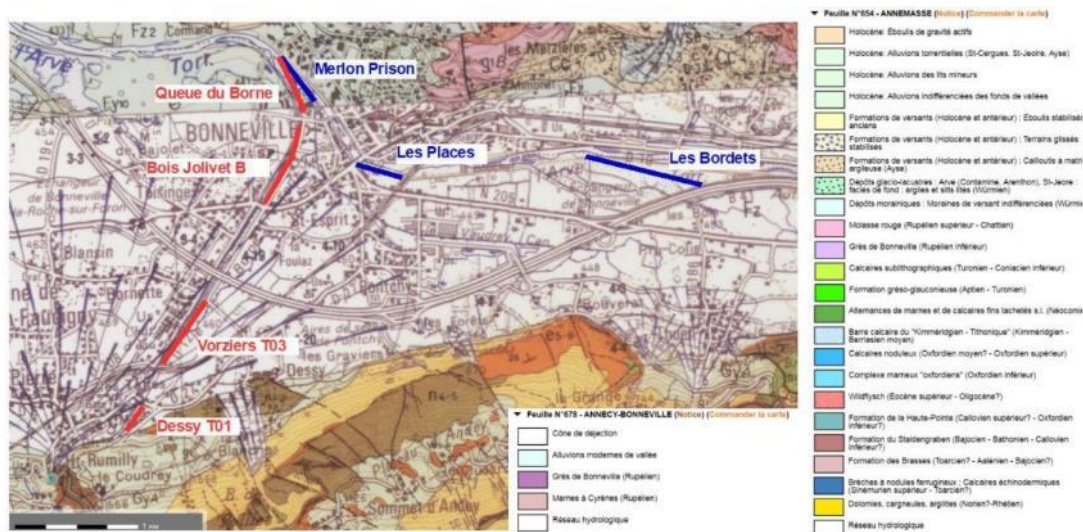


Figure 4 : Extrait des cartes géologiques d'Annemasse et d'Annecy-Bonneville au 1/50000 du BRGM

Le dossier d'ouvrage a permis de compléter cette analyse :

L'alternance des périodes glaciaires a creusé la partie Nord de l'anticlinal de Dessy, où l'on retrouve notre zone d'étude, en y déposant petit à petit des sédiments (alternance de périodes glaciaires et lacustres). Ce phénomène a abouti à la création de la vallée de l'Arve. C'est le creusement de cet anticlinal qui explique que l'on peut observer sensiblement la même lithologie de part et d'autre du cours d'eau, mais pas à la même altitude (cf. schéma ci-dessous).

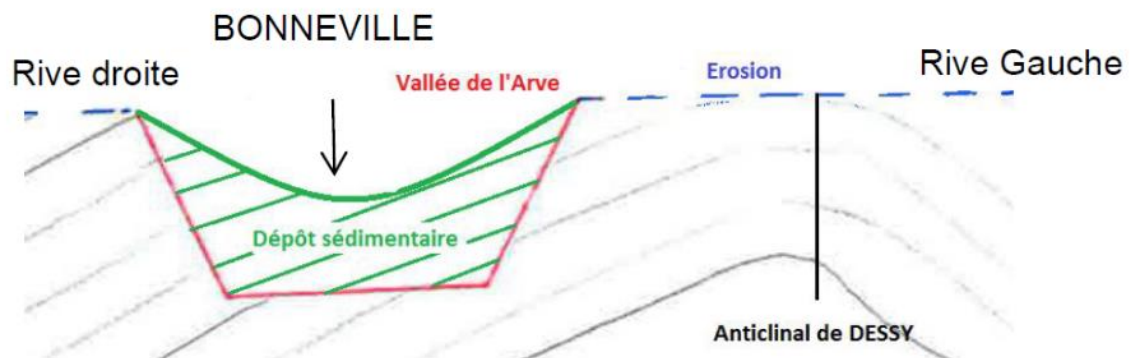


Figure 5 : Schéma en coupe de la géologie du site

On retrouve en partie Nord (rive droite) des niveaux plus jeunes (les molasses ou grès), déjà érodés en partie Sud (rive gauche).

En conclusion, les schistes marno-micacés (Molasses ou Grès de Bonneville, ici), qui tapissent généralement le fond de tous les synclinaux des chaînes subalpines (dont celui de Dessy), s'étendent sous les dépôts quaternaires (Sédiments) de la plaine de l'Arve et semblent affleurer, en rive droite, notamment dans la ville de Bonneville.

Du point de vue de l'hydrogéologie, le site est caractérisé par les nappes d'accompagnement de l'Arve et du Borne. On peut également s'attendre à rencontrer des circulations erratiques et intermittentes susceptibles de se développer à différentes profondeurs, à la faveur de chenaux plus perméables et/ou en fonction des conditions météorologiques.

D'après le rapport d'Artelia en 2014, seules les alluvions récentes de l'Arve sont aquifères. Elles sont épaisses de quelques mètres (en moyenne 5 m, localement un peu plus) et reposent directement sur les formations silteuses et argileuses de remplissage de la vallée. Les alluvions de l'Arve sont le plus souvent dépourvues d'une couverture argileuse. Le secteur immédiatement en amont de Bonneville a fait l'objet d'une prospection géophysique (BEGG 1966). Les 3 profils de sondages électriques recourent transversalement la vallée et montrent une couche de terrains de fortes résistivités (alluvions récentes de l'Arve) peu épaisse recouvrant au moins 40 m de formations argileuses très faiblement résistantes. Quelques forages de reconnaissance confirment ce schéma. Le forage 06784X0007/S au sud-ouest de Bonneville dans la zone d'activité des Bordets (rive gauche de l'Arve) a traversé 10,7 m d'alluvions grossières de l'Arve entrecoupées de passes argileuses, puis 40 m d'argiles feuilletées à petits horizons sableux. Les forages de reconnaissance du Conseil General pour la réalisation du nouveau pont de Bonneville ont traversé les limons sableux et les argiles lacustres sur 40 m de profondeur sous les alluvions récentes de l'Arve. Un puits AEP exploitait les alluvions vers 6 m de profondeur à Bonneville en limite de la commune d'Ayze. Il n'existe pas de coupe géologique (puits d'Ayze, rapport Baptendier d'avril 1999). Ce forage très vulnérable aux pollutions, a été récemment abandonné au profit du nouveau forage des Vorziers sur le cône du Borne en rive droite.

Les cônes de déjection des cours d'eau, comme le Giffre à Marignier ou le Borne à Saint-Pierre-en-Faucigny sont des formations grossières aquifères qui relayent généralement les anciens deltas imbriqués dans les formations lacustres. Les cônes de déjection sont souvent imbriqués dans les alluvions récentes de la vallée de l'Arve. Les formations aquifères vont donc préférentiellement se concentrer au droit des cônes de déjection ou des alluvions récentes de l'Arve et du Giffre. En profondeur, les formations de delta imbriquées dans les alluvions lacustres présentent également un potentiel aquifère. Ces deltas sont en toute logique en continuité des cônes de déjection actuels en bordure de vallée.

Les alluvions récentes de l'Arve sont alimentées par le ruissellement de bordure et les précipitations directes. L'Arve, qui s'est incisée, et est en position drainante. Il n'existe pas de carte piézométrique pour confirmer cette hypothèse.

Le sol de fondation n'implique pas des particularités de comportement à prendre en compte vis-à-vis du risque sismique. Cela est confirmé par les sondages géotechniques réalisés sur les digues du Borne et de l'Arve. A noter que le SE étudié, de classe B, est situé en zone 4 (sismicité moyenne).

4.1.6 Environnement naturel

4.1.6.1 Zones naturelles remarquables

Zonages de protection

Le projet n'empiète sur aucun zonage de protection réglementaire : ni Parc National Régional (PRN), ni Réserve Naturelle Nationale ou Régionale, ni Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope (APPB).

Zonages d'inventaire ZNIEFF

Les digues de l'Arve sont situées dans la ZNIEFF de type II n°820031533 "Ensemble fonctionnel de la rivière Arve et de ses annexes".

Les tronçons du Borne et de l'Arve étudiés ne sont pas concernés par une ZNIEFF de type I.

Zones humides

L'inventaire départemental des zones humides identifie une zone humide au niveau de la confluence Borne/Arve : « Arve alluvial à l'aval de Bonneville ». Les autres zones humides situées à proximité sans interférer avec les digues sont situées au bord de l'Arve à l'amont de Bonneville : « Les bois Est-Nord-Est/Charbonnières/Thuét », « Chef-lieu Sud-Est/lac est » et « Chef-lieu Sud-Ouest/lac ouest ».

Sites Natura 2000

Le site Natura 2000 ZSC FR8201715 et ZPS FR8212032 "Vallée de l'Arve" comporte des zones à l'amont et à l'aval du système d'endiguement, ces zones restent éloignées de 2 km du système d'endiguement concerné.

4.1.6.2 Corridors biologiques

La zone d'étude présente un enjeu fort concernant la trame verte et bleue à l'échelle locale avec la présence de continuums terrestres et aquatiques le long des cours d'eau de l'Arve et du Borne.

Le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) Rhône-Alpes identifie au niveau de la zone d'étude :

- Le Borne est un cours d'eau identifié comme d'intérêt écologique pour la trame bleue, dont l'objectif est la remise en état. Le SCOT Faucigny Glière et le PLU de Bonneville identifient également le Borne comme corridor écologique.
- Des espaces perméables associés aux milieux forestiers et aux milieux aquatiques.
- Des obstacles au déplacement des espèces : infrastructures de transport créant des zones de conflit et des zones d'écrasement de la faune (A40, RD1205, RD1203) ; seuil sur les cours d'eau.
- Un fuseau d'importance régionale le long du Bronze jusqu'à son embouchure avec l'Arve. Il relie également l'Etang de Thuét.
- Les réservoirs de biodiversité (ZNIEFF Gravière de l'Arve, ZNIEFF Etang de Thuét) restent extérieurs au système d'endiguement.

Le PLU de Bonneville considère l'Arve et ses abords comme espaces naturels d'intérêt écologique majeur, réservoirs de biodiversité.

Au-delà des éléments identifiés dans ces documents cadres, tous les espaces boisés des digues et les marges alluviales constituent des corridors biologiques pour la faune :

- Sous-trame aquatique composée des cours d'eau, des gravières, mares, milieux aquatiques temporaires, balastières. Ces milieux sont favorables aux amphibiens, aux odonates et à l'avifaune.
- Sous-trame boisée, de perméabilité forte, représentée par les ripisylves est favorable aux mammifères semi-aquatiques et terrestres, aux chiroptères et à l'avifaune.

Ces corridors sont notamment importants pour la traversée des zones urbaines.

Certains éléments augmentent la perméabilité : passages petite faune créés pour les déplacements de Castor d'Europe (sous la route RD19), passages grande faune au niveau des infrastructures de transport (RD19 et A40).

4.1.6.3 Enjeux faune-flore-habitats

Les éléments sont extraits du Diagnostic environnemental Aménagement des digues de l'Arve et du Borne aval produit par Mosaïque environnement.

Habitats naturels

Les habitats de zone humide sont peu développés sur le Borne et se cantonnent à l'intérieur du lit vif. Ces habitats sont un plus présents au bord de l'Arve, au niveau des bordures boisées internes du cours d'eau.

La rive droite du Borne possède peu de surface d'habitat à enjeux : 1 patch d'habitat à enjeu fort et un linéaire d'habitat à enjeu moyen près du pont de la RD1203.

La rive gauche de l'Arve possède des habitats à enjeu fort et à enjeu moyen sur des linéaires significatifs.

Les habitats naturels à enjeux forts sont surtout présents au niveau de l'Arve. Les enjeux les plus forts portent sur les habitats pionniers liés à la dynamique historique du cours d'eau et présents aujourd'hui à l'état de reliques. Leur maintien est conditionné par le maintien de la dynamique alluviale et la dynamique de mobilité des bancs, dont l'existence est elle-même conditionnée par la largeur suffisante (supérieure à 80m de lit actif) et le maintien à minima du transport solide existant. Cette remarque sur les habitats naturels est aussi valable pour la flore à enjeux.

Flore patrimoniale

La flore patrimoniale est constituée d'espèces pionnières qui colonise les alluvions de l'Arve.

- Borne : Cyclamen rouge pourpre loin du système d'endiguement.
- Arve : Calamagrostide faux-phragmite, Souchet d'Autriche, Tamarin d'Allemagne (VU RA), Petite massette (fort enjeu EN RA et PN).

Les stations de flore patrimoniales ne sont pas étendues le long du système d'endiguement, elles restent ponctuelles.

Flore envahissante

- Borne : Renouée du Japon, Robinier faux-acacia, Tête d'or, Buddleia du père David, développés surtout en amont de l'autoroute. Une station de Buddleia est présente à la confluence
- Arve : Renouée du Japon, Robinier faux-acacia, Tête d'or, Buddleia du père David, Balsamine à petites fleurs, Berce du Caucase. Les stations les plus importantes sont 2 spots de Buddleia, 2 stations de Robinier de part et d'autre du pont de la RD19 et des linéaires assez importants de Tête d'or près du pont de la voie ferrée.

Ces espèces pouvant rapidement masquer l'ensemble du parement et diminuer très fortement la visibilité lors des visites de site, il est important de réaliser un entretien annuel. Cet entretien des digues devra tenir compte de ces espèces envahissantes pour le choix des techniques de débroussaillage.

Faune à enjeux

Parmi les espèces protégées recensées par Mosaïque, plusieurs espèces à enjeu moyen et fort ont été identifiées en bordure du Borne et de l'Arve.

La plupart sont des espèces d'oiseaux liés à la ripisylve ou aux bancs de graviers.

Le Castor fréquente l'Arve mais aussi le Borne.

Les espèces patrimoniales constituant un enjeu fort de conservation sur le secteur sont les suivantes :

	Enjeu moyen	Enjeu fort
oiseaux	Chardonneret élégant	Chevalier Guignette
	Verdier d'Europe	Hirondelle de fenêtre
	Serin cini	Martin-pêcheur d'Europe
	Martinet noir	
	Petit gravelot	
	Harle bièvre	
mammifères	Muscardin	Castor
chiroptères	Barbastelle d'Europe	Potentielles espèces arboricoles : Noctule de Leisler, Pipistrelle de Nathusius
insectes	Lucane cerf-volant	

Tableau 3 : faune à enjeux écologiques moyen et fort

4.2 Analyse hydrologique locale

4.2.1 Régime hydrologique au droit de notre zone d'étude

Le bassin intermédiaire de l'Arve comprend la vallée alluviale de l'Arve, entre le Fayet et Bonneville, et les vallées affluentes du Giffre et du Borne, ainsi que des multiples torrents qui parviennent directement à l'Arve sur ce tronçon (Diosaz, Sallanches, Ugine, Foron du Reposoir, Bronze...). Le régime des cours d'eau y est de type nival, régime typique des rivières alpines de moyenne altitude avec des influences pluviales et glaciaires. Les graphes ci-après présentent les débits mesurés à la station de l'Arve à Sallanches et du Borne à Saint-Jean-de-Sixt, les stations les plus proches de la zone d'étude.

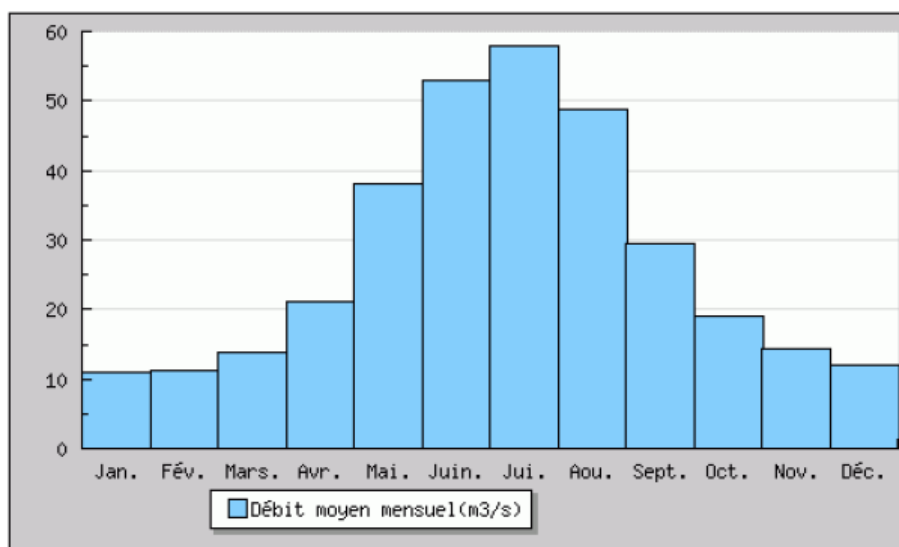


Figure 6 : Débit moyen mensuel de l'Arve à Sallanches – Période 1965 – 2018 – Source banque HYDRO

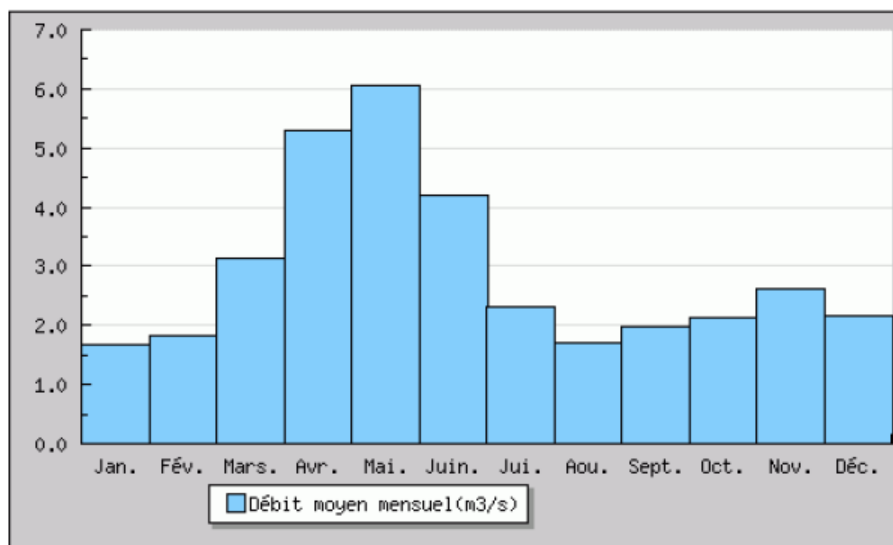


Figure 7 : Débit moyen mensuel du Borne à Saint-Jean-de-Sixt – Période 1964 – 2018 – Source banque HYDRO

Les deux bassins versants sont sensibles à la nivologie avec des débits maximaux intervenant en saison chaude lors de la fonte des neiges et des minima lors de la rétention nivale. L'altitude des sommets les plus élevés et la surface enneigée explique en partie la translation des pics de débits entre les deux bassins versants. Mais le facteur le plus important est la prise en compte de la pluviométrie. En effet, hormis le bassin du Chinailon, les affluents du Borne ne disposent pas de bassin versant suffisamment étendu pour générer à eux seuls de forts débits de crue liés à une pluviométrie accrue et soudaine.

Le bassin intermédiaire de l'Arve est exposé aux perturbations les plus fréquentes d'ouest (d'origine océanique) et est soumis par conséquent à un régime pluvio-nival de forte intensité. Les précipitations y sont fortes et se traduisent par des débits très abondants. Les crues résultantes se manifestent principalement au printemps (pluie et fonte) et à l'automne.

4.2.2 Débits caractéristiques et hydrogrammes des crues

Les principales crues ont lieu essentiellement en période de fonte des neiges, elles peuvent également intervenir à l'automne lors d'épisodes pluvieux intenses. L'Arve et le Borne constituent deux systèmes hydrologiques différents en interactions.

Chaque crue d'un de ces deux cours d'eau entraînant une conséquence directe sur les débits de son homologue. Les phénomènes de concomitance sont relatés dans des études antérieures :

- L'étude ISL de 2016 qui fournit des débits de pointe de l'Arve, exceptées la Q200 et la Q1000 sur le Borne qui sont extrapolées grâce à une loi de Gumbel à partir des données de crues à plus faibles débits. Les débits des affluents Borne et Bronze sont intégrés aux calculs des débits caractéristiques sachant que les autres affluents ont un apport non significatif au regard des valeurs sur l'Arve (moins de 1% du débit de pointe de l'Arve).
- Le rapport rédigé par SOGREAH en 1998 fourni les débits sur le Borne, mais aucune information sur l'Arve ou le Bronze.

L'hydrologie de crue a été récemment actualisée sur la base de deux études EDF :

- Etude des crues extrêmes du Borne à Saint-Pierre-en-Faucigny (149 km²) par la méthode SCHADEX pour SM3A, EDF, indice A, H-44200966-2020-000007, 14/01/2020
- Estimation de l'aléa crue de l'Arve à Bonneville (1353 km²), à la station EDF/DTG du Pont Neuf à Arthaz/Reignier (1635 km²) et au Pont d'Etrembières (1875 km²) par la méthode SCHADEX pour SM3A, EDF, indice A, H-44200966-2020-000284, 07/10/2020

Concernant les occurrences retenues sur l'Arve et le Borne, le parti a donc été pris de procédé comme détaillé ci-dessous :

Tableau 4 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze pour les crues de l'Arve – source : CNR

Nom simulation	Période de retour Arve (ans)	Arve (m ³ /s)	Borne (m ³ /s)	Bronze (m ³ /s)
Q2	2	364,1	19,7	7,6
Q5	5	496,6	38,5	9,0
Q10	10	613,0	51,0	10,0
Q20	20	736,7	62,9	10,9
Q30	30	813,6	69,8	11,4
Q50	50	917,1	78,4	12,1
Q80	80	1028,3	86,3	12,7
Q100	100	1081,0	90,0	13,0
Q200	200	1244,1	101,5	13,0
Q300	300	1344,6	108,3	13,0
Q400	400	1415,2	113,5	13,0
Q1000	1000	-	128,3	13,0

Tableau 5 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze pour les crues du Borne – source : CNR

Période de retour Borne (ans)	Période de retour Arve (ans)	Borne (Saint-Pierre-en-Faucigny) (m ³ /s)	Arve (Bonneville) (m ³ /s)	Bronze (m ³ /s)
2	2	66,6	380,4	7,2
5	5	93,5	475,5	8,8
10	10	113,5	525,0	9,8
20	20	130,0	630,7	10,8
30	30	141,9	691,5	13,0
50	30	156,6	691,5	13,0
80	30	171,4	691,5	13,0
100	30	178,4	691,5	13,0
200	50	201,4	767,0	13,0
300	50	212,9	767,0	13,0
1000	50	254,7	767,0	13,0

Ainsi dans le cadre de cette présente étude de dangers, les débits correspondant aux niveaux de protection et de danger sont les suivants (source : CNR) :

- **Digues du Borne RD :**
 - **Q100 Borne** (178.4 m³/s) + **Q Arve** (691.5 m³/s)
 - **Q300 Borne** (212.9 m³/s) + **Q Arve** (767.0 m³/s)
- **Digues de l'Arve RG :**
 - **Q100 Arve** (1081.0 m³/s) + **Q Borne** (90.0 m³/s) + **Q Bronze** (13,0 m³/s)
 - **Q400 Arve** (1415.2 m³/s) + **Q Borne** (113,5 m³/s) + **Q Bronze** (13,0 m³/s)

Les graphiques ci-dessous présentent les hydrogrammes des différentes crues caractéristiques étudiées. Les hydrogrammes injectés dans la modélisation sont construits par la méthode des homothéties en fonction des débits de pointe caractéristiques définis dans les études hydrologiques de référence.

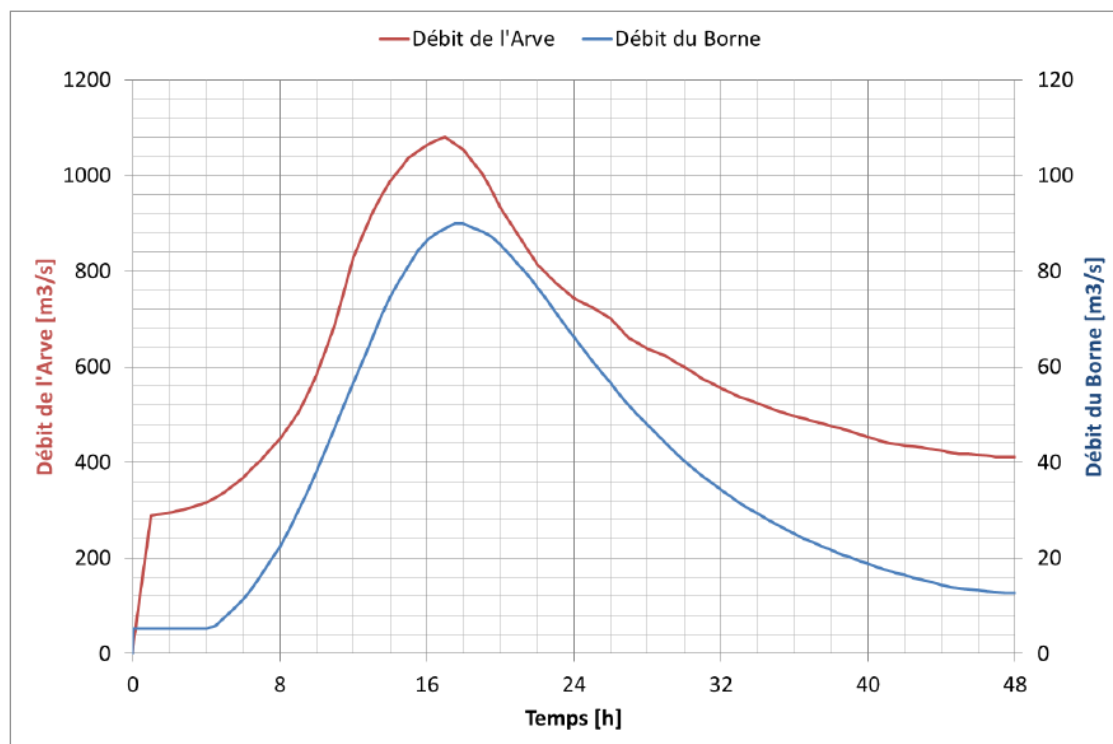


Figure 8 : Hydrogrammes de crues relatifs à la crue centennale de l'Arve

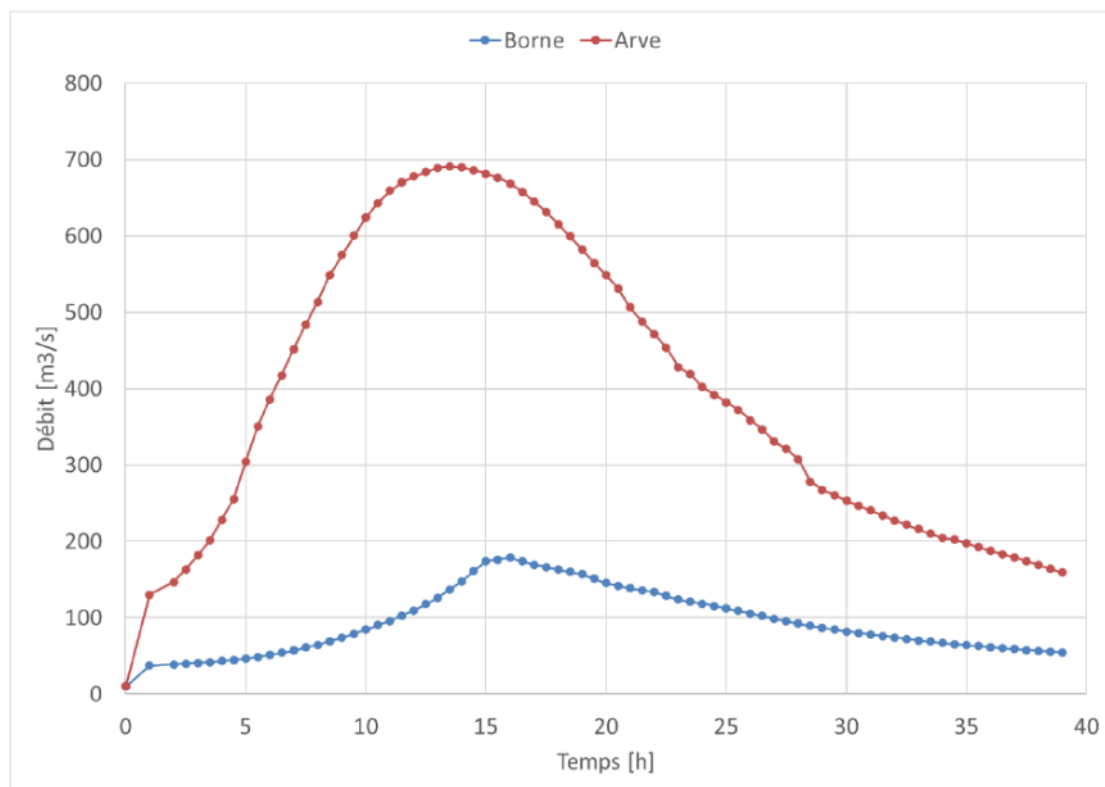


Figure 9 : Hydrogrammes de crues relatifs à la crue centennale du Borne

4.2.3 Les crues historiques

Les principales crues ayant le plus impacté le système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne" ont principalement eu lieu de juin à novembre. La fonte des neiges et les orages d'été sont à l'origine des forts débits de juin à août. Les crues d'automne, septembre à novembre voire décembre, sont provoquées par des pluies chaudes associées à une remontée du vent du midi entraînant la fonte des zones de névés ou de glaciers. Ces crues sont des crues rapides, charriant une quantité importante de matériaux solides, et pouvant générer des dégâts importants sur les habitations. L'étude historique réalisée par la société Acthys Diffusion en juillet 2017 est un référentiel plus détaillé. Après 1968, la source des informations change au profit du PPRi de Bonneville en vigueur à l'heure actuelle.

Le tableau suivant présente les crues majeures observées sur l'Arve et le Borne, avec, lorsque cela était disponible, les dégâts observés et les secteurs du système d'étude impactés.

Date	Cours d'eau	Descriptif	Digue(s) touchée(s)
14/09/1733	Borne	Importante crue du Borne, lit comblé jusqu'au-dessus des terrains. 51 ha sont inondés à Bonneville, 66 à Ponchy, 16 à Ayze.	Non précisé
27/07/1758	Borne	Les digues sont rompues en deux endroits. Le torrent se jette dans la plaine de Pontchy.	Dessy amont/aval – Vorzier T03
25-26/10/1778	Arve/Borne	Très forte crue de l'Arve. La plaine est inondée de part et d'autre. Le lit de la rivière s'est déplacé en plusieurs endroits. Crue du Borne. Les digues en pierre établies latéralement au cours du torrent de Borne sont considérablement endommagées	Dessy amont/aval – Vorzier T01/T02/T03 – Les Ouches
16-17/09/1852	Arve	L'Arve connaît une nouvelle grande crue à la suite de pluies diluviennes associées à un vent chaud. Le volume total écoulé est estimé à l'époque à 192 Mm ³ . Les eaux atteignent 2.50m à l'échelle du pont de Bonneville (447.21m NGF). Le faubourg des Places est inondé sous deux mètres d'eau. Toutes les digues existantes sont surpassées.	Bordets T01/T02 – Places T01/T02
01/11/1859	Arve/Borne	Grande crue de l'Arve. Selon les témoins, il s'agit de la plus forte connue à cette date. Le volume total écoulé est estimé à 204 M m3. Les eaux atteignent 2.83 m à l'échelle. A tempérer toutefois par le fait que le débouché du pont a été réduit en 1853. On relève dix brèches en rive gauche amont : - 2 sur la digue non perreyée située en amont immédiat du pont - 7 plus en amont, pour un total de 400m - 1 brèche de 192 m en amont de l'embouchure du torrent du Bronze Crue du Borne. Au niveau de la confluence, les digues rive droite sont dépassées et détruites sur 381 m de long. Vingt ans plus tard, cette longue brèche ne sera toujours pas réparée. On constate au même moment que depuis les endiguements achevés en 1838, le lit du Borne s'est creusé de plus de 1.50m sur sa section amont et, à l'inverse, s'est exhaussé de près de 2 m à l'aval. A tel point que le secteur de Bois Jolivet se trouve désormais en contrebas des eaux ordinaires du Borne.	Merlon Prison – Bordets T01/T02 – Places T01/T02
31/09/1860	Arve	Forte crue de l'Arve. Les terres riveraines du secteur des Places sont inondées. On relève une brèche à la digue Places T1 et deux brèches à 800m en amont du pont de Bonneville. Trois personnes sont emportées.	Places T01 – Bordets T01
10-11/06/1864	Arve	La crue de l'Arve fait suite à de fortes pluies entre le 09/06 à 16h et le 11/06 à 2h du matin. Les eaux	Bois Jolivet A – Bordets T01 – Places T01/T02

		s'élèvent à 1.76m au pont de Bonneville et atteignent le couronnement des digues rive gauche 150m en aval du pont. Une digue rompt en amont du pont. La RD4 et des terrains de la plaine de Ponchy et du faubourg des Places sont submergés. On relève jusqu'à 60cm d'eau dans les maisons.	
13-14/08/1866	Arve	La crue de l'Arve atteint 2.50 m au pont de Bonneville. Plusieurs brèches s'ouvrent sur les deux rives sur une longueur cumulée de 270 m. Trois brèches sont identifiées rive gauche : deux de 70 et 52 m à environ 2 km en amont du pont, et une de 9 m à environ 1200 m du pont, associée à un endommagement sur 60 m de longueur un peu plus en aval. On enregistre à cette occasion entre 1,50 et 2 mètres d'eau dans les maisons du faubourg des Places. Suite à cette crue, exhaussement du lit de l'Arve à Bonneville.	Bordets T01/T02
25/05/1968	Arve	Un violent orage est à l'origine d'une crue subite de l'Arve et de ses affluents. Les eaux atteignent 2.70 m au pont de Bonneville. Les digues rompent à 2 km en amont de la ville (aval Bordets T2), avec formation d'une brèche dans la levée en terre de la Bergerie. Les eaux se répandent dans le quartier des Places où 30 maisons sont inondées jusqu'au 1 ^{er} étage. Le village de Pontchy est sous les eaux, la RD4 partiellement coupée.	Bordets T02
21-23/09/1968	Arve/Borne	Forte crue de l'Arve. En dépit d'un enfoncement d'environ 1,50 m du lit consécutif aux extractions, les eaux atteignent la cote 3.12 m au pont de Bonneville. De nombreux quartiers sont inondés sur les deux rives. En rive gauche, le quartier des Places est sous l'eau, tout comme l'avenue des Glières, le Bois Jolivet, le quartier des Iles et la place de la Liberté. La crue concerne également le Borne. La digue rive droite protégeant la nouvelle prison est affouillée sur 63 m et bascule dans le torrent. L'établissement n'est pas encore occupé.	Bois Jolivet A/B – Bordets T01 – Places T01/T02 – Merlon Prison
05/07/1980	Arve	Forte Crue. Débit évalué à 720m ³ /s.	-
11/10/1981	Arve	Crue forte à l'aval de Passy, seuil de Sardagne emporté.	-
14/07/1987	Borne	Crue meurtrière au grand Bomant. 23 personnes décédées.	Amont projet
10-11/10/1988	Arve	L'Arve déborde en aval d'Arthaz-Pont-Notre-Dame et Reigner. Le charriage de la rivière coupe la route CD202, cours et caves inondées.	-
15/02/1990	Arve	Crue du bassin moyen et aval seulement.	-
24-25/07/1996	Arve	Orages violents, fonte glaciaire et formation de poches sous-glaciaires. Le débit de l'Arve à Chamonix 125m ³ /s, légèrement inférieur à Q10 au barrage des Houches (160m ³ /s).	

Tableau 6 : Description des crues historiques – source étude historique réalisée par Acthys Diffusion [2]

4.2.4 Influence aval

Les niveaux variant en fonction du temps en aval de la zone d'étude sont extraits du modèle ISL au niveau de la Passerelle SM3A (PK24.1). Cette courbe est présentée en Figure 10. Elle permet d'approcher au mieux les points de calculs et d'établir une relation niveau/débit à l'aval du modèle valable sur une plage de débit suffisante pour atteindre la crue millénaire.

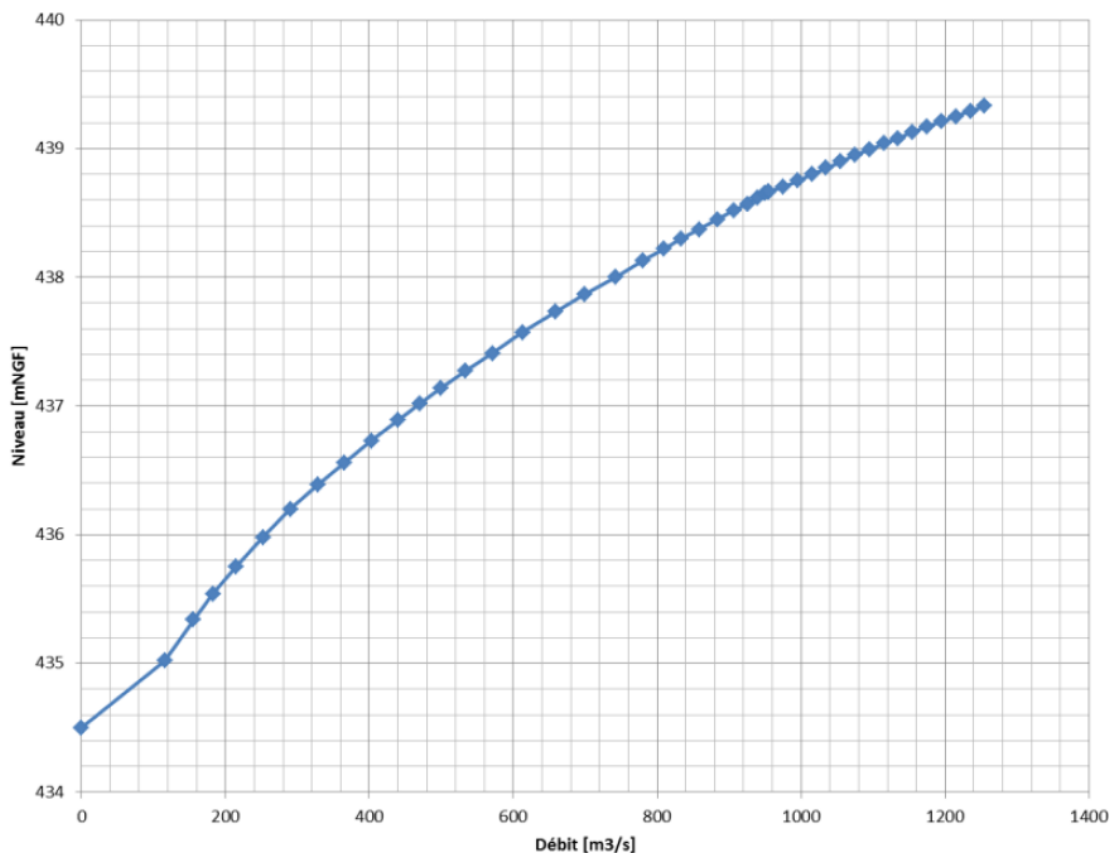


Figure 10 : Construction de la courbe de tarage à l'aval du modèle

4.3 Analyse hydraulique

Les détails de l'analyse hydraulique sont donnés dans l'annexe 1 – Note hydraulique, étant renseignée dans l'ANNEXE 2 de la présente étude de dangers : DIGP 2022-186 - 03 - Notice AVP Arve.

4.3.1 Le code de calculs Telemac-2D

L'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur des endiguements a été réalisée à l'aide du logiciel « Telemac-2D ». Ce code de calculs résout les équations de Barré-Saint-Venant en deux dimensions horizontales. Ses résultats principaux sont en chaque point du maillage de résolution (ensemble des points de calculs), la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale.

4.3.2 Emprise du modèle

Le périmètre de l'étude hydraulique concerne :

- Les lits mineurs :
 - **Arve : 9.2 km**
 - **Borne : 4.2 km**
- L'ensemble des zones urbaines et naturelles (forêts, plaine, ...) potentiellement inondé par une crue et/ou une rupture d'une digue.

Le modèle hydraulique couvre une superficie totale de 12.4 km².

Les petits ruisseaux, autres que le Bonze, s'écoulant à proximité de la zone d'étude ont des apports négligeables par rapport au débit induit par les crues des cours d'eau principaux. Ils ne sont donc pas intégrés dans l'étude.

Le modèle représente le Borne du PK4.2 au PK0 jusqu'à sa confluence avec l'Arve, ainsi que l'Arve du PK33.3 au PK24.1.



Figure 11 : Périmètre du modèle hydraulique (rose)

4.3.3 Modélisation des ponts et ouvrages

Les ouvrages principaux ont été modélisés de la manière suivante :

- Les ponts par les données topographiques et la prise en compte des piles de pont ;
- Les seuils (lit mineur) et les trémies (passage lit majeur) directement dans la bathymétrie du modèle ;
- Les ouvrages annexes types buses, sont modélisés comme des ouvrages souterrains.

4.3.4 Le calage du modèle

Le calage du modèle consiste à assigner aux paramètres de calage (principalement le coefficient de frottement sur le fond, ici le coefficient de Strickler) les valeurs qui permettent au modèle de reproduire aussi fidèlement que possible les écoulements naturels observés tout en gardant un sens physique sous-jacent.

La reprise du calage du modèle 2D Telemac de CNR est décrite dans le rapport CNR de mai 2021 faisant une description de la modélisation hydraulique.

Ceci permet de :

- Maintenir une certaine homogénéité des résultats entre les modèles déjà existants ;
- Préciser les résultats sur des zones plus restreintes et au droit d'habitations grâce au maillage en 2 dimensions affiné.

Sur le Borne, tout en gardant une cohérence sur les coefficients de rugosité, le calage du modèle 2D CNR permet de reproduire les résultats du modèle HEC RAS avec une précision en moyenne inférieure à 20 cm pour 140 et 180 m³/s (Q100).

Sur l'Arve, le calage avec le modèle ISL s'est concentré sur la crue de mai 2015. Des différences de modélisation importantes ont été observées lors de la phase calage. Ces écarts sont principalement liés à une différence de paramétrisation du pas de temps de calcul. Des adaptations sur les coefficients de rugosités CNR ont permis de retrouver des niveaux similaires pour les deux modèles.

Les écarts entre les deux modèles sont inférieurs à 10 cm sur le linéaire, à l'exception de deux zones particulières :

- PKA 26.6-27.2 (correspond au linéaire de l'endiguement « Bois Jolivet A ») : le modèle CNR donne un exhaussement de la ligne d'eau par rapport à la référence. Le coefficient de Strickler n'a pas été augmenté artificiellement pour abaisser la ligne d'eau car le calcul du modèle ISL n'est probablement pas très fiable sur ce court linéaire. En effet, les vitesses sont élevées et le pas de temps de ce modèle semble trop fort pour cette crue notable (T>50ans).
- PKA24.5-25.2 : l'utilisation du récent levé LIDAR pour les parties non émergés met en avant une zone avec des atterrissements. La mise à jour de la bathymétrie sur ce linéaire explique les écarts entre les deux modélisations.

Etant donné ces observations, il est proposé de retenir une précision moyenne équivalente au Borne soit environ 20 cm jusqu'à la crue de calage de mai 2015 (période de retour supérieure à 50 ans).

L'occupation des sols est aussi intégrée dans la définition des coefficients de rugosité du champ majeur.

Le détail du calage et de la construction du modèle sont donnés dans l'annexe 1 (Note hydraulique) de l'ANNEXE 2 de la présente étude de dangers : DIGP 2022-186 -03 - Notice AVP Arve.

Le modèle utilisé inclut ces éléments :

- **Bathymétrie Arve : 2017**
- **Prise en compte de l'AVP du Borne**
- **Calage Strickler sur le Borne : 22 m^{1/3}/s (validé par SM3A au début des études)**
- **Calage Strickler sur l'Arve : 35 m^{1/3}/s (validé par SM3A lors de la réunion du 16/02/2022 et le rapport de CNR du 26/05/2021.**

4.3.5 Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés sous forme de profils en long. Ils sont disponibles au chapitre 3 du document A et sont rappelées ci-dessous.

Les profils en longs exposent :

- Les lignes d'eau pour différentes crues ;
- Le talweg de la rivière ;
- Le TN aval ;

- Les crêtes de digues actuelles ;
- Les crêtes de digues projetées.

Il est rappelé que l'arasement des digues de l'Arve, en état de travaux achevés, sera :

**A l'amont du pont de l'Europe : Niveau de la ligne d'eau en crue de projet : $Q_{100_Arve} + 0,8$ m
(équivalent à une Q400 de l'Arve)**

A l'aval du pont de l'Europe : Niveau de la ligne d'eau en crue de projet : $Q_{100_Arve} + 1$ m

Pour les digues du Borne, l'arasement des digues est fixé à $Q_{100_Borne} + 1$ m (supérieur à Q300 du Borne).

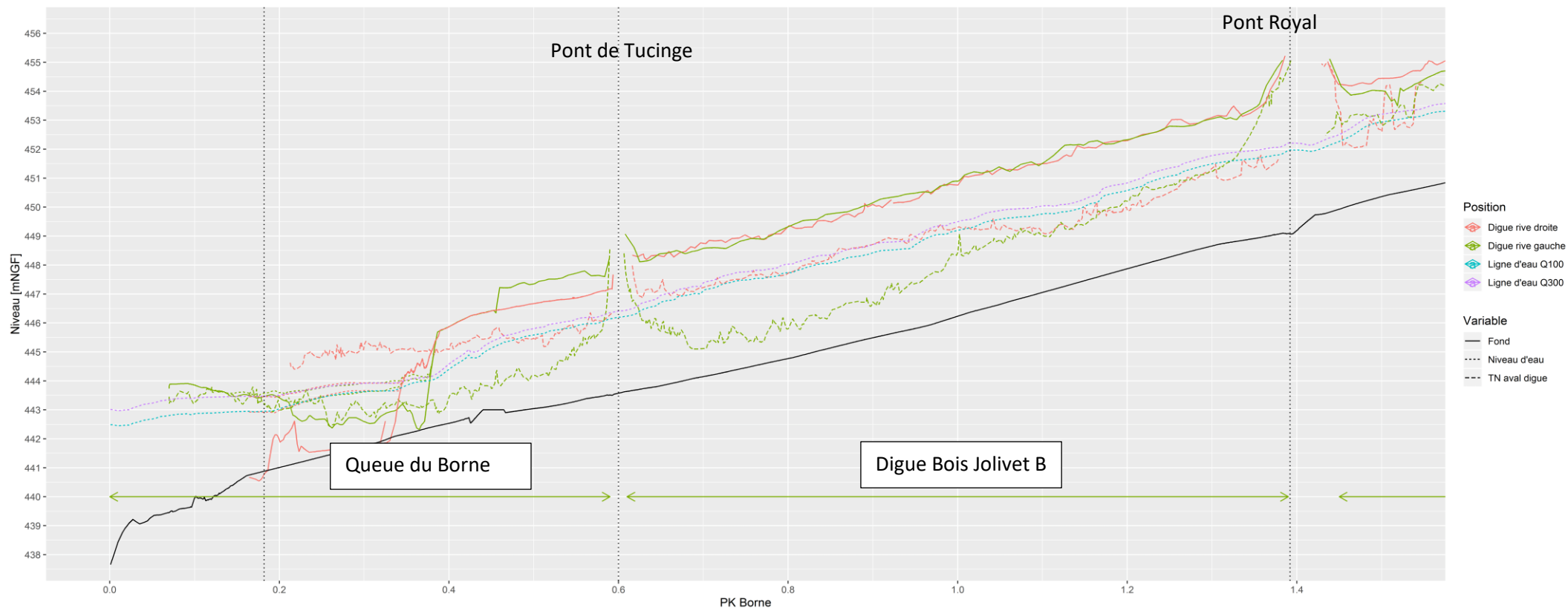


Figure 12 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - état actuel

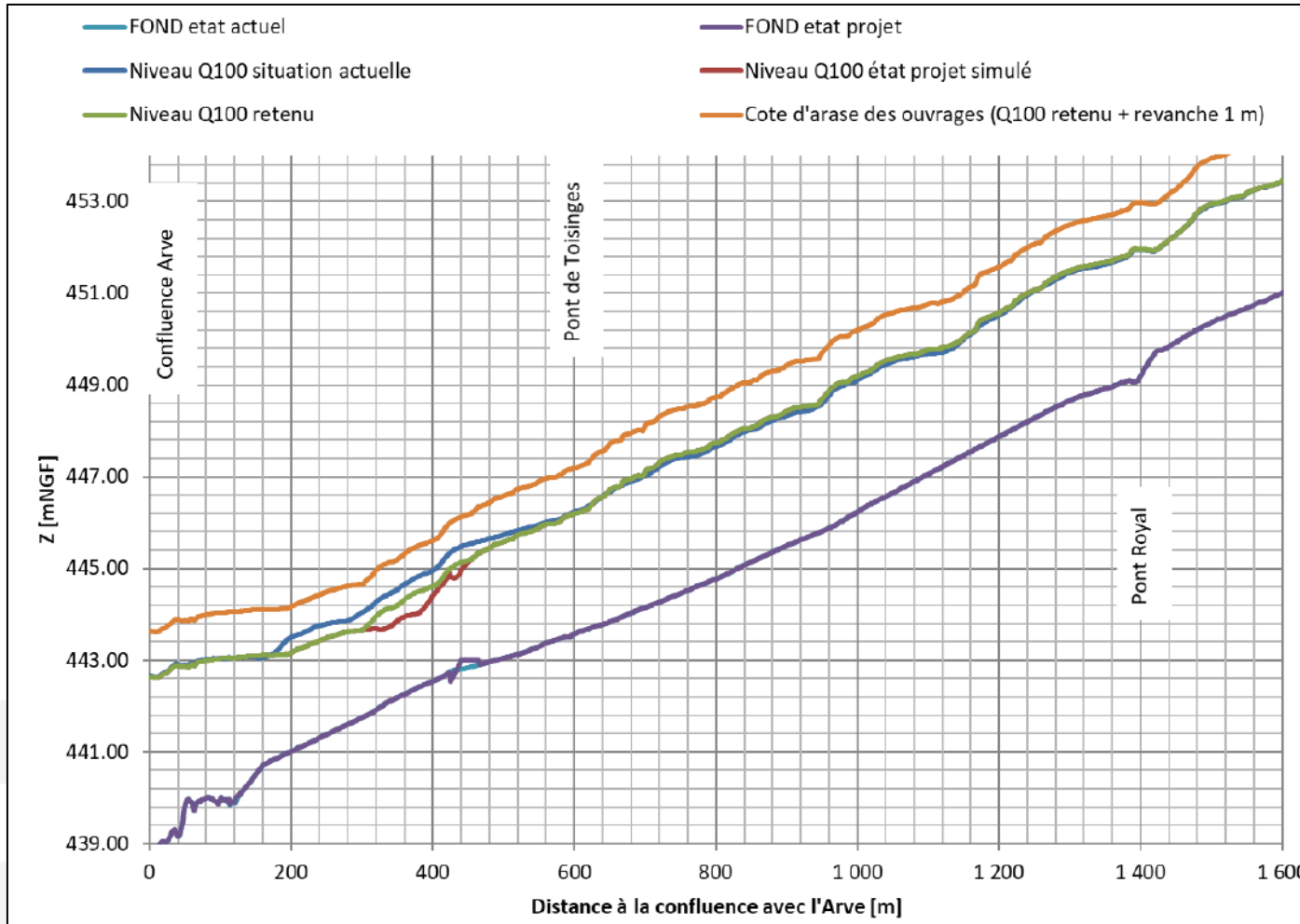


Figure 14 : Profil en long Borne (Source : CNR) – calage des digues projetées

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

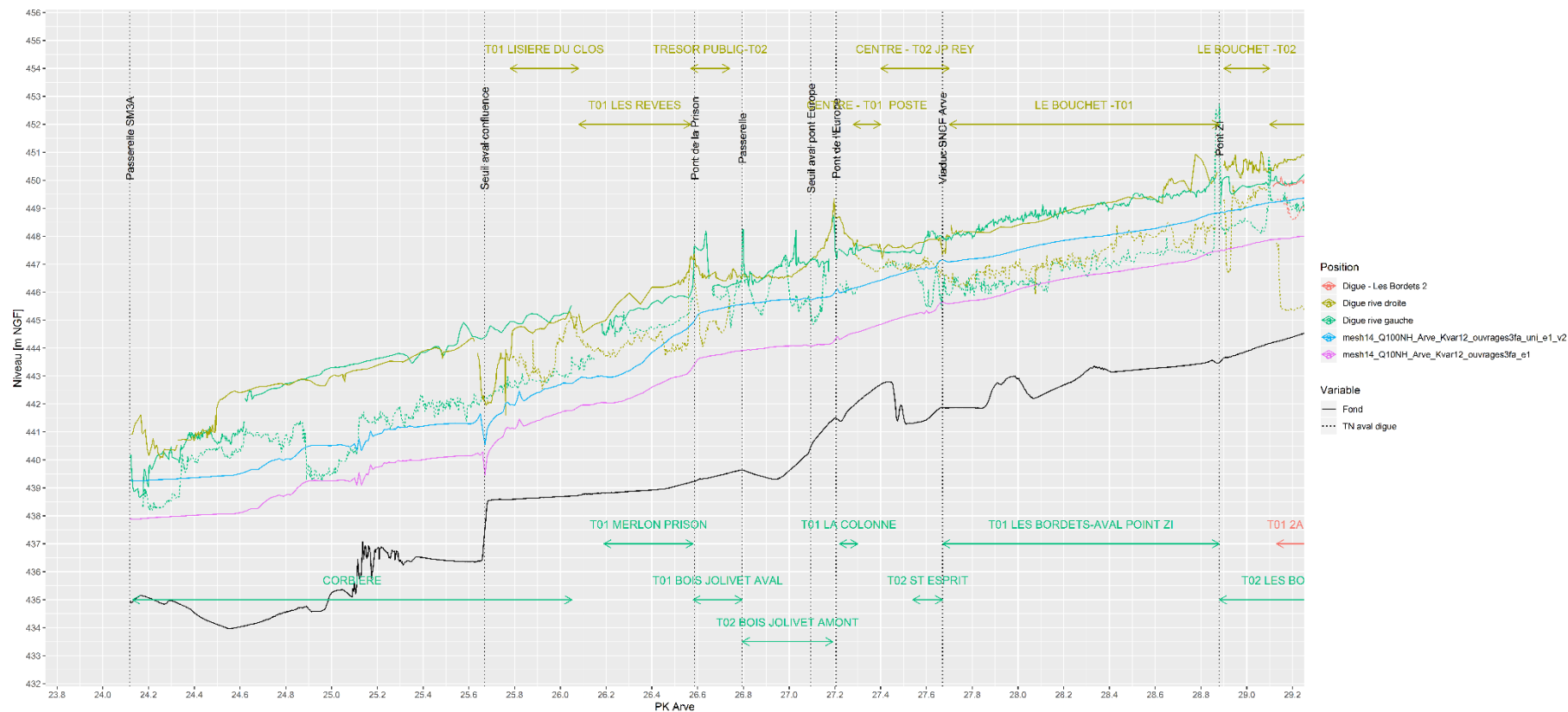


Figure 15 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

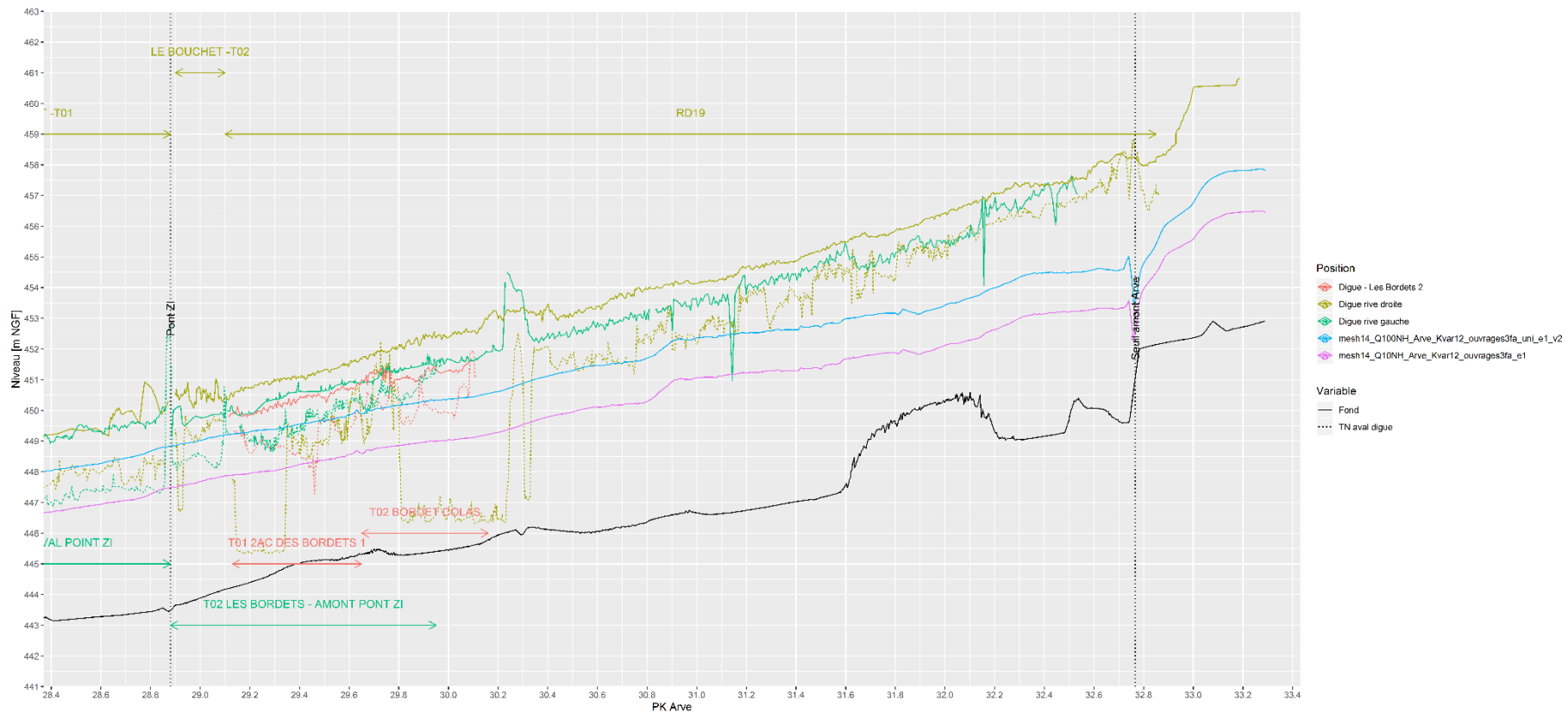


Figure 16 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel

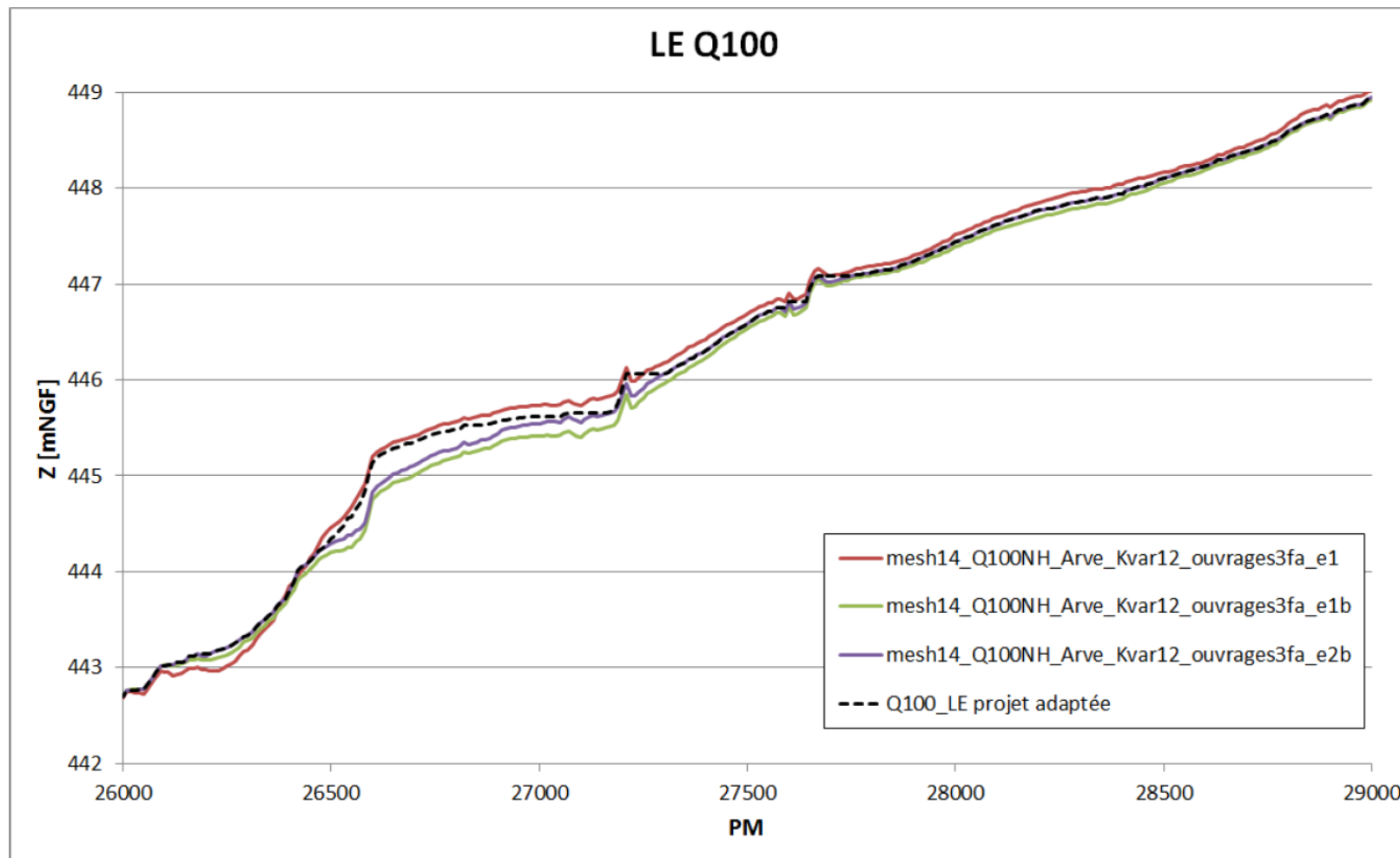


Figure 17 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue)

4.4 Risque sismique

L'impact d'un séisme sur les ouvrages est étudié au titre des obligations de l'arrêté de 2008.

4.4.1 Position des ouvrages vis-à-vis des séismes

La prise en compte de l'aléa séisme et la justification de stabilité des digues et barrages étaient jusqu'à présent peu codifiées et affaire de spécialistes.

Le décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 a défini un nouveau zonage sismique de la France allant de la zone 1 (sismicité très faible) à la zone 5 (sismicité forte). Les ouvrages du système d'étude Bonneville entre Arve et Borne se situent en zone 4 (sismicité moyenne).

La figure suivante présente les échelles de magnitudes, d'intensité et le zonage sismique en vigueur en France jusqu'au 22 octobre 2010, ainsi que la carte du nouveau zonage depuis cette date. La carte suivante présente les zones de sismicité au niveau de Rhône Alpes suivant cette nouvelle réglementation. En référence à cette carte on note que le secteur de Bonneville se situe dans une zone de sismicité moyenne.

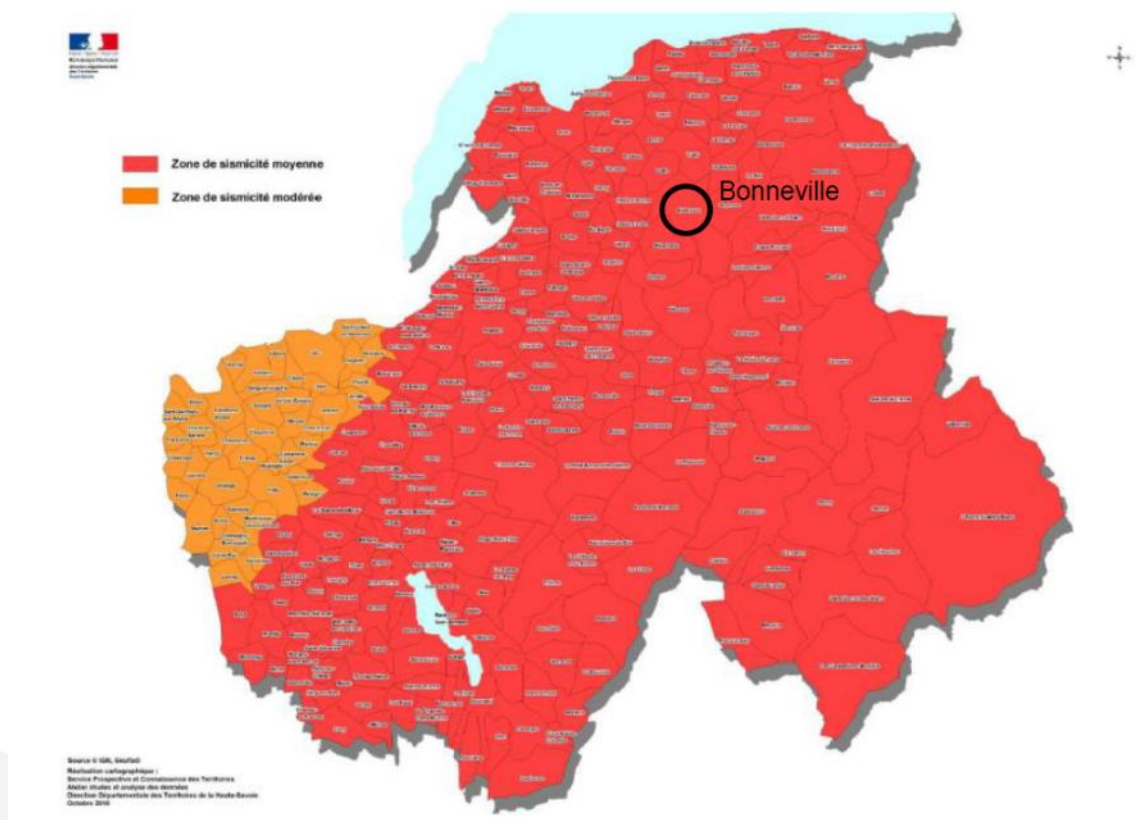


Figure 18 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source www.haute-savoie.gouv.fr

4.4.2 Evolution de la réglementation

Un projet d'arrêté ministériel fixe des prescriptions techniques auxquelles doivent satisfaire les barrages et les digues afin que leur sûreté soit assurée dans les cas de charge et d'exploitation prévisibles. Parmi les cas de charge et d'exploitation prévisibles, est abordé notamment le séisme. Ceci amènera le SM3A à compléter l'approche de la

question sismique qui est faite dans ses études de dangers. Notamment, la concomitance des phénomènes crues et séismes sera analysée pour évaluer la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté.

4.5 Mouvements de terrain

Un mouvement de terrain est un déplacement plus ou moins brutal du sol ou du sous-sol ; il est fonction de la nature et de la disposition des couches géologiques. Il est dû à des processus lents de dissolution ou d'érosion favorisés par l'action de l'eau et de l'homme.

Les bases de données du BRGM et de géorisques ont été consultées. Aucune zone présentant des risques d'instabilité (éboulement, affouillement ou glissement) n'a été identifiée sur les digues du secteur.

4.6 Les embâcles et leurs effets potentiels

Si le tirant d'air sous un pont est faible, des risques d'embâcles sont à craindre. Ces embâcles peuvent créer un exhaussement des niveaux et potentiellement des débordements.

Sur l'Arve et le Borne, 9 ouvrages type pont sont recensés. Les deux tableaux ci-après, présente les hauteurs d'air libres sous ces ouvrages pour les crues Q100 et Q200 (Borne et Arve).

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100	Q200	Tirant d'air Q100	Tirant d'air Q200
					870m ³ /s Arve 180m ³ /s Borne	972m ³ /s Arve 195m ³ /s Borne		
PA1	Pont ZI (D19)	Arve	28.9	451.15	448.75	449	2.40	2.15
PA2	Viaduc SNCF Arve	Arve	27.7	449.05	447.2	447	1.85	2.05
PA3	Pont de l'Europe	Arve	27.2	448.44	446	446.3	2.44	2.14
PA4	Passerelle	Arve	26.8	449.99	445.6	446	4.39	3.99
PA5	Pont de la Prison	Arve	26.6	447.24	445.4	445.8	1.84	1.44
PA6	Passerelle SM3A*	Arve	24.1	440.90	438.8	439	2.10	1.90

Tableau 7 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100	Q200	Tirant d'air Q100	Tirant d'air Q200
					180 m ³ /s	195 m ³ /s		
PB4	Pont D1203*	Borne	1.4	453.82	451.9	452	1.92	1.82
PB4	Pont D1203*	Borne	1.3	454.17	451.9	452	2.27	2.17
PB5	Pont de Toisinges	Borne	0.6	447.63	446.5	446.6	1.13	1.03

*Il s'agit de deux ouvrages avoisinants, un dans chaque sens de circulation sur RD1203

Tableau 8 : Ponts présents sur la zone d'étude – Borne

Suivant ce tableau, les hauteurs d'eau minimales d'air libre pour la Q200 sont :

- 1.44 m sous le pont de la Prison pour l'Arve ;
- 1.03 m sous le pont de Toisinges pour le Borne.

Ces hauteurs sont largement suffisantes pour évacuer les potentiels sujets ligneux qui se retrouveraient dans les cours d'eau en crue. Le risque d'embâcle est donc improbable sur les ouvrages identifiés.

Il est à noter qu'un diagnostic de la végétation a été réalisé par la société Arbeausolution. Suivant ce diagnostic, environ 2 383 sujets ont été recensés sur les digues du système d'endiguement. Parmi ces sujets, 77% présentent un diamètre inférieur à 50 cm et environ 1% des sujets présentent un diamètre supérieur à 1 m. De plus, un plan de gestion de la végétation est mis en place par le SM3A sur le Borne et sur l'Arve afin de limiter tout risque d'embâchement.

4.7 Les évolutions morphologiques du lit de l'Arve et du Borne

Evolution historique du profil en long de l'Arve à hauteur du système d'endiguement étudié 1990-2009 Hydratech pour S.M.3.A., Analyse des évolutions topographiques du lit de l'Arve, Réf. 0163102, Juillet 2013.

L'évolution entre 1990 et 1998 montre un très léger enfoncement du lit à l'amont de Bonneville et un travail en cours de l'Arve tendant à réduire la pente du lit à l'aval du seuil d'Anterne (enfoncement suivi d'un exhaussement du lit).

Entre 2000 et 2009, le seuil de Marignier a été réalisé au PK 32.8 pour stabiliser le lit et freiner les érosions régressives en cours dans la zone de confluence du Giffre, qui venaient à déstabiliser le seuil d'Anterne en amont.

Les suivantes décrivent les évolutions prévisibles sur l'Arve à partir de la comparaison entre 2000 et 2009, dans le secteur de Bonneville. Les principales conclusions sont résumées de la manière suivante :

- **Seuil du Borne (Bonneville) – PK 25.40 à 25.66**
 - Aval du seuil du Borne (PK25.66 à PK25.4) : Incision de l'aval du seuil de 40 cm entre 2000 et 2009. Incision potentielle de 1 m probablement pas atteinte ;
 - Il n'y a pas de risque car non atteinte des niveaux bas.
- **Prison de Bonneville – PK25.66 à PK 27.21**
 - Stabilisation en amont du seuil du Borne ;
 - Réalisation d'un contre seuil du pont de l'Europe en 2004 ;
 - Légère exhaussement des fonds sur 400 ml en aval du contre seuil du Pont de l'Europe (entre 40 et 60 cm).
- **Aval du Bronze – PK25.66 à PK 27.21**
 - Stabilisation en amont du contre seuil de l'Europe ;
 - En aval de la confluence avec le Bonze, l'Arve a atteint un profil d'équilibre ;
 - Potentiel engrèvement de 50 cm entre les PK30.5 et 28.6.

En conclusion, sur l'Arve, l'incision semble relativement limitée. Des engravements potentiels de 50 cm peuvent être observés sur 400 m en aval du contre seuil du pont de l'Europe et en aval du Bonze.

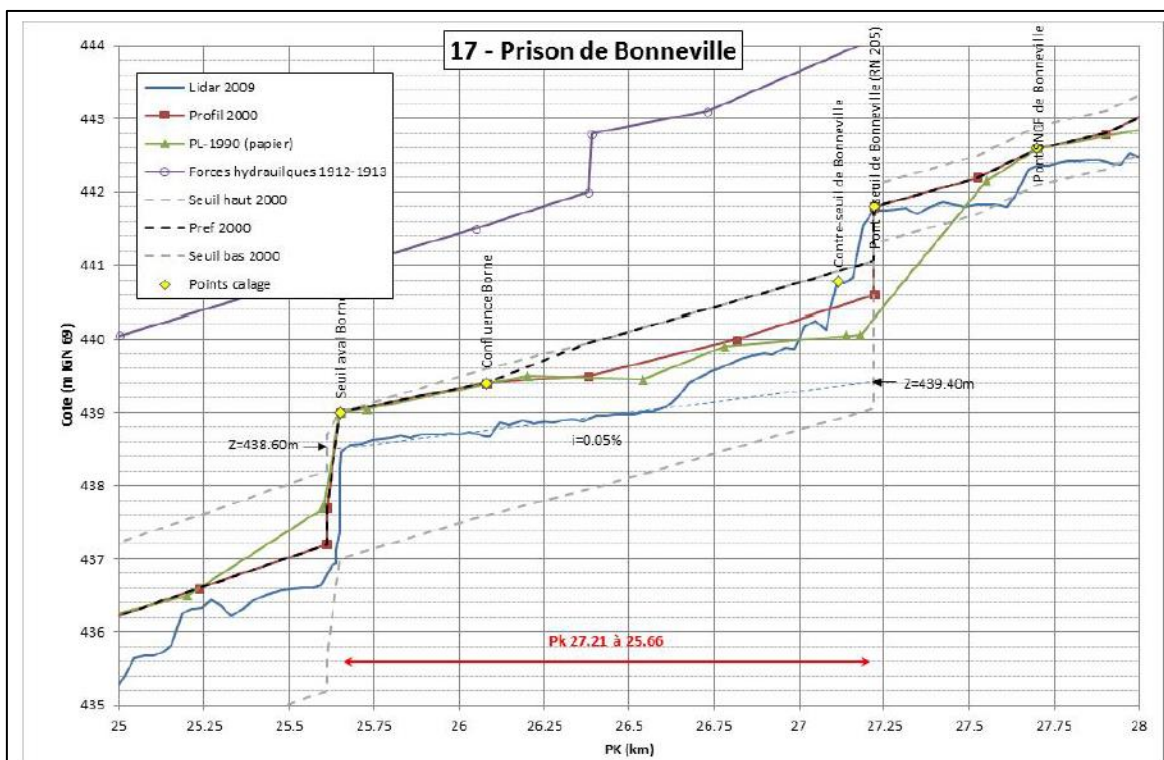


Figure 19 : Profil en Long - Evolution morphologique - Prison de Bonneville – Source Hydratech – Juillet 2013

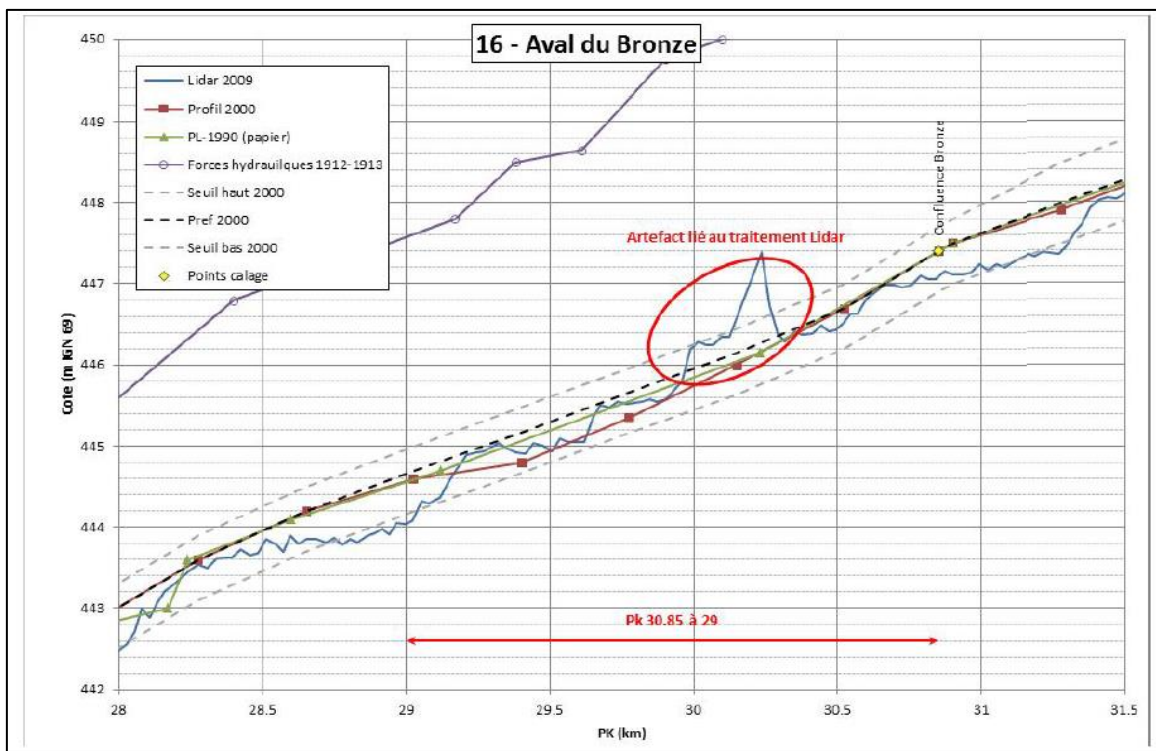


Figure 20 : Profil en Long - Evolution morphologique – Aval Bonze – Source Hydratech – Juillet 2013

Evolution historique du profil en long du Borne à de la sortie des Gorges du Haut-Rumily jusqu'à la confluence avec l'Arve 1989-1998.

Le transport solide est très important en amont des gorges du Haut-Rumily mais diminue fortement à leur sortie (zone du cône de déjection du Borne). En effet on y retrouve directement une plage de dépôt qui limite la propagation de matériaux plus en aval.

SOGREAH estime en 1998 que le profil en long topographique du Borne est stable dans la zone du système d'endiguement de Bonneville entre Arve et Borne depuis les précédents relevés effectués en 1989, et confirme une absence de modifications majeures de la section hydraulique.

Amont du pont de l'A40 :

Trois observations sont faites :

- La crue de 1987, avec un charriage très dense provenant des érosions du Petit-Bornand et d'Entremont, est venue déposer beaucoup de matériaux jusqu'en aval du Seuil Métral. Ce secteur serait donc à recharger en cas d'évènement similaire.
- ⇒ Ce phénomène a créé par la suite un processus de reprise de dépôt des matériaux du lit, s'atténuant d'amont en aval jusqu'au pont de l'A40. Sur cette zone on a donc une pente du cours d'eau plus élevée.

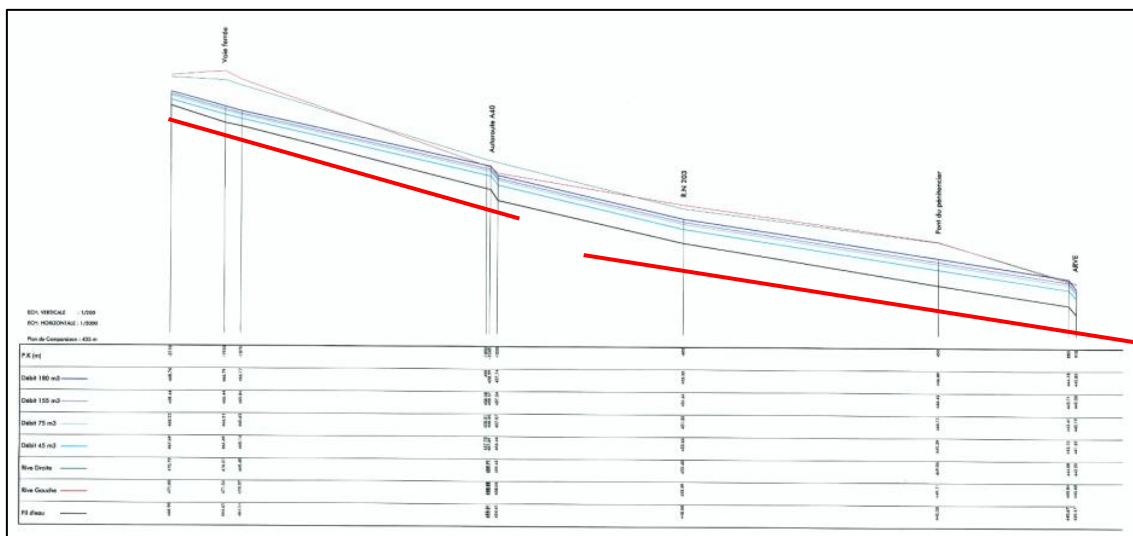


Figure 21 : Profil en long du Borne à hauteur de la zone d'étude – SOGREAH 1998

*L'hypothèse étant faite que la ligne d'eau est parallèle à la cote de fond du cours d'eau

La crue vient déposer des sédiments qui augmentent la pente du cours d'eau. Une augmentation de la pente induisant une augmentation des vitesses et favorisant l'incision. Cela démontre une fluctuation du transport solide et de la respiration résultante du lit dans cette zone, qui sont trop dépendantes des caractéristiques propres de chaque crue pour pouvoir être correctement anticipés.

Ce processus est à l'origine, à l'époque, des deux observations suivantes :

- Un curage en pied du pont de Monaz devrait être réalisé (engravement) ;
 - Un renforcement en pied du pont SNCF devrait être réalisé (incision).
- ⇒ Deux phénomènes antinomiques que l'on peut observer dans un périmètre géographique restreint.

Dans un contexte plus général, sans évoquer ces phénomènes cycliques, le profil en long du Borne à Bonneville peut être interprété de la façon suivante :

- Une plage de dépôt alimentée en permanence par le charriage amont, qui vient limiter le transport solide en aval à la sortie des Gorges du Haut-Rumilly ;
- Une incision progressive du fait de l'endiguement du Borne et des extractions de matériaux dans son lit. Le cours d'eau cherchant à retrouver son équilibre naturel.

Pour contrer ce phénomène plusieurs ouvrages de corrections torrentielles sont mis en place :

- ⇒ Le Seuil Métral (PK 4.1) dans un premier temps. Sa construction a induit un petit phénomène d'incision à l'aval, aujourd'hui partiellement stabilisé ;
- ⇒ Le seuil du Diable, à la sortie des Gorges, mis en place en 2016 à l'amont du Seuil Métral.
 - **La construction récente de cet ouvrage n'a pas encore permis au lit de se stabiliser, une incision est prévisible directement à l'aval entre les deux seuils.**

Aval du Pont de l'A40 :

Dans ce secteur, la pente du cours d'eau diminue (Figure 21) à l'approche de la confluence, favorisant la dépose de sédiments. Le risque d'engravement est présent.

A noter que latéralement, en aval de la confluence Arve borne, la présence du seuil du Borne et la confluence favorise la création d'une zone de dépôt préférentielle qui s'engraisse, à dire d'expert, peu à peu à la vue des photos réalisées durant la VTA de 2017 par CNR.



Figure 22 : Photographie de la confluence Borne/Arve - CNR

Une récente étude a été menée sur le Borne en 2018 par ETRM reprend des conclusions similaires sur la partie appelée « Cône de déjection ». Le profil en long suivant est extrait de cette étude.

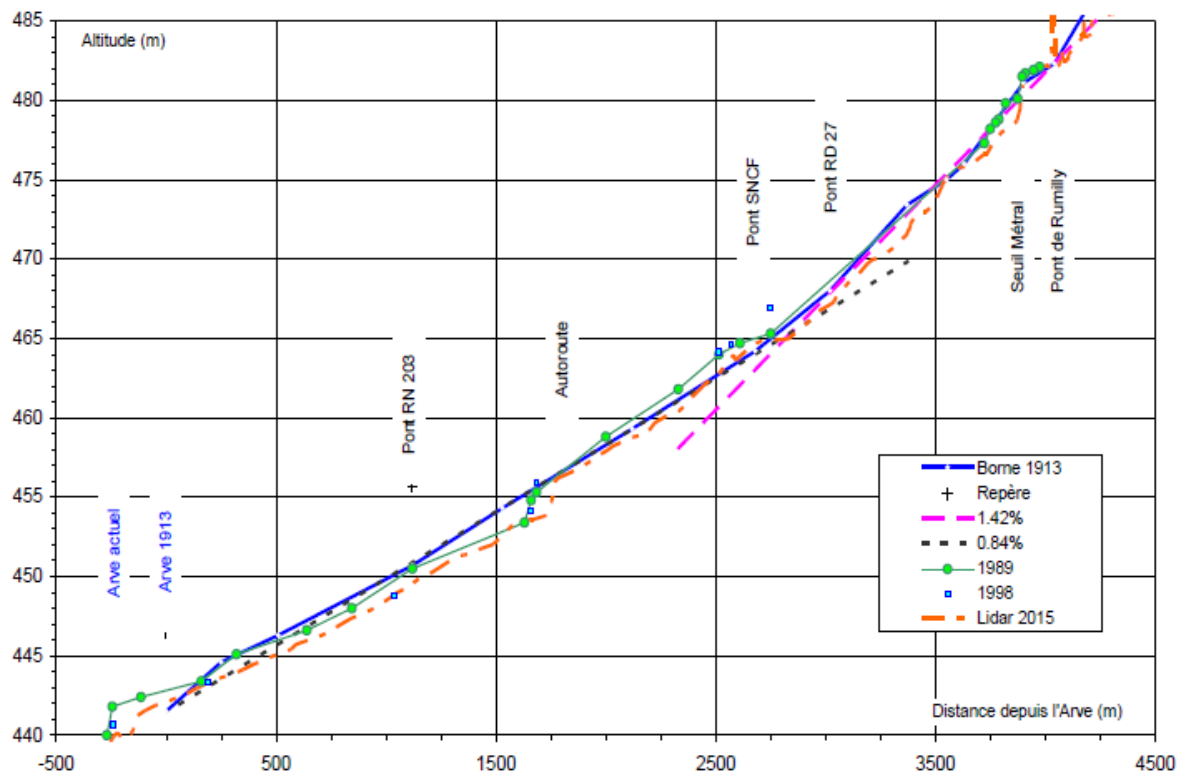


Figure 23 : Évolution des niveaux sur le cône de déjection Borne – ETRM

Les principales conclusions de cette étude sont rappelées ci-dessous

- « Dans la partie amont, les niveaux paraissent très stables notamment dans le secteur du seuil Métral où des travaux ont pu conduire à des évolutions de niveaux artificielles mais très localisées :
- Du seuil Métral jusqu'au pont SNCF, la tendance est au creusement du lit, sous l'effet de l'endiguement mais aussi vraisemblablement à causes d'extractions passées. En effet, le prélèvement - même de faibles volumes - de matériaux dans un lit pavé conduit très rapidement à un **abaissement "définitif"** du fil d'eau d'étiage. (...)
- Du pont SNCF jusqu'à l'autoroute, le niveau de 2013 est peu différent de celui de 1989 (...)
- En aval, le lit est encaissé de façon très régulière jusqu'au niveau de l'Arve, ce qui semble correspondre à un nouvel équilibre. Il convient cependant d'être prudent à ce sujet car il semblerait que le niveau se soit abaissé depuis 1989. Un suivi de ce secteur semble incontournable. Notons que les projets d'aménagements piscicole, en augmentant les pertes de charge, devrait conduire à une remontée du lit (ou au moins à une stabilisation). Un seuil de faible hauteur est visible juste en amont de la confluence.
- Comme toutes les confluences, celle de l'Arve avec le Borne peut connaître un engravement important en cas de crue de ce dernier. Le seuil situé dans la rivière juste en aval de la confluence réduit cependant l'ampleur d'un dépôt potentiel. »

Ainsi, suivant cette étude, le profil en long du cône de déjection du Borne présenterait une relative stabilité jusqu'au pont autoroute. En aval, l'incision constatée pourrait se

stabiliser par la mise en place des aménagements piscicoles prévus. À la suite d'une crue des dépôts limités pourraient être observés.

Conclusion sur les risques d'engravement

Le profil en long de l'Arve est aujourd'hui globalement stable. Les zones d'engravement potentielles de l'ordre de **50 cm** sont localisées **en aval de la confluence avec le Bronze (PK30.5 à 28.6)** et **en aval du contre seuil du pont de l'Europe sur 400 m (PK27.1 à PK26.7)**. A noter que les dispositions du SAGE, RIV 4 à RIV 6 du sous-objectif « Restaurer la morphologie des cours d'eau dégradés », doivent permettre d'étudier si, sur le long terme, une hausse du transport solide est envisageable.

A noter également la présence du cône de déjection du Giffre situé un peu plus en amont (PK33). En cas de crue trop violente il pourrait se déstructurer et venir se déposer dans le périmètre d'endiguement relatif à l'EDD.

Le profil en long du Borne sur le secteur de Bonneville est globalement stable à l'heure actuelle. La zone la plus à risques en termes d'engravement se situe à l'aval du pont de l'A40 jusqu'à la confluence avec l'Arve ou la pente du cours d'eau diminue, favorisant la dépose de sédiments. En période de crue ces phénomènes seraient plus marqués. Cet engravement est estimé à **environ 50 cm** d'épaisseur en corrélant avec les évolutions prévisibles de l'Arve.

4.8 Les laves torrentielles et leurs effets potentiels

Sans objet.

5. DESCRIPTION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Toutes les cotes indiquées dans ce document sont exprimées dans le système de nivellement IGN69.

5.1 Ouvrages existants

5.1.1 Identification et localisation des ouvrages

Le système d'endiguement **Bonneville entre Arve et Borne** est situé entièrement sur la commune de Bonneville dans le département de la Haute-Savoie (74). Il est référencé sous l'identifiant : **ARVE-RG-BONNE-26.24**.

La figure ci-dessous présente les ouvrages « digues » actuelles du système d'endiguement.

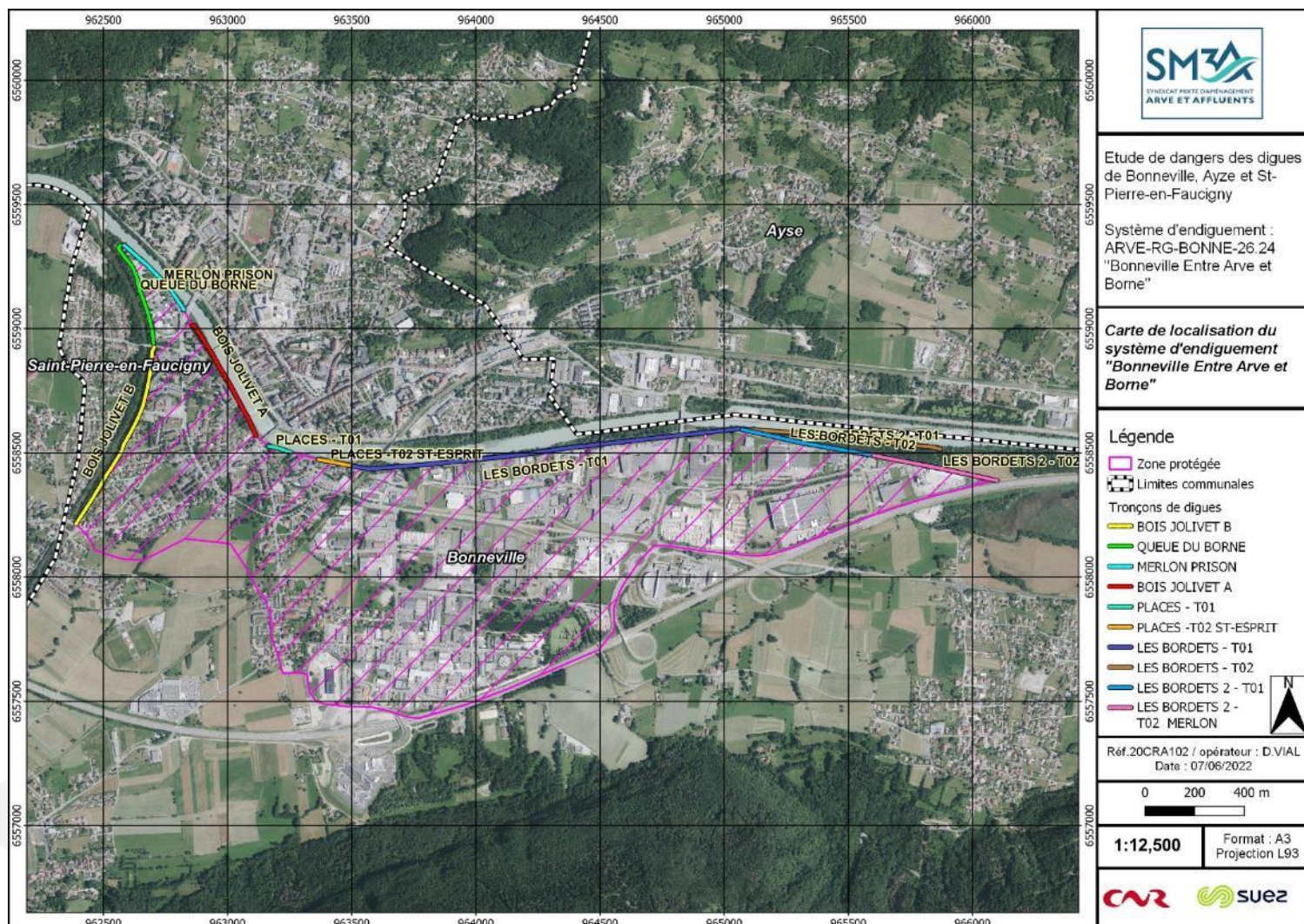


Figure 24 : Carte de localisation des tronçons du système d'endiguement de Bonneville Entre Arve et Borne – état actuel

5.1.2 Caractéristiques des digues actuelles (avant travaux)

Ce paragraphe est en partie extrait du dossier d'ouvrage du système d'endiguement de Bonneville entre Arve et Borne, de l'étude historique et des visites réalisées sur les digues en 2017 par la CNR.

5.1.2.1 Historique

Les digues de l'Arve et du Borne constituent des digues dites « sèches » (ou de protection contre les inondations) dans la mesure où elles ne maintiennent pas une charge hydraulique permanente entre la rivière et le côté terre (val). Elles assurent ce rôle de manière temporaire en période de crue lors des plus hautes eaux.

Le début de l'endiguement le long de l'Arve et du Borne est probablement très ancien, antérieur à la période Sarde. Les premiers programmes importants de travaux le long de l'Arve datent du XVIII^{ème} siècle. Ultérieurement, 30 km de digues furent construits entre 1824 et 1872 le long de l'Arve. Les éléments plus précis de l'étude historique sont présentés dans l'étude ACTHYS Diffusion.

Jusqu'à cette période, les riverains de la rivière étaient très souvent affectés par les conséquences des crues, où ponts, maisons et berges étaient très souvent emportés par les crues, les lits de l'Arve et du Borne divaguant largement dans la vallée. C'est pourquoi d'importants travaux de rectification de berge furent entrepris pour fixer une fois pour toutes le pied du lit de l'Arve et du Borne.

D'une manière générale, les observations sur le site rendent compte de la protection en maçonnerie des parements amont, avec de nombreux murs/murets et perrés le long des cours d'eau.

Cet endiguement progressif correspondait de plus à une nécessité de canaliser les eaux en période de crue, dont les lits s'exhaussaient largement et continuellement, compte tenu des importants apports de matériaux issus du bassin versant.

Mais ce fut au cours des années 1970, lors de la construction de l'autoroute Blanche, que l'on multiplia les protections le long des berges de l'Arve.

5.1.2.2 Digue des Bordets 2 - T02 Merlon

Type : Digue remblais

- Date de construction : > 2011 ;
- Cours d'eau : Arve rive gauche ;
- Limite amont : A40, en retrait par rapport à la berge de l'Arve ;
- Limite aval : déchetterie Bordets ;
- Ouvrage récent composé d'un talus de faible hauteur, constitué de remblais issus de la construction de l'extension de la zone d'activité située à proximité ;
- Le linéaire total est de 519 m pour une hauteur maximum de 1,1 m et un fruit du talus 2H/1V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 0,8m pour une hauteur minimum de 0,2m ;
- Les reconnaissances géophysiques ne semblent pas indiquer la présence de réseaux ;
- Une voie de circulation en crête, où des engins et des piétons peuvent circuler ;
- Pas de végétation, si ce n'est la présence d'herbe ;
- Un point bas sur l'amont du tronçon permet le passage des engins agricoles.

A noter la présence d'un point bas à hauteur de la jonction avec l'autoroute blanche au niveau du chemin d'accès réservé à la maintenance des ouvrages.



Figure 25 : Bordets 2 - T02 Merlon : Profil historique - Acthys Diffusion / Photo du profil de digue vue vers l'aval (CNR)

5.1.2.3 Digue des Bordets 2 - T01

Type : Digue en remblais, prolongement du tronçon T02 Merlon : géométrie identique.

- Date de construction : 2004-2010
- Cours d'eau : Arve rive gauche
- Limite amont : déchetterie Bordets
- Limite aval : amont champ cultivé en bordure de l'Arve
- Talus de faible hauteur qui pourrait être constitué des matériaux de déblais issus des travaux du parc d'activités. On notera à l'aval de l'ouvrage, un talus en terre plus élevé, rajouté très récemment, sans doute début 2017.
- Le linéaire total est de 538m pour une hauteur maximum de 1,1m et un fruit du talus 3H/2V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 0,8m pour une hauteur minimum de 0,2m.
- Les reconnaissances géophysiques ne semblent pas indiquer la présence de réseaux
- Une voie de circulation, où des engins peuvent circuler, se situe à proximité directe et la circulation piétonne est possible en crête.
- Présence de nombreux arbres côté rivière (saules, peupliers) mais qui ne semblent pas influencer sur la stabilité de l'ouvrage.

5.1.2.4 Digue des Bordets - T02

- Digue en remblais avec dénivelé aval très faible (assimilable à une berge)
- Date de construction : 1833-1835
- Cours d'eau : Arve rive gauche
- Limite amont : amont champ cultivé en bordure de l'Arve
- Limite aval : amont bâtiment SOCOPA viandes
- Ouvrage qui date de la période sarde, non réhabilité malgré plusieurs projets. Le profil des digues est trapézoïdal, avec enrochement en jetée rangé en forme de glacis côté rivière et en mur taluté côté plaine. Aujourd'hui c'est toujours l'ouvrage initial qui est en place, mais très détérioré : les enrochements et les murs sont complètement déstructurés et certains endroits ne s'effondrent pas uniquement grâce à la végétation. Les réparations aux brèches survenues lors des crues de 1852, 1859, 1863 et 1866 consistent généralement en un talus en perré maçonné

côté rivière avec rechargement en enrochements. Ces réparations sont ponctuelles.

- Le linéaire total est de 817m pour une hauteur maximum de 1m et un fruit du talus 1V/1V à subvertical. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 0,8m.
- Pas de chemin en crête, mais circulation théorique d'engins possible en pied côté talus aval.
- De nombreux ligneux instables sont implantés en crête de l'ancienne digue embroussaillée côté terre et côté rivière (centenaires pour certains). Le talus côté rivière est haut et pentu. En cas d'affouillement de la base un glissement d'ensemble pourrait avoir lieu.



Figure 26 : Les Bordets T02 : Profil historique - Acthys Diffusion



Figure 27 : Les Bordets T02 : Profil de digue très végétalisé en crête comme en talus amont (CNR)

5.1.2.5 Digue des Bordets – T01

Type : digue en remblais

- Date de construction : 1835-1836, 1875-1876
- Cours d'eau : Arve rive gauche
- Limite amont : amont bâtiment SOCOPA viandes
- Limite aval : viaduc SNCF
- La digue est établie à la période sarde. Sa partie amont, réalisée en enrochements grossiers, n'a pas connu de modifications majeures depuis (A).

L'ancienne confluence du Bronze marque la limite des travaux de rehaussement et de renforcements réalisés en aval en 1876 (B), la digue initiale est remblayée et un glacis en pierre maçonnée est mis en place sur la pente amont. Les deux zones d'incertitudes (ancienne confluence du Bronze, pont de la RD19) sont représentées par un « ? » sur la Figure 28.



Figure 28 : Localisation des différentes formes de digues secteur BORDET - T01

Les très nombreuses brèches qui se sont produites lors des crues des années 1850 et 1860 ont été réparées avec des techniques variées : pieux et fascines côté Arve ou plaine, perré, rechargement en enrochements, création ou exhaussement du talus, etc. Les linéaires de ces multiples réparations n'excèdent parfois pas quelques mètres. Ils ne seront pas représentés sur les profils généraux (Figure 29). Ce tronçon est fortement érodé en pied avec un phénomène de sous-cavage important (Figure 30).

- Le linéaire total est de 1563m pour une hauteur maximum de 2,4m et un fruit du talus 3H/2V à subvertical. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 2m (0.7m en partie A).
- Présence d'un chemin en crête ainsi que d'une voie circulaire côté talus aval, permettant l'accès à différents engins.
- Nombreuses broussailles que ce soit côté talus amont ou aval avec une densité importante de hauts ligneux venant déstructurer le perré, accentuant le risque de glissement de l'ensemble du talus.



Figure 29 : Les Bordets T01 : Profil historique - Acthys Diffusion



Figure 30 : Les Bordets T01 : Vu depuis la rive droite, zone de SOCOPA – CNR

5.1.2.6 Digue des Places -T02

Type : Digue en remblais circulable. Prolongement des Bordets T01 en partie amont, couronnée par du béton en partie aval (quai).

- Date de construction : 1740, 1840-1842, 1875-1876, fin XXème
- Cours d'eau : Arve rive gauche
- Limite amont : haut rue Paul Verlaine
- Limite aval : bas rue Paul Verlaine
- Aujourd'hui, le couronnement de l'ancienne digue (merlon) est bien visible, avec localement quelques perrés apparents. Le talus incliné, construit au-dessus du mur droit, est également discernable, tout comme les aménagements de la fin du XXème siècle, formant risberme. On constate l'abaissement du lit de l'Arve, avec au droit de cette digue une zone de dépôt alluvionnaire. Une promenade en béton a été établie au-dessus du couronnement de la digue lors de la construction de la barre d'immeubles. Le faible dénivelé entre le sommet du talus et la route est sans doute à rattacher à un remblaiement survenu lors de l'urbanisation du quartier dans les années 1990. Les ouvrages en bois et pierre réalisés au XVIIIème siècle sont peut-être présents localement au-dessous du mur droit. Le talus en pied de franc bord est érodé.
- Le linéaire total est de 139m pour une hauteur maximum de 1,4m et un fruit du talus 1H/1V à vertical. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1m.
- Présence d'un chemin en crête ainsi que d'une voie circulable côté talus aval, permettant l'accès à différents engins. Il faut noter la présence de barrières qui devraient être retirées en cas d'intervention.
- Plusieurs arbres sont implantés côté rivière (frênes, tilleuls) et côté terre (alignement de tilleuls), mais dans l'ensemble la digue est bien visible et la densité d'arbres localisés sur le perré est assez faible pour ne pas nuire à la stabilité globale.

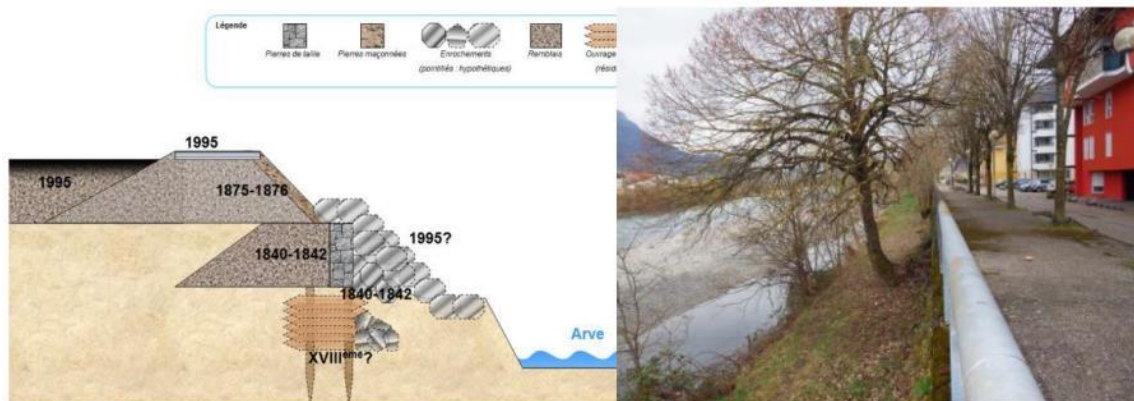


Figure 31 : Les Places T02 : Profil historique - Acthys Diffusion / Profil de digue – CNR

5.1.2.7 Digue des Places - T01

Type : Digue en terre partiellement circulaire (présence d'un parking sur les 40m aval)

- Date de construction : XVIIIe, 1840-1842, 1875-1876, 1995
- Cours d'eau : Arve rive gauche
- Limite amont : Monastère
- Limite aval : 1ère maison à 50 m environ en amont du pont
- Aujourd'hui, on distingue la partie amont de la digue au profil vertical, de la partie aval plus inclinée (Figure 32 et Figure 33). Dans les deux cas, les ouvrages plus récents peuvent recouvrir partiellement ou totalement des portions de la digue établie dans les années 1820, sans qu'on puisse toutefois en préciser l'emplacement exact. L'enfoncement du lit depuis de la seconde moitié du XXème siècle explique le caractère perché des ouvrages au-dessus du lit de l'Arve avec la création d'une petite risberme naturelle. D'après les visites sur site, l'ouvrage semble en bon état.
- Le linéaire total est de 94m pour une hauteur maximum de 1,4m et un fruit du talus 1H/1V à vertical. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1m.
- Pas de chemin en crête, mais un accès possible à différents engins sur les 40 derniers mètres à l'aval juste avant le pont au niveau du parking.
- Présence de groupements d'arbres (gros diamètres > 1m) implantés dans le mur, certes avec une faible densité, mais venant créer une déstructuration très importante des pierres de tailles appareillées.

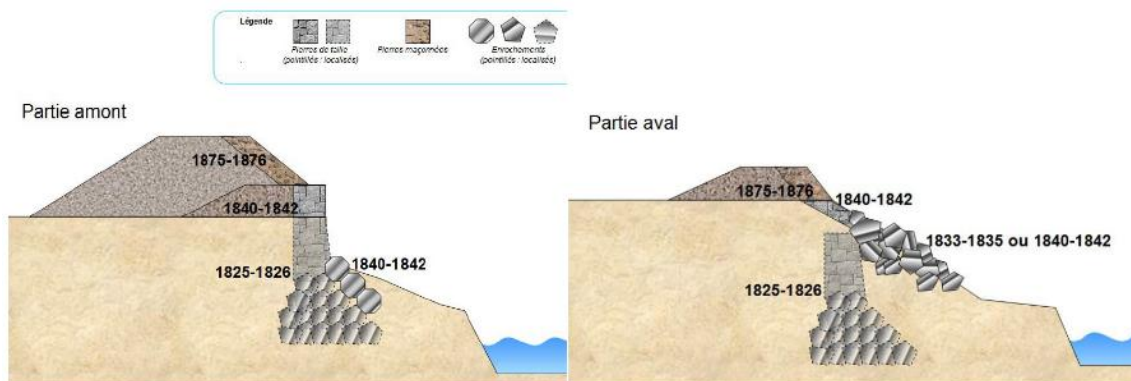


Figure 32 : Les Places T01 : Profils historiques - Acthys Diffusion



Figure 33 : Les Places T01 : Profil de digue aval / amont – CNR

5.1.2.8 Digue du Bois Jolivet A

Type : Digue remblais partiellement circulaire

- Date de construction : 1852, 1874, 1879, 1980, 2004-2006
- Cours d'eau : Arve rive gauche
- Limite amont : Seuil aval pont de Bonneville
- Limite aval : amont rond-point pont prison
- Structure très complexe bâtie en plusieurs étapes clefs (Figure 34) :
 - Partie A : de son origine (seuil) à la portion détruite en 1863 (environ 40 mètres) ;
 - Partie B : de ce point au raccordement (environ 30 mètres) ;
 - Partie C : la partie constituée des deux couches (construction en 1852, rehaussement en 1874), sur 220 mètres ;
 - Partie D : partie prolongée en 1879, non reprise en 1980 (environ 100 mètres) ;
 - Partie E : partie prolongée en 1879, reprise en 1980 (environ 80 mètres) avec talus en remblai du XXIème siècle ;
 - Partie F : partie construite en 1980 avec talus en remblai du XXIème siècle (environ 50 mètres).

Les différents profils sont disponibles plus en détails Figure 36.



Figure 34 : Localisation des différentes formes de digues secteur BOIS JOLIVET A

La plupart du linéaire est fortement érodée en pied malgré les recharges récentes en enrochements. A noter cependant la présence d'une risberme ayant une portée non négligeable (>15m).

- Le linéaire total est de 517m pour une hauteur maximum de 1,5m et un fruit du talus très grand à l'aval et d'environ 2H/1V à 3H/1V à l'amont. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1m.
- Pas de chemin en crête (forêt), ni de voie de circulation à proximité, excepté sur les 100 derniers mètres à l'amont.
- Sur l'ensemble du linéaire, autant en talus amont qu'aval, il faut noter la présence de nombreux arbres de diamètres important (70cm-120cm) venant détruire les zones perrayées et dont les racines se propagent dans le cœur de la digue (Figure 35).



Figure 35 : Bois Jolivet A : Vue en crête du profil de digue – CNR

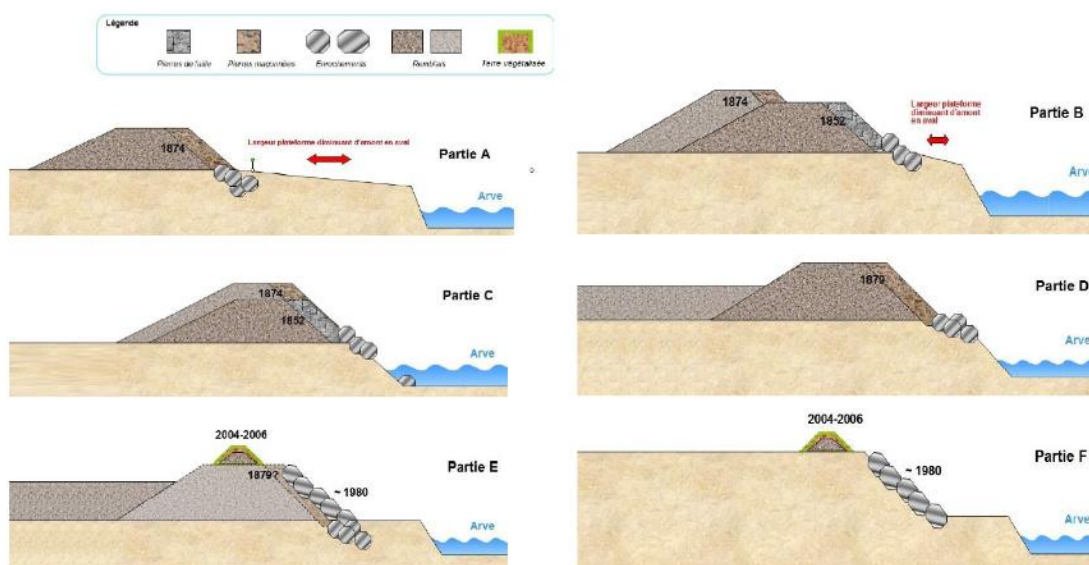


Figure 36 : Bois Jolivet A : Profils historiques - Acthys Diffusion

5.1.2.9 Digue du Merlon Prison

Type : Digue en enrochements remblayés

- Date de construction : fin années 1970, 2004/2006
- Cours d'eau : Arve rive gauche
- Limite amont : Pont prison
- Limite aval : confluence Borne
- Composition : Aujourd'hui, on constate une très importante dégradation des enrochements mis en place en 1976 ainsi qu'un abaissement du lit de l'Arve pouvant aller de 2m à 3m. De ce fait les fondations en béton des enrochements en pied, ont partiellement glissées dans le lit (Figure 37).
- Le linéaire total est de 390m pour une hauteur maximum de 3,3m et un fruit du talus 1H/4V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1,5m.

- Présence de nombreux arbres en crête et d'une végétation importante sur la risberme, ce qui n'arrange pas l'état déjà médiocre des enrochements.

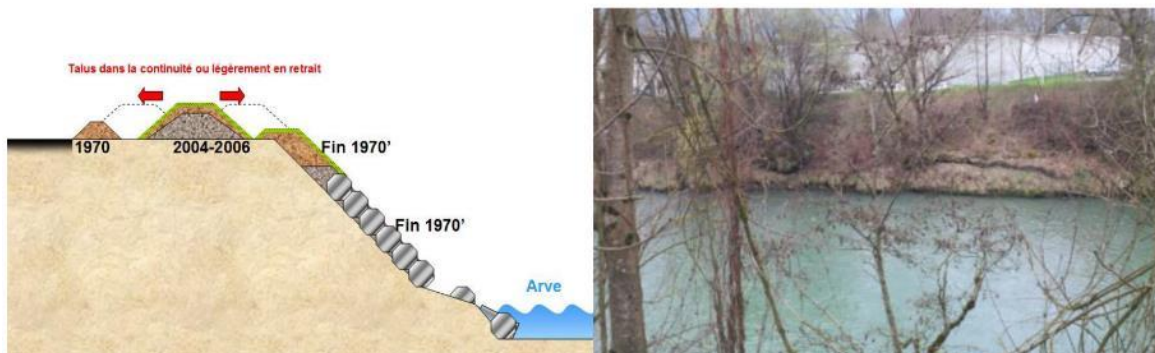


Figure 37 : Merlon Prison : Profil historique - Acthys Diffusion / Vue du talus amont depuis la rive opposée - CNR

5.1.2.10 Digue du Bois Jolivet B

Type : Digue mur/terre

- Date de construction : 1818-1863, 1879-1880
- Cours d'eau : Borne rive droite
- Limite amont : pont RD 1203
- Limite aval : pont de Toisinges
- L'exhaussement du lit en aval du pont de la RD1203 - conséquence de l'endiguement amont, oblige à d'incessants rehaussements des berges. La digue alterne enrochements grossiers et sections en pierre disposées en glacis ou formant un mur droit, le tout avec de longueurs et de pentes variables. Il s'agit de créer au-dessus de l'ouvrage existant, souvent avec un léger décalage, un talus perreyé côté Borne (pente 45°), et nu côté plaine (pente 2/3). Il n'a que quelques dizaines de centimètres de hauteur, avec une largeur en couronne de 2.60 m. C'est ce qui subsiste aujourd'hui, combiné à un enfoncement du lit de l'Arve dans les années 1945. De ce fait on retrouve des blocs de grande taille plongeant dans le Borne, surmontés d'une risberme sur laquelle repose la digue homogénéisée de 1880 (Figure 39). L'affouillement en pied est très visible et pose un problème majeur quant à la stabilité de l'ouvrage (Figure 38).



Figure 38 : Bois Jolivet B : Profil de digue – CNR

- Le linéaire total est de 787m pour une hauteur maximum de 3,1m et un fruit du talus amont de 2H/1V à quasiment vertical. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 2,25m.
- Pas de chemin en crête, mais située proche d'une route donc accès possible pour différents engins.
- Beaucoup de gros arbres ou vieilles souches implantés en crête dans des restes de mur en pierres ou dans le talus côté rivière. Cela a pour effet de totalement déstructurer le corps de digue, tout en contenant le sol à certains endroits où il menace de s'effondrer (cf. Figure 38).
- La reconnaissance géophysique indique la présence potentielle de réseaux.

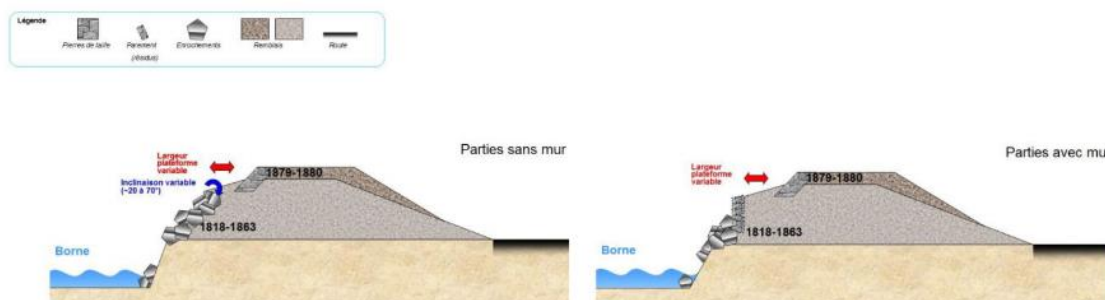


Figure 39 : Bois Jolivet B : Profils historiques - Acthys Diffusion

5.1.2.11 Digue de la Queue du Borne

Type : Digue terre/gabions/enrochements

- Date de construction : 1850 ? 1943, 1880, >1960 ? 1969
- Cours d'eau : Borne rive droite
- Limite amont : pont de Toisinges
- Limite aval : environ 40 m en amont du seuil du Borne
- La digue est composée, côté Borne, d'un perré régulier et incliné, côté terre d'un talus ou d'un petit muret.
- Aujourd'hui, la base de la digue est constituée par de gros enrochements ou des gabions qui ont servis à combler les nombreuses brèches (1880-1943). Celles-ci ont été remblayées à la suite de l'exhaussement des terrains entre Arve et Borne. Il faut ajouter à cela l'incision du lit de l'Arve et du Borne dans la zone de confluence ayant pour effet un fort affouillement en pied.

Trois profils distincts se dégagent alors (Figure 40) :

- Partie A : La partie amont (résidus de 1850, reconstruction de 1880) s'étend sur 160 mètres linéaires. Il s'agit ici d'un profil-type. Pour plus de précisions on se réfèrera à la Figure 41 détaillant les profils d'amont en aval ;
- Partie B : La partie médiane (gabions du XXème siècle uniquement) s'étend sur 170 mètres ;
- Partie C : La partie aval (réparations avec blocs d'enrochements) s'étend sur 40mètres linéaires.

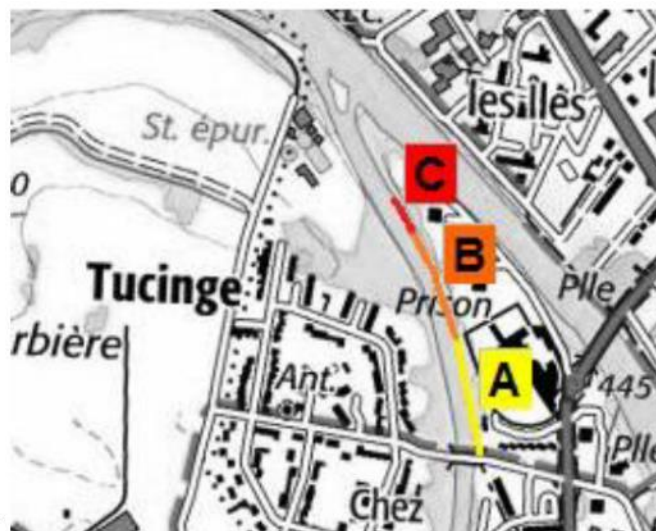


Figure 40 : Localisation des différentes formes de digues secteur QUEUE DU BORNE

- Le linéaire total est de 372m pour une hauteur maximum de 4,1m et un fruit du talus amont de 1H/1V à quasiment vertical. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 3m.
- Pas de chemin à clairement parler en crête, mais la circulation piétonne est très facile. Impossibilité d'accès pour différents engins.
- Au vu de la localisation, la présence de réseaux est très peu probable, de plus la campagne géophysique ne relève pas d'anomalie particulière dans cette zone.
- Présence de nombreux arbres de gros diamètres et de souches un peu partout en crête comme sur les talus amont et aval, qui viennent gangréner totalement les gabions et enrochement ainsi que le cœur de digue, c'est l'un des points les plus critiques.

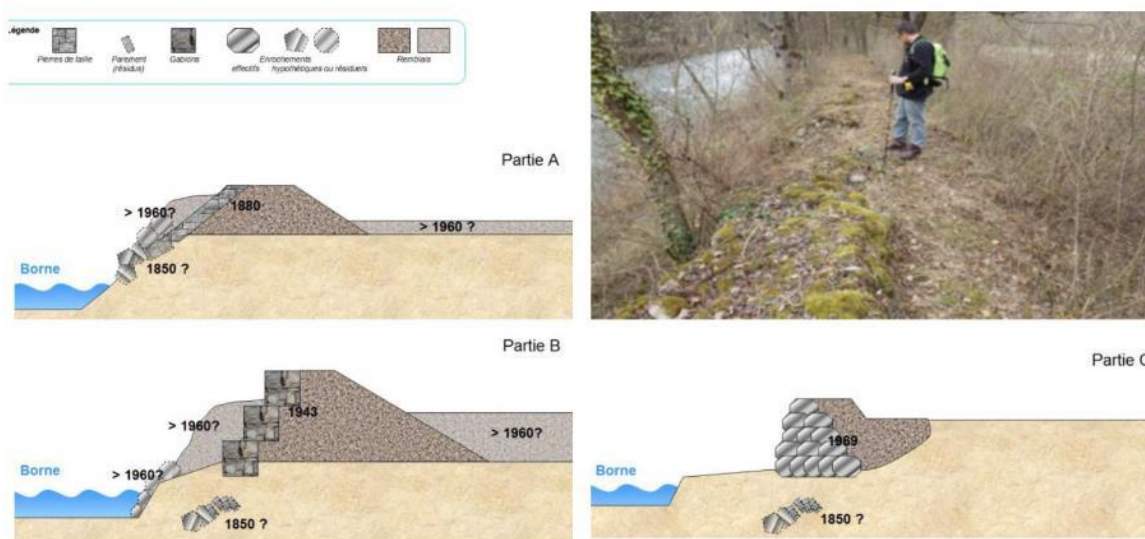


Figure 41 : Queue du Borne : Profils historiques - Acthys Diffusion / Profil de digue – CNR

5.1.2.12 Conclusion sur la géométrie externe des ouvrages existants

Les Tableau 9 et Tableau 10 suivants présentent les principales caractéristiques géométriques de chaque portion de système et la composition générale des protections.

SYSTÈME	IDENTIFIANT_SIRS	DIGUE	PK amont	PK aval	Hauteur moyenne aval (m)	Charge	LARGEUR MOYENNE EN CRETE (m)	Risèrme
BONNEVILLE ENTRE ARVE ET BORNE ARVE-RG-BONNE-26.24	ARVE-RG-BONNE-29.65	LES BORDETS 2-T02 MERLON	30.16	29.65	0.80	Q10	2.5 à 3	Séggonal de 80 m
	ARVE-RG-BONNE-29.11	LES BORDETS 2-T01	29.65	29.13	1.00	Q10	2.5 à 3	Séggonal de 0 à 80 m
	ARVE-RG-BONNE-28.87	LES BORDETS-T02	29.95	29.13	1.00	Entre Q10 et Q100	2.50	Non
	ARVE-RG-BONNE-27.62	LES BORDETS-T01	29.13	27.56	2.50	Q10	2.5 à 3	2 à 50 m sur 770m amont
	ARVE-RG-BONNE-27.41	LES PLACES - T02 -ST ESPRIT	27.56	27.54	0.80	Q100	2.50	0 à 3 m
	ARVE-RG-BONNE-27.21	LES PLACES - T01	27.30	27.22	1.30	Q100	0.5 à 2	1 à 2 m
	ARVE-RG-BONNE-26.63	BOIS JOLIVET A	27.19	26.58	1.10	Entre Q10 et Q100	2.5 en amont puis 1	2 m ponctuellement
	ARVE-RG-BONNE-26.24	MERLON PRISON	26.58	26.19	0.80	Q1000	1.50	Non
	BORNE-RD-BONNE-0.61	BOIS JOLIVET B	0.61	1.39	2.00	Q10	1.5 à 2 et 1 ponctuellement	Non
	BORNE-RD-BONNE-0.23	QUEUE DU BORNE	0.16	0.59	0.50	Q10	1.00	Banc

Tableau 9 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants

SYSTÈME	DIGUE	Hauteur moyenne amont	Pente AM	Pente AV	Revetement AM	Revetement AV
BONNEVILLE ENTRE ARVE ET BORNE ARVE-RG-BONNE-26.24	LES BORDETS 2-T02 MERLON	1.00	2/1 à 3/1, localement 3/2	2/1 à 3/1	Terre	Terre
	LES BORDETS 2-T01	1.00	3/2	2/1 à 3/1 localement 3/2	Terre	Terre
	LES BORDETS-T02	6.00	1/1 à subverticale	2/1 à 3/1	Enrochements perchés en pied	Terre
	LES BORDETS-T01	5.00	3/2 à subverticale	2/1 à 3/1	Enrochements perchés en pied	Terre
	LES PLACES - T02 -ST ESPRIT	6.00	Subverticale	Très douce	Mur de soutènement	Elements maçonnés
	LES PLACES - T01	6.00	1/1 à verticale	Faible en aval et vertical en amont	Perré en pierres appareillées, localement mur/muret	Terre ou Mur
	BOIS JOLIVET A	6.00	1.25/1 à 3/2	Aval très douce Amont 2/1 à 3/1	Enrochements (amont)	Terre
	MERLON PRISON	6.00	1/1 à subverticale	3/2 à 3/1	Terre	Terre
		BOIS JOLIVET B	5.00	1/1 à subverticale	3/2 voire 2/1	Pérres maçonnés
	QUEUE DU BORNE	6.00	1/1 à subverticale	3/2 puis aval plus doux	Anciens perrés en partie haute + enrochements épars	RAS

Tableau 10 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants (bis)

5.1.2.13 Profils en long des digues

Les profils en longs exposent :

- Les lignes d'eau pour différentes crues ;
- Le talweg de la rivière ;
- Le TN aval ;
- Les crêtes de digues actuelles.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
 Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

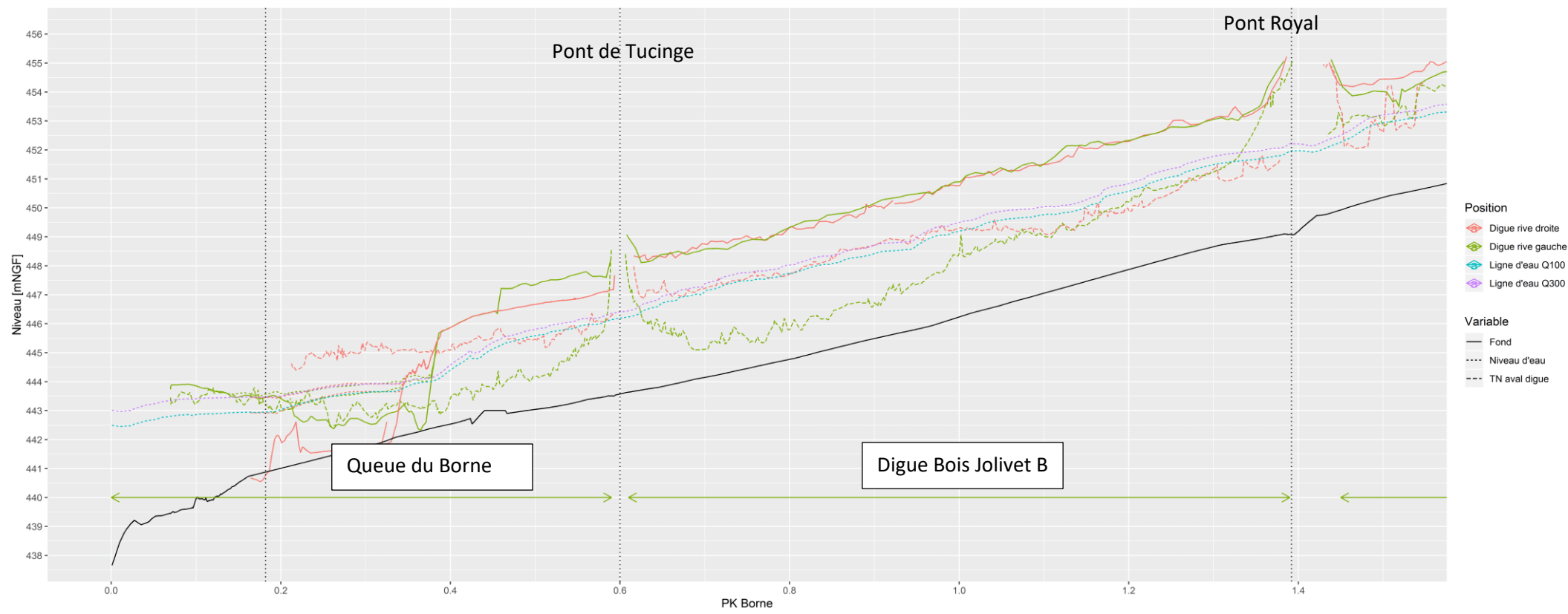


Figure 42 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - état actuel

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

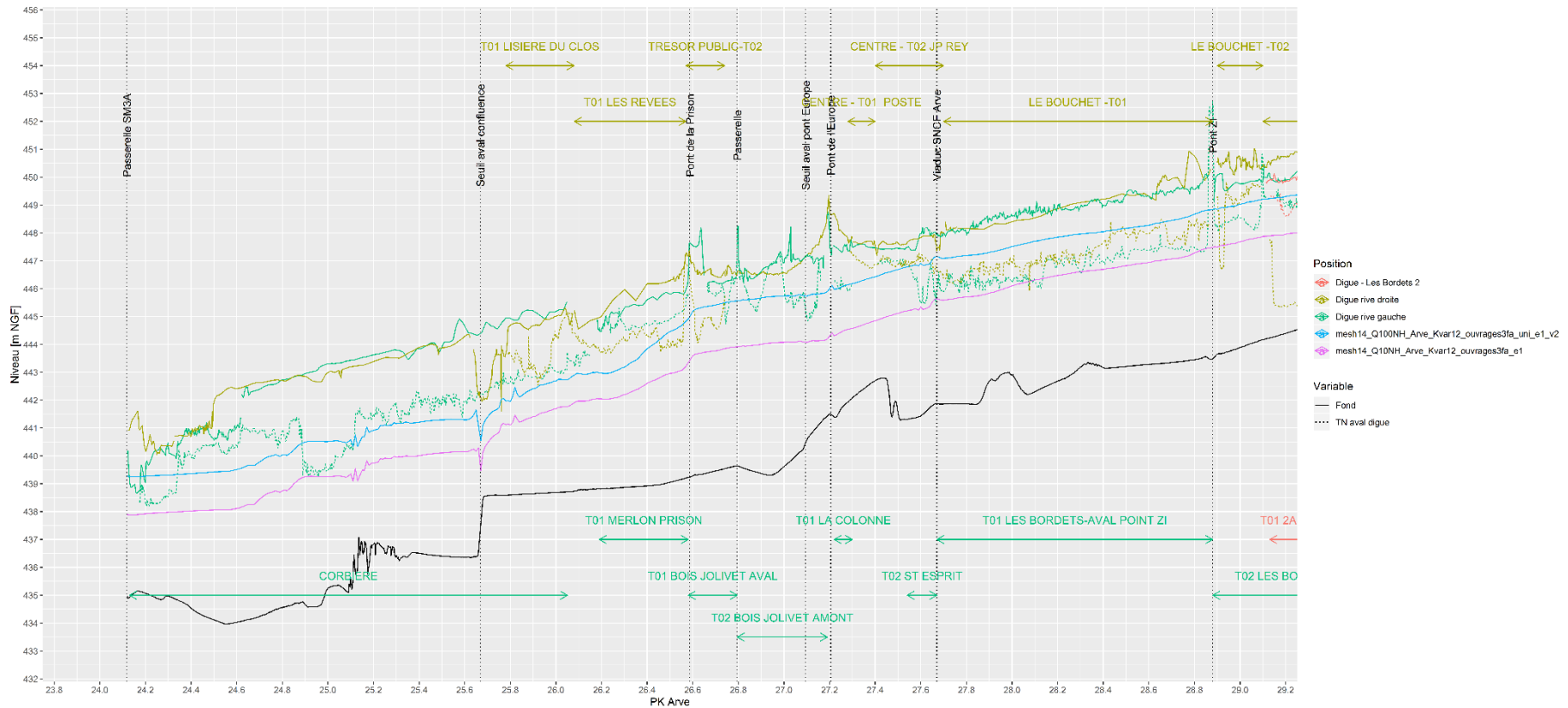


Figure 44 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 – état actuel

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

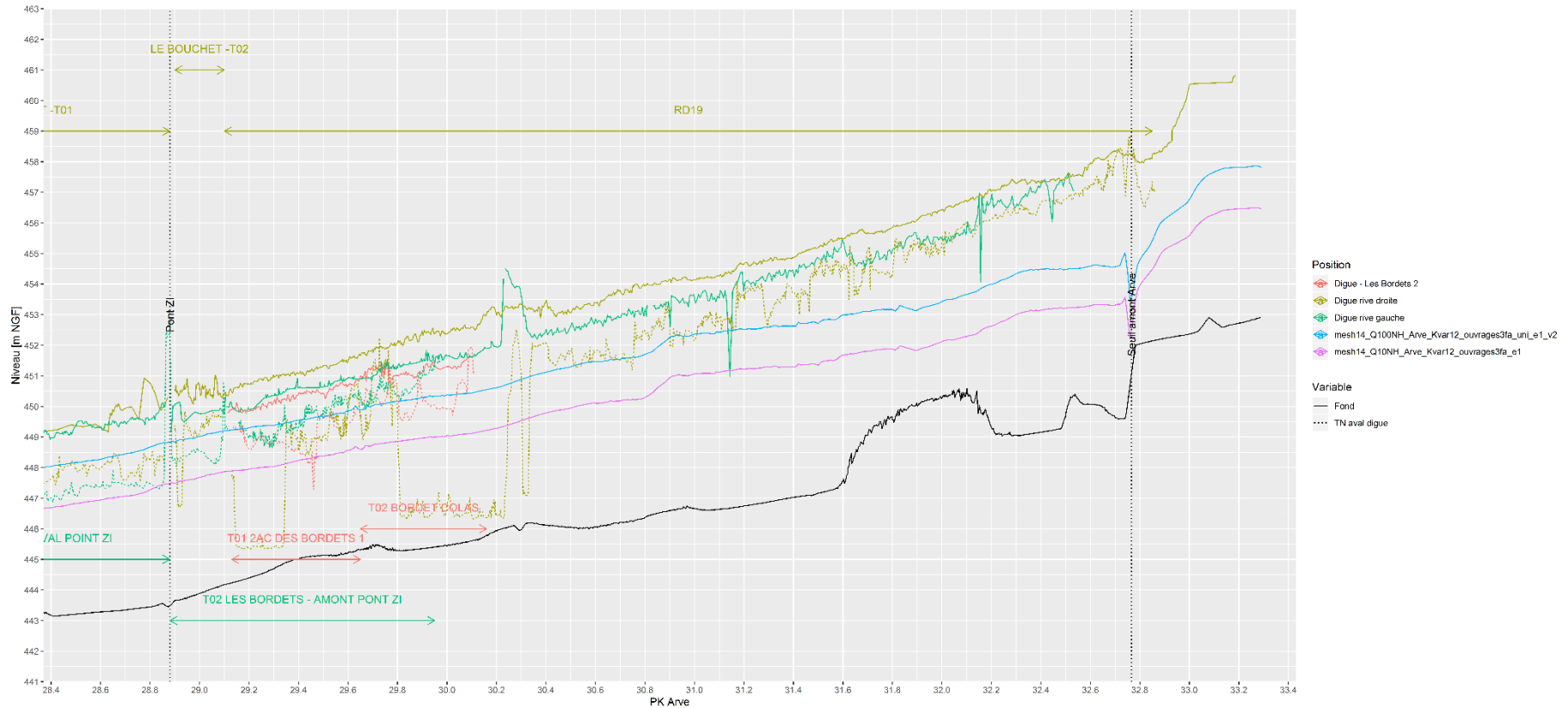


Figure 45 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel

5.1.3 Autres ouvrages

5.1.3.1 Ponts

Sur l'Arve et le Borne, 9 ouvrages type pont sont recensés. Les deux tableaux ci-après, présente les hauteurs d'air libres sous ces ouvrages pour les crues Q100 et Q200 (Borne et Arve).

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100 870m ³ /s Arve 180m ³ /s Borne	Q200 972m ³ /s Arve 195m ³ /s Borne	Tirant d'air Q100	Tirant d'air Q200
PA1	Pont ZI (D19)	Arve	28.9	451.15	448.75	449	2.40	2.15
PA2	Viaduc SNCF Arve	Arve	27.7	449.05	447.2	447	1.85	2.05
PA3	Pont de l'Europe	Arve	27.2	448.44	446	446.3	2.44	2.14
PA4	Passerelle	Arve	26.8	449.99	445.6	446	4.39	3.99
PA5	Pont de la Prison	Arve	26.6	447.24	445.4	445.8	1.84	1.44
PA6	Passerelle SM3A*	Arve	24.1	440.90	438.8	439	2.10	1.90

Tableau 11 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100 180 m ³ /s	Q200 195 m ³ /s	Tirant d'air Q100	Tirant d'air Q200
PB4	Pont D1203*	Borne	1.4	453.82	451.9	452	1.92	1.82
PB4	Pont D1203*	Borne	1.3	454.17	451.9	452	2.27	2.17
PB5	Pont de Toisinges	Borne	0.6	447.63	446.5	446.6	1.13	1.03

*Il s'agit de deux ouvrages avoisinants, un dans chaque sens de circulation sur RD1203

Tableau 12 : Ponts présents sur la zone d'étude – Borne

Suivant ce tableau, les hauteurs d'eau minimales d'air libre pour la Q200 sont :

- 1.44 m sous le pont de la Prison pour l'Arve ;
- 1.03 m sous le pont de Toisinges pour le Borne.

Ces hauteurs sont largement suffisantes pour évacuer les potentiels sujets ligneux qui se retrouveraient dans les cours d'eau en crue.

5.1.3.2 Seuils transversaux

Plusieurs seuils sont recensés le long des cours d'eau relatifs aux endiguements étudiés (Tableau 13). Ils ont pour but de réguler le transport solide et de stabiliser le phénomène d'incision lié à l'endiguement progressif et à l'extraction massive passée dans les gravières.

L'ouvrage le plus récent étant le seuil de Marignier, qui a été réalisé en limite amont au PK 32.8 entre 2000 et 2009, pour stabiliser le lit et freiner les érosions régressives en cours dans la zone de confluence du Giffre, qui venaient à déstabiliser le seuil d'Anterne en amont.

Identifiant	Nom	Rivière	PK
SB1	Seuil Métral (Figure 63)	Borne	4.1
SB2	Seuil amont confluence (Figure 64)	Borne	0.2
SA1	Seuil de Marignier	Arve	32.8
SA2	2Seuils aval pont Europe (Figure 65)	Arve	27.1
SA3	Seuil aval confluence	Arve	25.7

Tableau 13 : Liste des seuils dans le lit de l'Arve et du Borne sur la zone d'étude

Le sb1 est situé largement en amont des digues du Borne (en sortie des gorges).



Figure 46 : Seuil aval au pont de l'Europe, vue vers l'amont - CNR

5.1.3.3 Buses

Plusieurs débits d'eau annexes peuvent venir s'ajouter à ceux initiaux de l'Arve et du Borne par l'intermédiaire de différents systèmes de buse et de vannage. Ces ouvrages peuvent être également considérés comme des discontinuités du système d'endiguement, qui en cas de crue pourraient causer des venues d'eau et dégrader la partie aval des digues s'ils ne sont pas correctement maîtrisés. Le Tableau 14 liste de façon exhaustive les équipements cités précédemment et présents sur le linéaire de protection hydraulique étudié.

N°	Ouvrages	Rivière	PK	Caractéristiques	Zamont [m NGF]	Zaval [m NGF]
1	Buse sous RD19	Arve	29.970	Section rectangulaire (1.1x0.55m=0.6m ²) Longueur : 40m	447.73	447.73
2	Buse sous RD19	Arve	29.170	Section rectangulaire (1.1x0.55m = 0.6 m ²) Longueur : 40m	447.70	447.70
3	Buse sous RD19	Arve	31.700	Diamètre 1m (Section = 0.79 m ²) Longueur : 40m	453.74	453.14
4	Bois Jolivet (RG : Arve)	Arve	27.150	Diamètre : 2.20m (Section = 3.80 m ²)	444.22	440.46
5	Quai Jean-Baptiste Rey (RD : Ruisseau de la Madeleine)	Arve	27.380	Diamètre : 1m (Section = 0.79 m ²)	444.88	444.19
6	Vanne à l'aval du Seuil Métral (RG)	Borne	4.150	Section arquée = 4.96m ² - Réglé sur 2,24m ² actuellement	480.71	480.71

Tableau 14 : Caractéristiques des buses

5.1.3.4 Conduites et réseaux traversants

Sur l'Arve rive gauche :

Un diagnostic des réseaux traversants a été mené sur les digues de l'Arve en 2023. La synthèse sur ces réseaux est donnée en annexes.

La figure ci-après présente la localisation des réseaux traversant (EP pour la plupart) sur les digues de l'Arve actuellement.

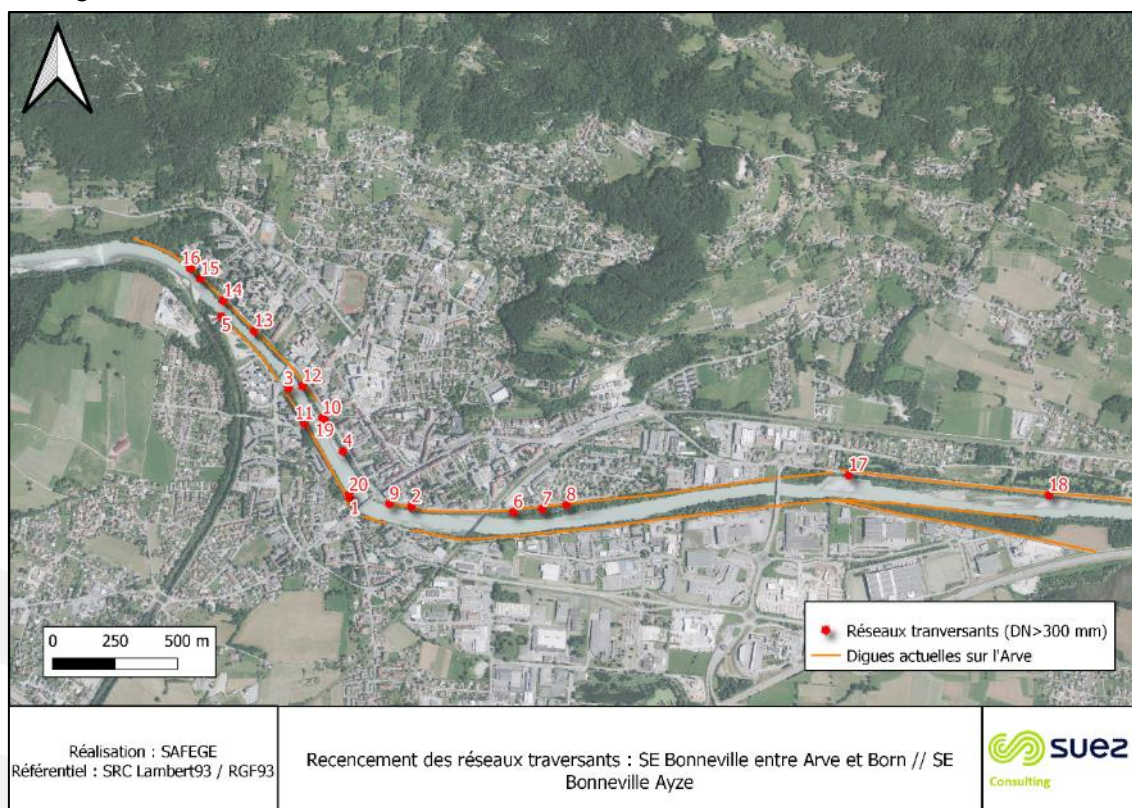


Figure 47 : Réseaux traversants sur les digues de l'Arve

Les réseaux 17 et 18 sont les seuls réseaux dont les fils d'eau sont au-dessus du terrain naturel. Ce sont deux castorduc qui permettent aux castors de traverser la RD19 afin de passer de la rive droite de l'Arve aux rives des lacs d'Ayze.

Le réseau de ressuyage de la ZAC des bordets (réseau n°1 : Bois Jolivet) possède les caractéristiques suivantes :

Bois Jolivet (RG : Arve)	Arve	27.150	Diamètre : 2.20m (Section = 3.80 m ²)	444.22	440.46
-----------------------------	------	--------	--	--------	--------

Ce réseau de gros diamètre sera équipé, comme le reste des réseaux présents d'un clapet anti-retour. Une défaillance fonctionnelle de ce clapet (Bois Jolivet) est étudiée dans cette étude de dangers.

Aucun réseau longitudinale (type EP) ne longe le corps des digues de l'Arve. Dans tous les cas, l'ensemble des réseaux (réseaux secs) sera dévoyé de l'emprise projet.

Sur le Borne rive droite :

Sur les digues du Borne rive droite, il n'existe aucun réseau qui traverse les ouvrages de protection (type EP, EU, ...), ni aucun réseau qui longe le corps des ouvrages (hormis les réseaux aériens). **La défaillance fonctionnelle est écartée.**

5.1.4 Description des sources d'agression

5.1.4.1 Sources d'agression anthropiques

Ce chapitre a pour objectif de lister les agresseurs potentiels pouvant impacter les digues. Ces agresseurs sont des installations classées de type SEVESO, des installations nucléaires de base (INB), les modes de transport de marchandises dangereuses (par voie ferrée, fluviale, routière ou par canalisations).

Sites SEVESO

Aucun site SEVESO n'a été recensé dans le périmètre d'étude.

Installation Nucléaire de Base

Aucune INB n'a été recensé dans le périmètre d'étude.

Transport de Marchandises Dangereuses

Aucun transport de marchandises dangereuses recensé sur la zone d'étude.

5.1.4.2 Risques naturels

Risque minier

La zone d'étude ne se situe pas en zone de risque minier.

Les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux

La cartographie du BRGM de l'aléa des sols argileux aux phénomènes de retrait gonflement classe le site en zone d'aléa faible.

Base de données des cavités souterraines

Aucune cavité souterraine n'a été recensée par le BRGM au droit de la zone d'étude.

Risque de glissement de terrain

Aucun mouvement de terrain n'a été recensé par le BRGM au droit de la zone d'étude.

5.2 Description des ouvrages en phase avant-projet

La grande majorité des ouvrages cités dans le chapitre 5.1, existent depuis le XVIII^e siècle. Quelques réparations ponctuelles ont bien été effectuées mais l'évolution de la morphologie du lit ainsi que la progression non maîtrisée de la végétation oblige aujourd'hui le gestionnaire à prévoir une mise à jour du système d'endiguement de Bonneville entre Arve et Borne ainsi que les systèmes environnants.

Les aménagements décrits dans ce chapitre concernent les travaux sur les digues de l'Arve en rive gauche. Les digues du Borne rive droite, en état de travaux achevés, sont décrites dans l'EDD déposée dans le cadre du dossier réglementaire « Borne ».

Cette version de l'étude de dangers se focalise sur les digues de l'Arve rive gauche en état de travaux achevés.

5.2.1 Rappels de l'AVP structurel - 2018

NB : l'AVP « structurels n'est pas retenu par le SM3A. Ce chapitre est ajouté pour rappeler l'historique de conception des nouvelles digues de l'Arve.

L'Avant-Projet structurel de 2018 a été conçu en intégrant les niveaux suivants :

- Niveau de protection : Q100 de l'Arve, et crue de Dangers à Q200
- Niveau des crêtes de digues : Ligne d'eau de la Q200 avec une revanche minimum de 50cm

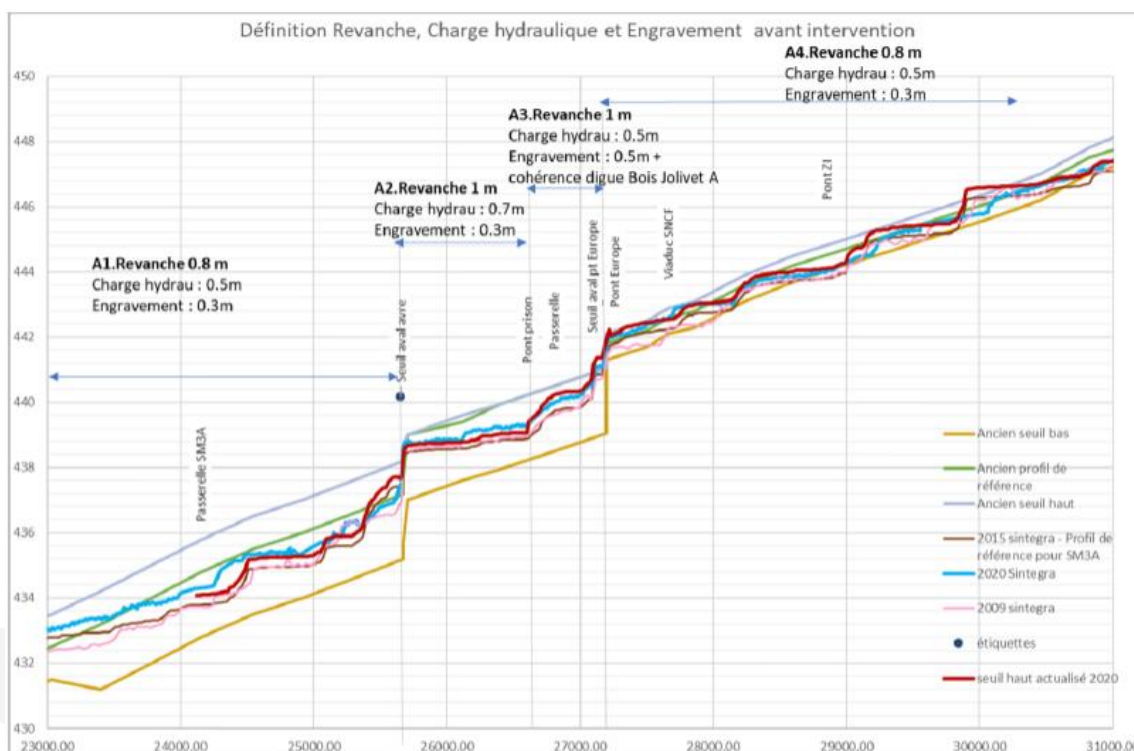


Figure 48 – profil en long - définition des crêtes de digue

Il comprend :

- La reconstruction intégrale des digues du secteur d'étude depuis l'amont du secteur d'étude jusqu'au pont de l'Europe en RD et jusqu'au pont de la Prison en RG,

- Le désengrèvement du lit par le déblai partiel des bancs alluvionnaires au droit des endiguements reconstruits,
- La protection des talus amont sur le reste du linéaire par la mise en œuvre de carapaces d'enrochements,
- L'arasement de la digue des Bordets T02 (digue de premier rang) au niveau du TN, la protection de la plaine étant assurée par le merlon des Bordets (digue de second rang).

Le profil-type préconisé pour la reconstruction des digues présentait les caractéristiques suivantes :

- Pentes de talus amont : 3H/2V
- Pentes de talus aval : 3H/2V
- Largeur en crête : 4 m
- Protection contre l'érosion externe (talus amont) :
 - Partie inférieure (jusqu'à Q₁₀) : enrochements 60/300 kg, épaisseur 1,30m,
 - Partie supérieure (Q₁₀ à la crête) : matelas Reno ou perrés en pierre selon les secteurs,
 - Bèche de stabilisation en pied : 6 m de largeur au niveau du lit, 5.3 m de largeur en base de la bèche.

Pour le confortement des talus des berges, les caractéristiques sont les suivantes :

- Enrochement jusqu'au niveau de Q₁₀ (sauf Trésor public T02 et merlon Prison, jusqu'en sommet de talus),
- Matelas Reno ou géogrilles tridimensionnelles au-dessus du niveau de Q₁₀ (le cas échéant),
- Blocométrie de 60/300 à 300/1000 kg selon les secteurs

Pour le confortement des talus des berges, les caractéristiques sont les suivantes :

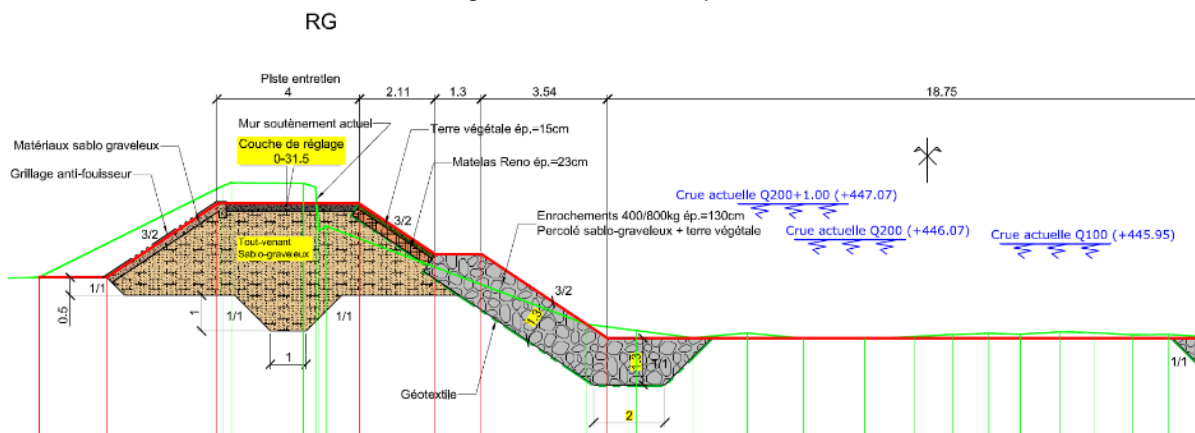


Figure 49 : Profil type de l'AVP structurel de 2018.

Cet AVP constitue un optimum en termes de sûreté des ouvrages et de coût financier. Il est en revanche très impactant sur le plan environnemental et paysager, impliquant un déboisement des deux rives sur l'ensemble du linéaire, non contrebalancé par des actions de restauration de la ripisylve ou du lit mineur.

Il a servi de base de réflexion pour l'élaboration de l'Avant-projet optimisé pour les aspect environnementaux, paysagers et intégration des usages, objet de la présente mission, désigné « avant-projet optimisé » dans la suite du rapport.

5.2.2 Avant-projet optimisé – 2022

Pour une meilleure lisibilité, la vue en plan de l'AVP est présente en annexes.

Ce paragraphe constitue l'ébauche dimensionnelle des solutions de confortement dont les principes ont été présentés dans le document DIGP 2022-186-03 – Notice AVP Arve donné en annexe. Il vise à définir les solutions techniques.

Cette partie synthétise les réflexions concernant l'ébauche structurale des ouvrages (géométrie, constitution, etc.) proposée au stade AVP.

5.2.2.1 Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont communes à l'ensemble des tronçons et utilisées pour le dimensionnement des ouvrages :

Niveau de protection : Q100 de l'Arve

Niveau des crêtes de digues :

- Amont du pont de l'Europe : charge hydraulique moyenne en Q100 de 0.5 m et engravement potentiel de 0.3 m, soit une revanche nécessaire de 0.8 m,
- Pont de l'Europe à pont de la prison : charge hydraulique moyenne en Q100 de 0.5 m et engravement potentiel de 0.5 m, soit une revanche nécessaire de 1 m,
- Pont de la prison au seuil de la STEP : charge hydraulique moyenne en Q100 de 0.7 m et engravement potentiel de 0.3 m, soit une revanche nécessaire de 1 m.

5.2.2.2 Objectif de protection

La crue de projet fixée par le Maître d'ouvrage est la crue centennale (Q_{100}), c'est-à-dire que les systèmes d'endiguement devront être capables de faire transiter ce débit sans dommages pour les enjeux situés à proximité. De manière à intégrer les incertitudes et autres évolutions du cours d'eau, il est nécessaire d'ajouter au niveau de la ligne d'eau en crue de projet, une revanche qui intègre :

- L'incertitude sur les niveaux en sortie du modèle hydraulique,
- L'engravement potentiel du lit de l'Arve.

L'incertitude sur les niveaux en sortie du modèle hydraulique est estimée à 0,50 m, valeur calculée à partir de la charge hydraulique moyenne en Q100. En cohérence avec le plan de gestion sédimentaire de 2020, l'engravement potentiel est estimé à 0.30 m (en aval du pont de l'Europe) et à 0.50 m (en amont du pont de l'Europe).

En conséquence, le niveau de protection de l'ouvrage est identique pour l'ensemble du secteur, rive droite et rive gauche :

Niveau de protection homogène sur l'ensemble du projet :

Niveau de la ligne d'eau en crue de projet Q_{100} (*)

(*) Débit de l'Arve à Bonneville (amont de la confluence avec le Borne) = 1094 m³/s

Le **niveau d'arase des ouvrages projetés**, appelé aussi niveau de submersion ou niveau de crue extrême, est le suivant :

A l'amont du pont de l'Europe : Niveau de la ligne d'eau en crue de projet : $Q_{100} + 0,8 \text{ m}^*$;

A l'aval du pont de l'Europe : Niveau de la ligne d'eau en crue de projet : $Q_{100} + 1 \text{ m}^*$.

(*) Ou supérieur à ce niveau selon sujétions particulières (cf. AVP).

5.2.2.3 Sectorisation des digues en tronçons homogènes

Une sectorisation des linéaires de digues du secteur d'étude en tronçons homogènes a été effectuée en croisant :

- Le diagnostic de stabilité des endiguements (risques d'érosion interne, externe stabilité au glissement, caractéristiques géométriques, niveaux de mise en charge, etc.), mis à jour avec les données d'entrées hydrauliques actualisées ;
- Les contraintes externes au projet (emprise foncière, projets connexes, etc.) ;
- Les solutions techniques envisagées, guidées notamment par les enjeux écologiques et paysagers de préservation de la végétation, ainsi que les potentialités de restauration du lit et des berges.

La topographie du projet ainsi que les contraintes géotechniques et hydro-écologiques associées ont conduit à définir 9 tronçons en rive droite et 20 tronçons en rive gauche. La localisation de ces tronçons homogènes est rappelée dans le tableau suivant et la figure suivantes.

Tableau 15 - Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu dans l'AVP optimisé au droit de chaque secteur

Digue	Tronçons homogène	PK Amont	PK Aval	Linéaire (m)	Type d'intervention
Rive gauche					
T02 – Bordet Colas / T01 – ZAC des Bordets 1 / T02 – Bordet Amont Pont ZI	RG-T1	30.00	29.21	790	Reprise intégrale de la digue de second rang (merlon) et dépose de la digue de premier rang
T02 – Bordet Amont Pont ZI	RG-T2	29.21	28.99	220	Confortement par l'aval (épaulement élargi)
T02 – Bordet Amont Pont ZI / T01 – Bordet Aval Pont ZI	RG-T3	28.99	28.625	365	Reprise intégrale de la digue
	RG-T4	28.625	28.395	230	
T01 – Bordet Aval Pont ZI	RG-T5	28.395	27.715	680	
	RG-T6	27.7150	27.615	100	
	RG-T7	27.615	27.55	65	
T02 – Saint-Esprit	RG-T8	27.55	27.36	190	Reprise intégrale de la digue (mur béton), perré
	RG-T9	27.36	27.31	50	Maintien du mur existant, confortement du pied
T01 – La Colonne	RG-T10	27.31	27.22	85	Reprise intégrale de la digue (mur béton/paroi Berlinoise)
	RG-T11	27.17	27.070	100	Reprise intégrale de la digue
	RG-T12	27.070	26.99	80	Reprise intégrale de la digue (mur béton)
T02 – Bois Jolivet Amont	RG-T13	26.99	26.93	60	
	RG-T14	26.93	26.90	30	
	RG-T15	26.90	26.795	105	Confortement par l'aval (épaulement)
	RG-T16	26.795	26.730	65	Confortement par l'aval (mur béton)
T01 – Bois Jolivet Aval	RG-T17	26.730	26.595	135	Confortement par l'aval (épaulement)
	RG-T18	26.595	26.42	175	Reprise intégrale de la digue (mur béton)
T01 – Merlon de la Prison	RG-T19	26.42	26.235	185	Arasement de la digue existante, adoucissement de la berge
Confluence	RG-T20	26.235	26.13	105	Abaissement confluence

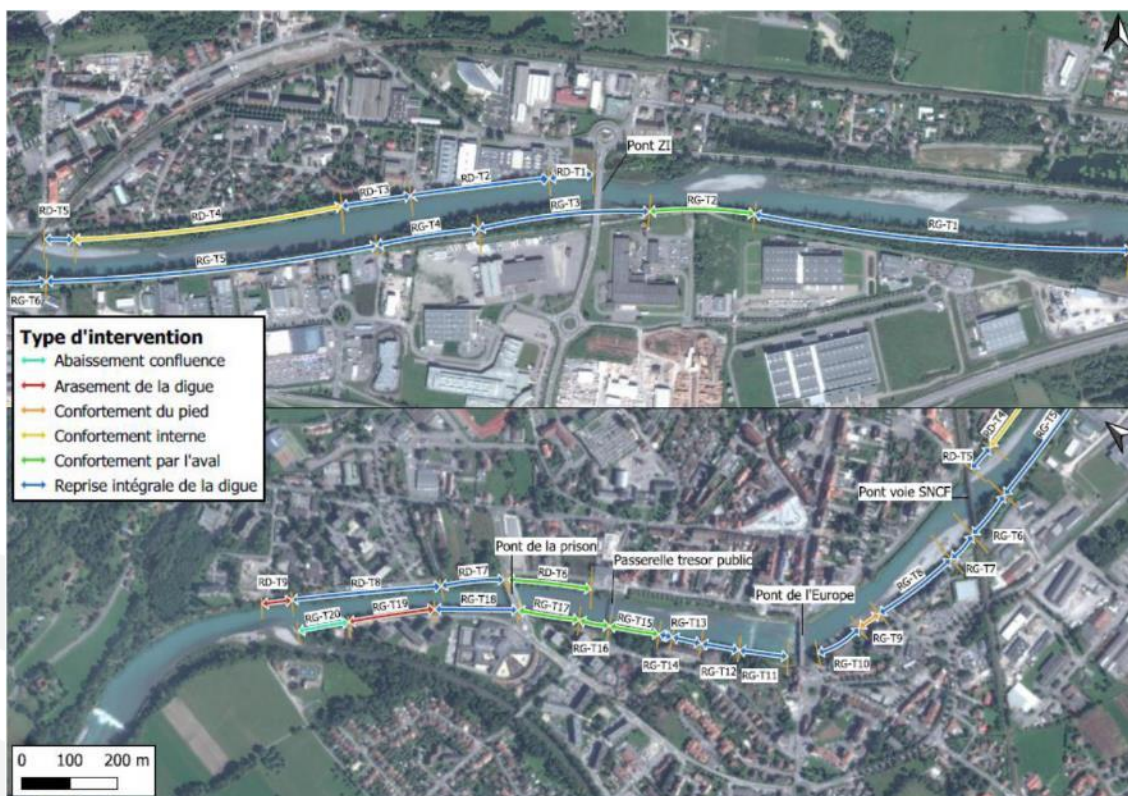


Figure 50 - Vues en plan de la sectorisation des digues en tronçons homogènes (rive gauche et rive droite de l'Arve)

5.2.2.4 Description par secteur

Sur l'ensemble des coupes de description des tronçons, on retrouve les lignes d'eau suivantes :

	$Z_{Q100+revanche}$	Niveau de danger
	Z_{Q100}	Niveau de protection
	$Z_{moy,juillet}$	Niveau hydraulique des eaux moyennes de juillet
	Z_{module}	Niveau hydraulique du module

5.2.2.4.1 Digue rive gauche – RG-T1 (T02 – Bordet Colas / T01 – ZAC des Bordets 1 / T02 – Bordet Amont Pont ZI)

Linéaire d'application : 790 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue de second rang et dépose de la digue de premier rang.

L'espace foncier disponible et les potentialités de restauration écologique permettent, au droit de ce secteur, de déposer la digue de premier rang pour élargir l'espace de liberté de l'Arve. La terrasse alluviale est très haute par rapport aux écoulements de crue de l'Arve (cote proche, voire supérieure à la cote atteinte par la crue centennale), de sorte que ce tronçon pourra potentiellement servir de source de matériaux pour la constitution du corps des nouvelles digues. Dans tous les cas, un front de berge subvertical sera restitué afin de favoriser l'érosion latérale et la dynamique alluviale dans cet espace retrouvé.

L'actuelle digue de second rang (merlon des Bordets) ne garantit pas la revanche de 0.8 m à la crue de projet et doit donc être reprise. Les caractéristiques du nouvel ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pente des talus : 2.0H/1V.

Compte-tenu de l'éloignement de l'ouvrage avec le lit de l'Arve (environ 20 m sur la partie aval à plus de 80 m à l'amont), sa protection contre l'érosion externe n'est pas nécessaire.

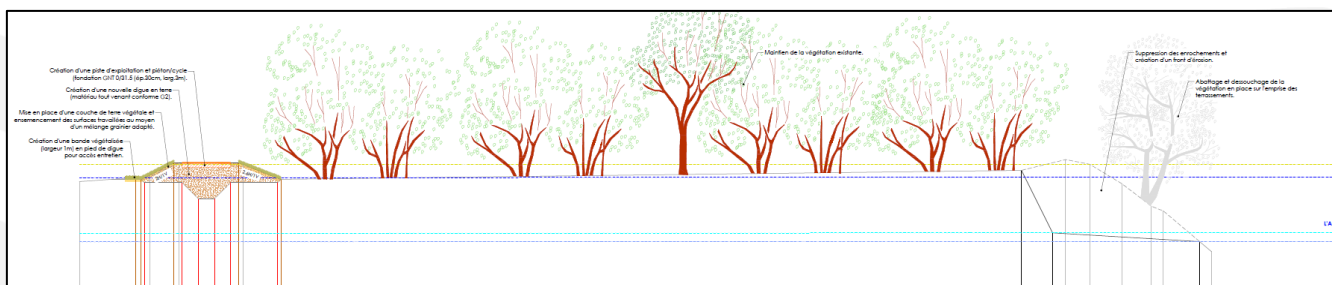


Figure 51 : Profil type RG-T1

5.2.2.4.2 Digue rive gauche – RG-T2 (T02 – Bordet Amont Pont ZI)

Linéaire d'application : 220 m,

Type d'intervention : confortement par l'aval/recul de digue.

L'objectif sur ce secteur est de recréer une nouvelle digue une quinzaine de mètres derrière la digue existante, en conservant cette-dernière afin de maintenir la végétation présente sur le talus amont. La conservation de la digue actuelle sert également de protection contre l'érosion externe.

Les caractéristiques de l'ouvrages sont identiques à celle de la digue du tronçon précédent :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pente des talus : 2.0H/1V.

L'espace entre l'ancienne et la nouvelle digue est remblayé ; les talus et crêtes de digue hors emprise du chemin piétons/cycles et voie de service sont entièrement végétalisés avec un ensemencement herbacé indigène adapté.

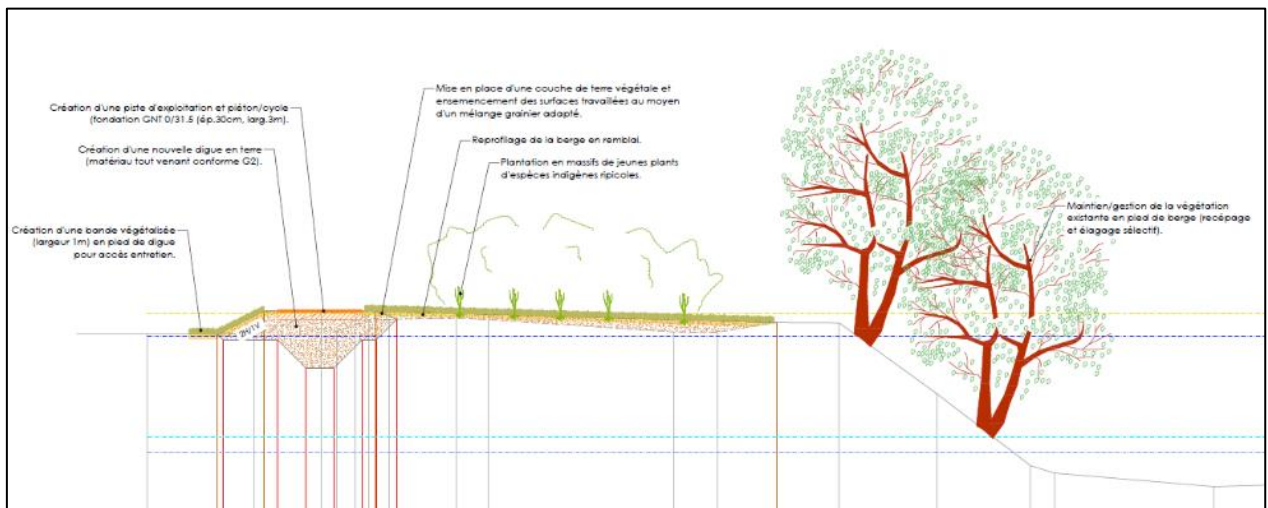


Figure 52 : Profil type RG-T2

5.2.2.4.3 Digue rive gauche – RG-T3, RG-T4 et RG-T6 (T02 – Bordet Amont Pont ZI / T01 – Bordet Aval Pont ZI)

Linéaire d'application : 695 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce secteur concerne la digue des Bordets, là où un banc alluvial est présent en pied de l'ouvrage : de part et d'autre du pont de la RD1205 (pont de la ZI) et en amont immédiat du pont SNCF.

L'objectif est de reconstruire une digue en terre en partie dans l'emprise de la digue voire en léger recul de la digue actuelle en tirant parti de l'emprise foncière disponible.

Compte-tenu de la fixité du banc alluvial (cf. l'étude d'avant-projet en annexe de la présente étude), garantie par les enrochements présents de part et d'autre du pont de la RD1205, et des vitesses d'écoulement faibles sur le talus amont de la digue (inférieures à 1 m/s) il n'est pas prescrit de protection de l'ouvrage contre l'érosion externe, afin de limiter l'incidence sur les boisements et les habitats alluviaux présents sur le banc.

Il est également à noter que contrairement aux secteurs RG-T1 et RG-T2, la terrasse riveraine est ici beaucoup plus basse et inondable par les crues de l'Arve de fréquence environ biennale ; de ce fait aucune action de restauration particulière n'est proposée sur ce banc latéral de l'Arve.

Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pente des talus : 2.0H/1V.

Les talus et crêtes de digue hors emprise du chemin piétons/cycles et voie de service sont entièrement végétalisés avec un ensemencement indigène adapté.

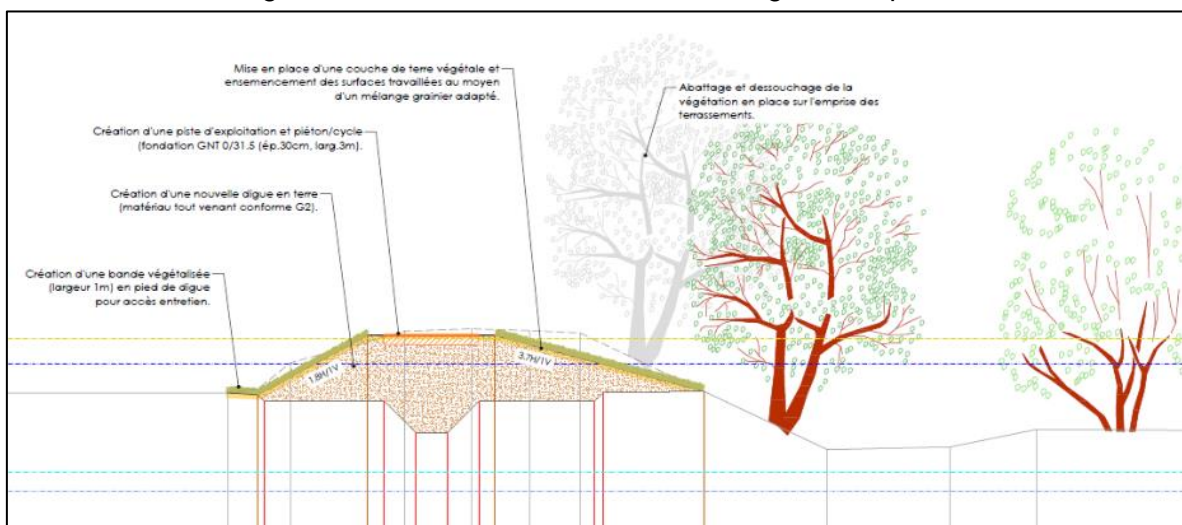


Figure 53 : Profil type RG - T3

Réflexion paysage :

Des **fenêtres paysagères** pourraient être créées dans la ripisylve pour donner à voir l'Arve depuis le chemin en crête de digue. Les fenêtres paysagères ne sont pas des coupes à blanc, qui seraient néfastes à la continuité écologique. Il suffit de profiter d'un espace déjà légèrement ouvert et de supprimer en partie les arbustes hauts, qui arrivent à hauteur de la digue. Cette fenêtre peut présenter différentes largeurs, étroite ou plus large, sans nuire à la continuité végétale. Ce sont des ouvertures qui mettent en scène l'Arve, tel un tableau et qui permettent de créer de la diversité dans la promenade. Elles doivent être entretenues, mais peuvent aussi être déplacées en fonction de l'état de la végétation. C'est un travail de « jardinage » qui peut paraître fastidieux, mais qui assure satisfaction, car il permet de prendre en compte l'utilisateur dans la démarche de gestion des ouvrages. C'est une manière de « réenchanter la technique », le gestionnaire de digue est un aménageur sensibilisé qui a autant la capacité d'entretenir des ouvrages que d'aménager le territoire pour le bien commun.

Ci-contre : Nouvelle fenêtre paysagère sur l'Arve depuis la digue de la Châtelaine.

La strate herbacée et arbustive pourra se développer sans refermer entièrement les points de vue lointains.

Photo : l'Onde-Châtelaine-juin 2022

5.2.2.4.4 Digue rive gauche – RG-T5 (T01 – Bordet Aval Pont ZI)

Linéaire d'application : 680 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce secteur est situé au droit d'une zone artisanale de Bonneville. Il s'agit ici d'une reprise intégrale avec un léger retrait de la digue à l'intérieur des terres, ce qui permet d'adoucir le talus de berge dans un secteur très contraint de l'Arve. Le talus amont est protégé par une technique mixte, ce qui permet de recréer un cordon ripicole indigène et adapté, renforcé par la mise en place d'une série de 10 épis afin de réduire le risque d'érosion externe du pied de talus en place, associé à une diversification des habitats du lit mineur. Les caractéristiques de ces épis sont précisées au § 5.2.2.6. Le haut de berge est aménagé d'une nouvelle digue sur laquelle est positionnée une voie piétonne/cycles. L'éloignement de certaines infrastructures de la zone artisanale permet de gagner localement une bande de terrain sur le domaine privé pour y reconstituer un corridor végétal en pied de digue côté aval de l'ouvrage.



Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pentes de talus : 2.0H/1V,
- Talus amont :
 - Enrochement 60/300 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de juillet surélevé de 30 cm,
 - Lits de plants et plançons 30 cm au-dessus du niveau du débit moyen mensuel de juillet établis sur trois niveaux
 - Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de plantations indigènes adaptées puis de prairie en partie supérieure (au-dessus de la cote du terrain naturel).

- Bèche de stabilisation :
 - Epaisseur : 1.5 m,
 - Largeur en partie supérieure : 6 m.

Le corps de la digue est constitué d'un remblai homogène avec un fuseau granulométrique adapté.

La partie digue (au-delà de la cote du TN aval) est végétalisée par un ensemencement herbacé.

Une piste de service et piétons/cycles est reconstituée en crête de l'ouvrage.

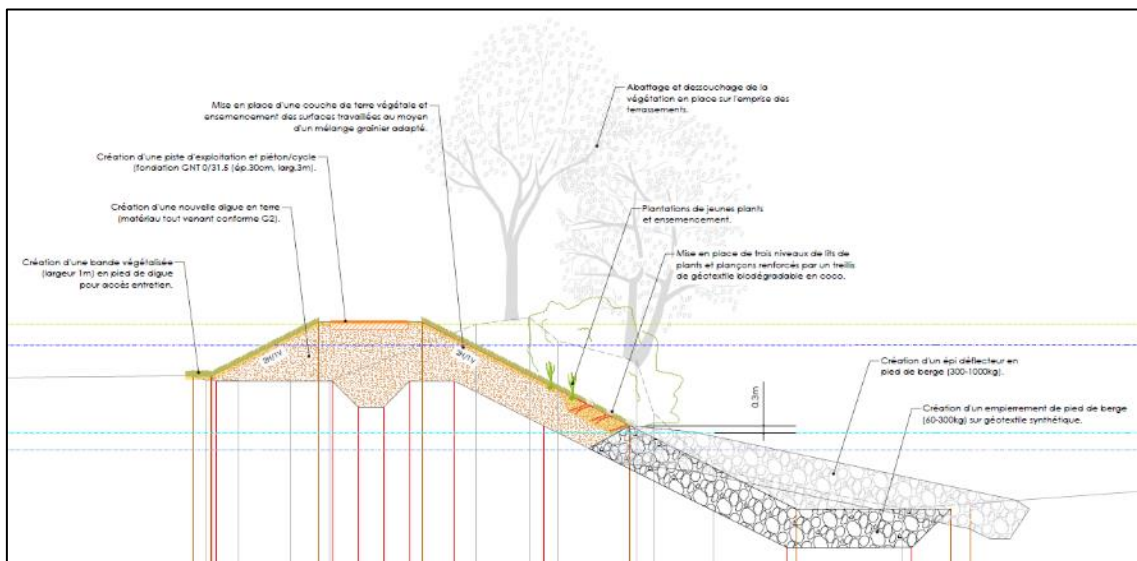


Figure 54 : Profil type RG-T5

Réflexion paysage

Idem tronçon RG-T3, RG-T4 et RG-T6.

5.2.2.4.5 Digue rive gauche – RG-T7 (T02 – Saint-Esprit)

Linéaire d'application : 65 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce tronçon correspond à l'amont du secteur des Places, moins contraint par les aménagements urbains. Il s'agit ici d'une reprise intégrale de l'ouvrage en terre, avec une protection du talus amont en technique mixte, permettant de recréer un cordon ripicole indigène et adapté.

Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pentes de talus : 2.0H/1V,
- Talus amont :
 - Enrochement 60/300 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de juillet surélevé de 30 cm,
 - Lits de plants et plançons 30 cm au-dessus du niveau du débit moyen mensuel de juillet établis sur trois niveaux

- Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de plantations indigènes adaptées puis de prairie en partie supérieure (au-dessus de la cote du terrain naturel).
- Bèche de stabilisation :
 - Epaisseur : 1.5 m,
 - Largeur en partie supérieure : 6 m.

Le corps de la digue est constitué d'un remblai homogène avec un fuseau granulométrique adapté.

La partie digue (au-delà de la cote du TN aval) est végétalisée par un ensemencement herbacé.

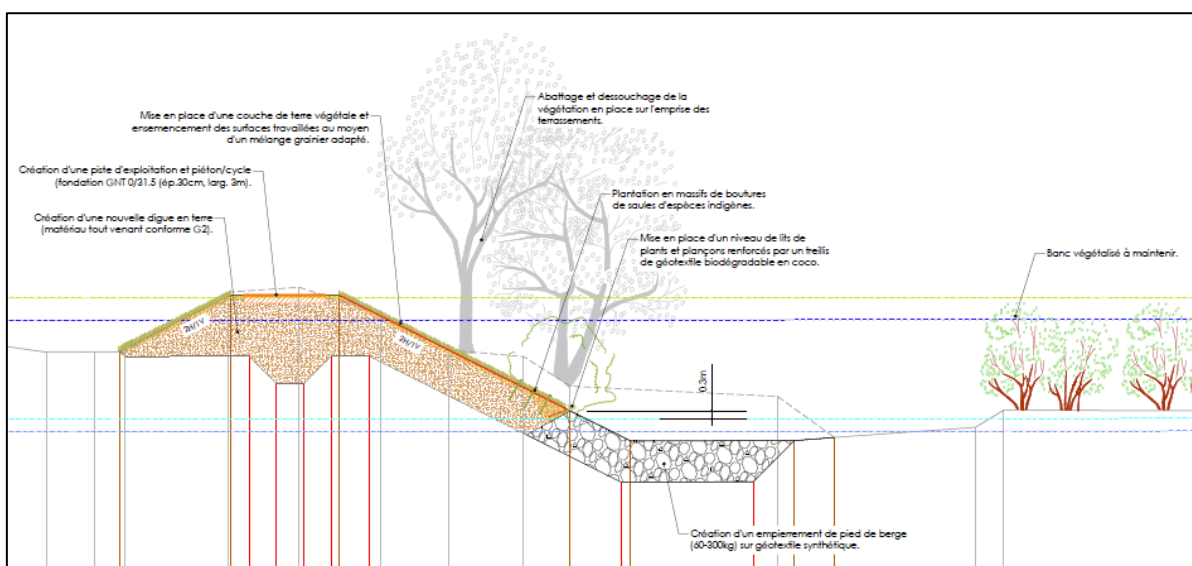


Figure 55 : Profil type RG-T7

Réflexion paysage

Ce tronçon sera enjambé par la nouvelle passerelle piétonne en projet.

5.2.2.4.6 Digue rive gauche RG-T8 à RG-T10 (T02 – Saint-Esprit / T01 – La Colonne)

Linéaire d'application : 330 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue mur.

Ce secteur correspond à la partie urbaine du secteur des places le long de la rue Paul Verlaine (RG-T8), puis de la place des Poètes (RG-T9), puis de la propriété située en amont immédiat du pont de l'Europe (RG-T10).

Sur la totalité du secteur est prévue la protection du pied de berge vis-à-vis de l'érosion externe par une technique mixte :

- Enrochement 60/300 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de juillet surélevé de 30 cm,
- Lits de plants et plançons 30 cm au-dessus du niveau du débit moyen mensuel de juillet établis sur un niveau (secteurs RG-T8 et RG-T9) puis sur trois niveaux (secteur RG-T10),
- Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de boutures de saules (secteurs RG-T8 et RG-T9) et de plantations indigènes adaptées (secteur RG-T10), puis de prairie en partie supérieure.
- Bèche de stabilisation :

- Epaisseur : 1.5 m,
- Largeur en partie supérieure : 6 m.

Un cheminement piéton est inséré dans le profil sur la risberme présente au droit des tronçons RG-T8 et T9, puis dans le talus terrassé au droit du tronçon RG-T10, sentier dont la continuité permettra de rejoindre les aménagements piétons déjà réalisés sous le pont de l'Europe. Au pied de ce cheminement, le talus amont est protégé par une technique mixte, ce qui permet de recréer un cordon ripicole indigène et adapté.

Au droit du tronçon RG-T8 (linéaire d'application : 190 m), l'altimétrie du TN aval est proche du niveau de la crue de projet, mais insuffisante pour garantir la revanche de 0.8 m. Le projet prévoit la réfection d'un perré en retrait du perré existant, surmonté d'un muret digue.

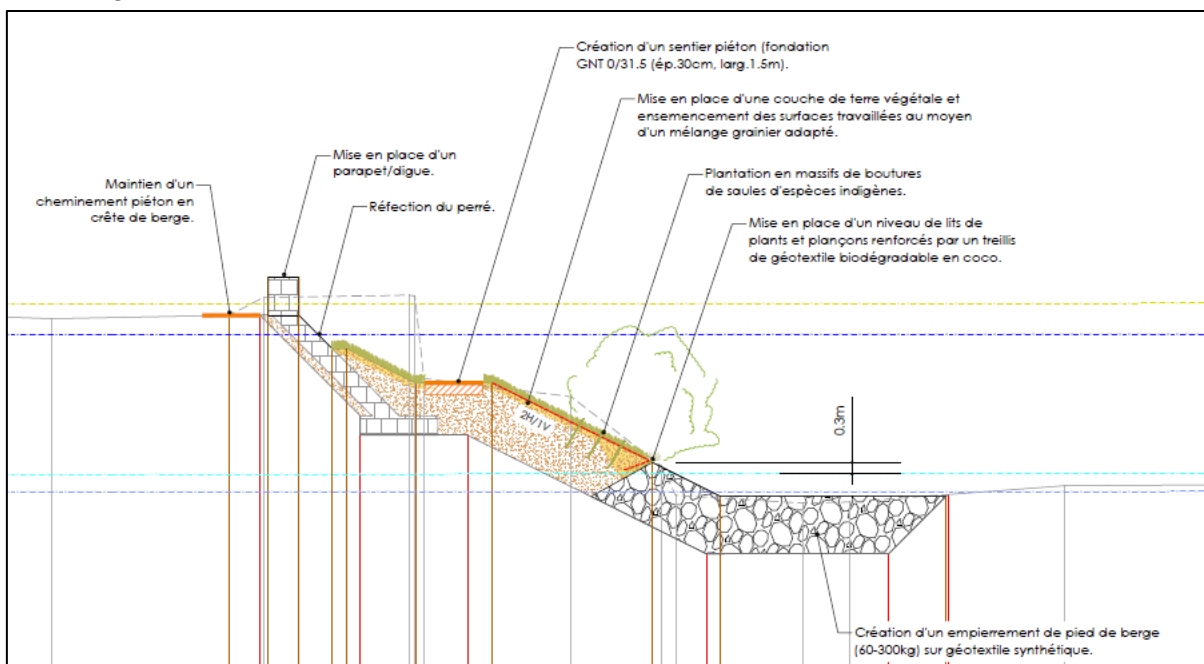


Figure 56 : Profil type RG-T8

Au droit du tronçon RG-T9 (linéaire d'application : 50 m), l'arase du mur existant est supérieure au niveau de Q_{100} +revanche. Ce mur, ainsi que le parapet qui le surmonte, sont maintenus en place.

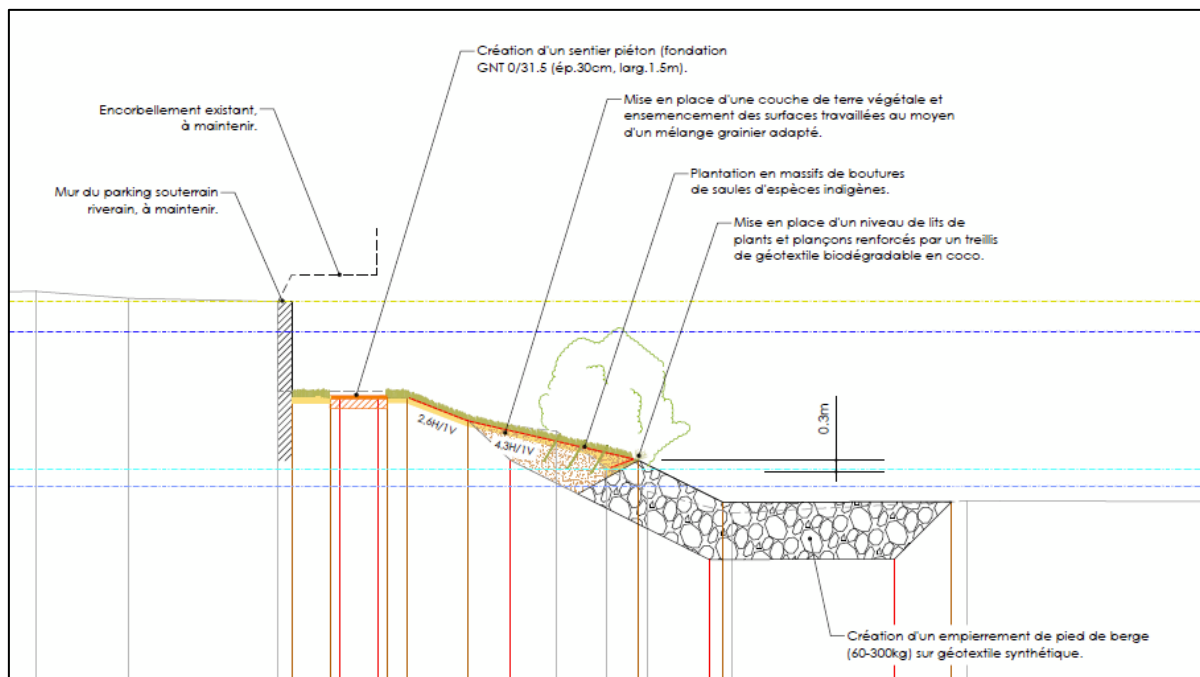


Figure 57 : Profil type RG-T9

Au droit de la propriété située en amont immédiat du pont de l'Europe (RG-T10), à l'instar du tronçon RG-T8, l'altimétrie du TN aval est proche du niveau de la crue de projet, mais insuffisante pour garantir la revanche de 0.8 m. De part et d'autre de la maison (talus existant très raide), le profil retenu consiste à gagner de l'espace sur le terrain privé pour adoucir suffisamment le talus pour assurer sa stabilité sans impact sur la section hydraulique. L'ouvrage de protection est constitué d'un muret digue en crête de berge. Les caractéristiques du profil sont les suivantes :

- Linéaire d'application : 75 m
- Pente de talus : 2H/1V,
- Mur préfabriqué de type T renversé
 - Hauteur totale : 1.3 à 1.8 m,
 - Largeur de la semelle : 1.1 m,
 - Semelle positionnée hors gel, reposant sur un béton de propreté.

Au droit de la maison elle-même, située en partie dans la digue actuelle, la mise en œuvre d'une paroi berlinoise devant le mur côté Arve est prescrite pour constituer l'ouvrage de protection. Les caractéristiques retenues au stade AVP les suivantes :

- Linéaire d'application : 20 m,
- Espacement des profilés métalliques : 1.5 m,
- Profondeur de fiche des profilés métalliques : 7.5 m,
- Hauteur des parement béton : 2.5 m.

Le dimensionnement de cet ouvrage sera à affiner au stade Projet.

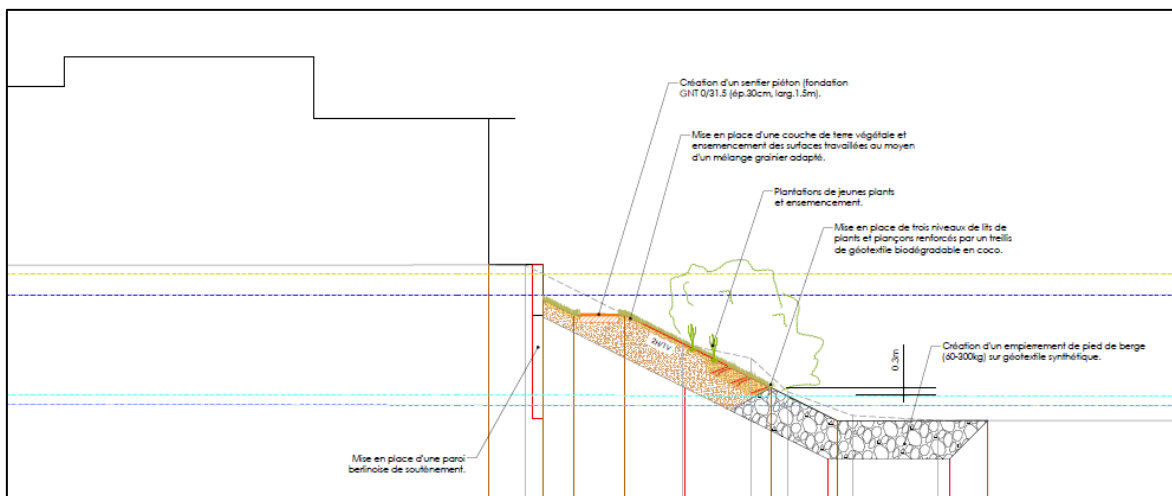


Figure 58 : Profil type RG-T10 au droit de la maison

Réflexion paysage

Le quartier des Places est aujourd'hui ouvert sur l'Arve avec de larges points de vue sur l'espace alluvial et la rive opposée. C'est une plus-value paysagère qui devra être maintenue, malgré les aménagements de la digue.

Les arbres existants (tilleuls ornementaux) seront néanmoins supprimés, il n'est pas possible de restaurer l'ouvrage en les conservant. Des bosquets au plus proche de l'Arve seront implantés. Un chemin-trottoir sera maintenu en partie haute sous forme de quai. Le mur de la digue fera office de garde-corps. Le maintien de ce trottoir est indispensable pour la commune de Bonneville, mais plus compliqué pour la reprise de l'ouvrage qui prendra plus de place en largeur qu'actuellement. Une vision globale, urbaine, devra être apportée en phase Projet afin de réduire la largeur de la voirie par endroit et maintenir un trottoir de 1,20 mètre minimum. En contrebas du mur, un chemin piéton et cycle (VTT) inondable permettra de relier le quartier des Places au pont de l'Europe en restant le long de l'Arve. En effet, la propriété au niveau du pont de l'Europe ne permet pas d'assurer la continuité du chemin haut qui doit contourner le pâté de maisons.

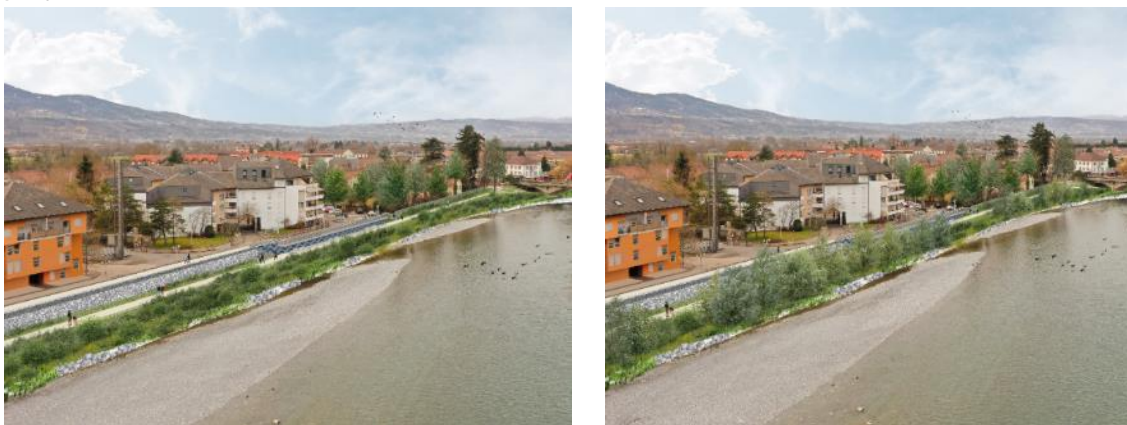
Des escaliers le long du mur pourront être créés, afin de relier les cheminements hauts et bas. Une rampe à l'amont de ce secteur permettra également de rejoindre la partie haute et la rampe de la future passerelle.

Ce chemin au plus près de l'eau sera une promenade fraîche et de qualité pour les usagers, un espace de contemplation, praticable hors crues et hautes eaux d'été.

Le mur béton du parking souterrain pourra être intégré de différente manière : fresques ou plantes grimpantes. Cependant, les plantes grimpantes nécessiteront un entretien important et devront également résister aux crues de l'Arve, c'est une proposition à étudier en phase Projet. Aucun mobilier urbain ne devra être implanté, il serait mis à mal à chaque crue. Cette terrasse alluviale accessible est la seule sur toute la traversée de l'Arve dans Bonneville. Elle reste néanmoins un espace naturel qui ne devra pas être anthropisé, seul le chemin inondable sera aménagé.

En partie aval, au droit de la propriété, le passage sera étroit, mais assuré grâce à la création d'une paroi berlinoise. Cet ouvrage sera impactant sur le plan paysager, c'est pourquoi il sera préférable de végétaliser son pied avec des boutures de saules plantés densément. La croissance rapide du saule assurera l'intégration de l'ouvrage et ses branches souples côté chemin pourront être régulièrement taillées sans dénaturer les sujets.

Les perrés sardes existants au droit de la maison seront supprimés, mais maintenus en aval immédiat de la maison, au plus proche de l'espace public réalisé par la commune de Bonneville, sous le pont de l'Europe. Au droit du quartier des places et à l'aval, au pied de la maison, les pierres taillées du perré sarde pourront être conservées et réutilisées pour la conception des talus de type "quai" et d'un mur contre la paroi berlinoise. Les transitions, entre ce mur qui dissimulera la paroi berlinoise et le perré sarde existant conservé en aval, devront être soigné et étudié plus finement au stade projet.



Photomontage : Atelier Polis- Quartier des Places 5 ans et 15 ans après travaux.

5.2.2.4.7 Digue rive gauche – RG-T11 (T01 – Bois Jolivet Aval)

Linéaire d'application : 100 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce secteur constitue une transition entre la berge existante enrochée liée au seuil du Pont de l'Europe et la nécessaire reprise complète de la berge à l'aval. Les enrochements du talus amont de berge sont ainsi maintenus et une reconstruction totale de la digue en haut de berge est réalisée, en remplacement d'un ancien perré.

Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pente des talus : 2.0H/1V,

Les talus et crêtes de digue hors emprise du chemin piétons et voie de service sont entièrement végétalisés avec un ensemencement indigène adapté.

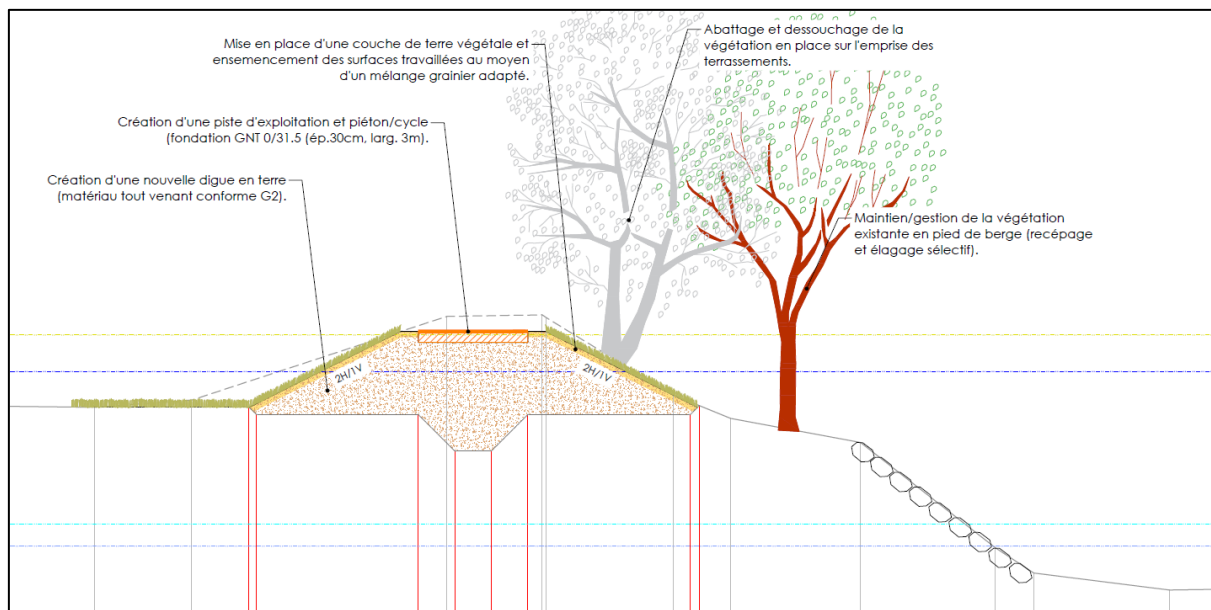


Figure 59 : Profil type RG-T11

5.2.2.4.8 Digue rive gauche – RG-T12 à RG T14 (T02 – Bois Jolivet Amont)

Linéaire d'application : 170 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce secteur est situé au droit du quartier de Bois Jolivet. L'altimétrie du TN est proche du niveau de la crue de projet, mais insuffisante sur la majeure partie du linéaire pour garantir la revanche de 1 m.

La hauteur importante des talus, qui impliquent une pente de stabilité plus douce (2.2H/1V), ainsi que l'exiguïté des emprises au droit de l'école, impose une réfection de l'ouvrage sous la forme d'un mur digue et la reprise complète du talus sous-jacent avec la suppression des remblais et anciens perré existants en haut de berge puis d'adoucir le profil de pente, ce qui permet de protéger efficacement la berge d'Arve dans un secteur particulièrement contraint. Le talus amont est protégé par une technique mixte, ce qui permet de recréer un cordon ripicole indigène et adapté, renforcé par la mise en place d'une série de 3 épis afin de réduire le risque d'érosion externe du pied de talus en place, associé à une diversification des habitats du lit mineur. Les caractéristiques de ces épis sont précisées au § 5.2.2.6.

Le muret digue s'interrompt momentanément sur environ soixante mètres, au droit du tronçon RG-T13, où l'altimétrie du TN devient supérieure au niveau de $Q_{100} + \text{revanche}$.

Sur l'ensemble du linéaire, une piste d'exploitation est mise en œuvre côté Arve, servant également de cheminement piéton. Au droit du profil P27025, contraint par l'angle de l'école, la continuité du cheminement s'effectue par un sentier rustique de 1.5 m de large.

Les caractéristiques géométriques du profil projeté sont les suivantes :

- Pente de talus : 2.2H/1V,
- Enrochement 60/300 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de juillet surélevé de 30 cm,
- Lits de plants et plançons 30 cm au-dessus du niveau du débit moyen mensuel de juillet établis sur trois niveaux
- Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de plantations indigènes adaptées puis de prairie en partie supérieure.

- Bèche de stabilisation :
 - Epaisseur : 1.5 m,
 - Largeur en partie supérieure : 6 m.
- Mur préfabriqué de type T renversé (RG-T12 et RG-T14),
 - Linéaire d'application : 110 m,
 - Hauteur totale : 0 à 2.2 m,
 - Largeur de la semelle : 1.5 m,
 - Semelle positionnée hors gel, reposant sur un béton de propreté.

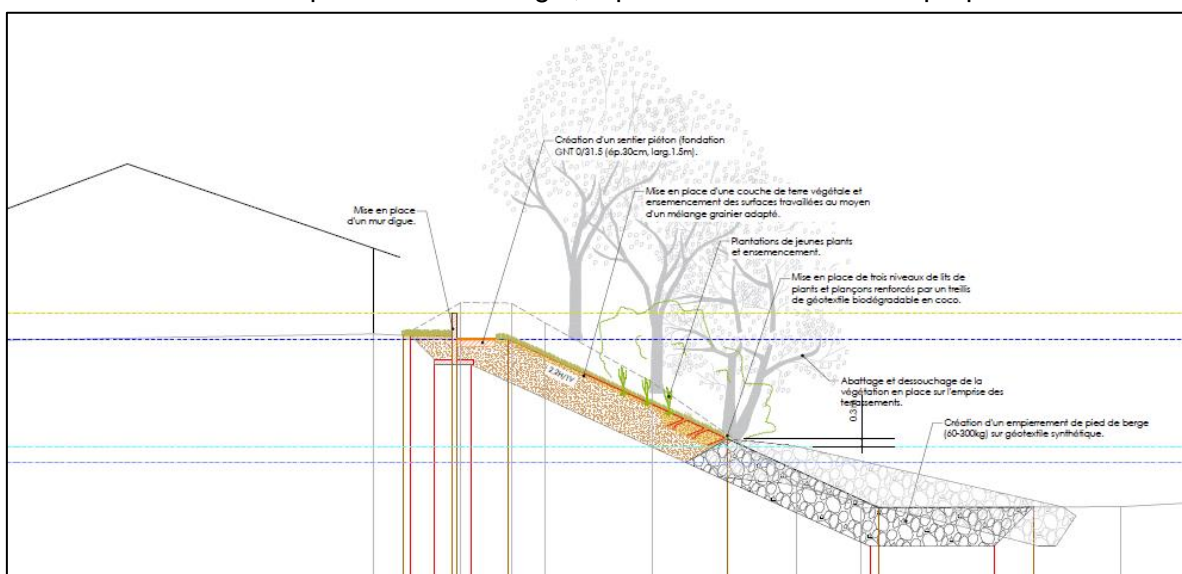


Figure 60 : Profil type RG-T12

Réflexion paysage

Sur ce tronçon, la digue et la berge seront entièrement reprise entraînant la suppression de la végétation existante. Quelques années seront nécessaires pour retrouver une végétation arbustive dense, d'abord composée de saules, puis par une grande diversité d'arbustes endémiques.

Le futur chemin piéton, aujourd'hui non identifié et limité à une sente, s'appuiera sur le muret-digue (revanche). Afin de garder une cohérence sur ce tronçon piéton, il sera préférable de maintenir le muret tout au long de l'école, sa hauteur suivra l'altimétrie du chemin (tronçon RGT12, RGT13 et RGT14).

Une nouvelle clôture sera installée sur le muret en cas de place restreinte ou dans le meilleur des cas dans une haie entre le muret et l'école.



Photomontage : Atelier Polis- Quartier Bois Jolivet 15 ans après travaux.

5.2.2.4.9 Digue rive gauche – RG-T15 à T17 (T02 – Bois Jolivet Amont / T01 – Bois Jolivet Aval)

Linéaire d'application : 305 m,

Type d'intervention : Confortement aval (épaulement/mur béton).

Ce secteur présente des caractéristiques proches du précédents, mais avec une emprise disponible plus importante, autorisant un confortement par l'aval.

Au droit des tronçons RG-T15 et T17, ce confortement prend la forme d'un épaulement donc les caractéristiques sont les suivantes :

- Linéaire d'application : 240 m,
- Largeur en crête : 7.5 m,
- Pente du talus aval : 2.0H/1V,

La largeur de 7.5 m permet de se prémunir du risque de glissement du talus amont, sur lequel aucune intervention est prescrite (conservation d'une largeur minimale de 4 m en cas de glissement du talus amont).

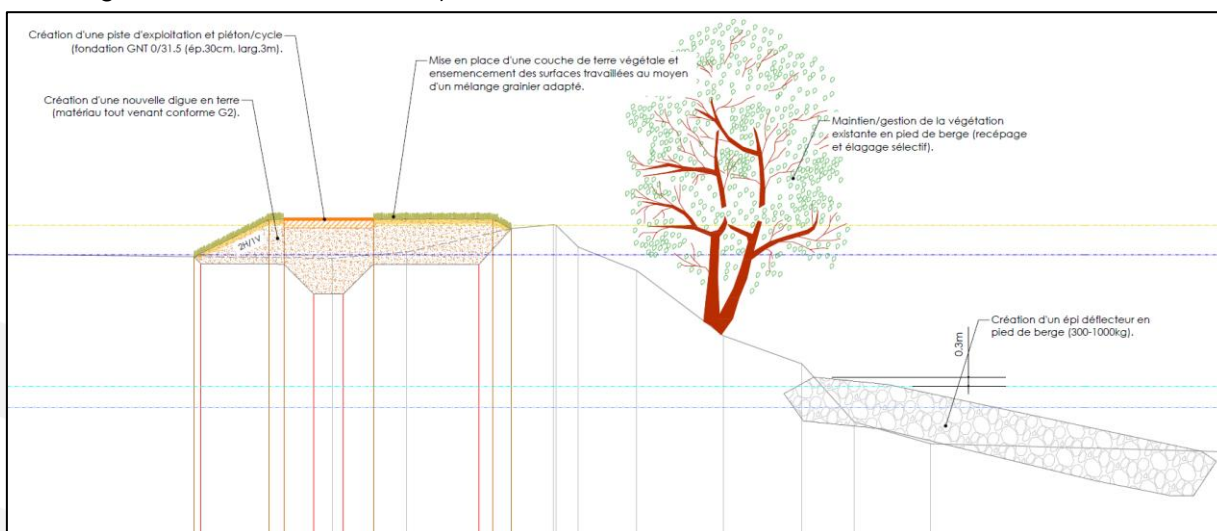


Figure 61 : Profil type RG-T15

Au droit du tronçon RG-T16 (voirie de la résidence), ce confortement prend la forme d'un mur digue au droit du talus aval de la digue en place.

- Mur préfabriqué de type T renversé (RG-T12 et RG-T14),
 - Linéaire d'application : 65 m,
 - Hauteur totale : 1.9 à 3.8 m,
 - Largeur de la semelle : 2.3 m,
 - Semelle positionnée hors gel, reposant sur un béton de propreté.

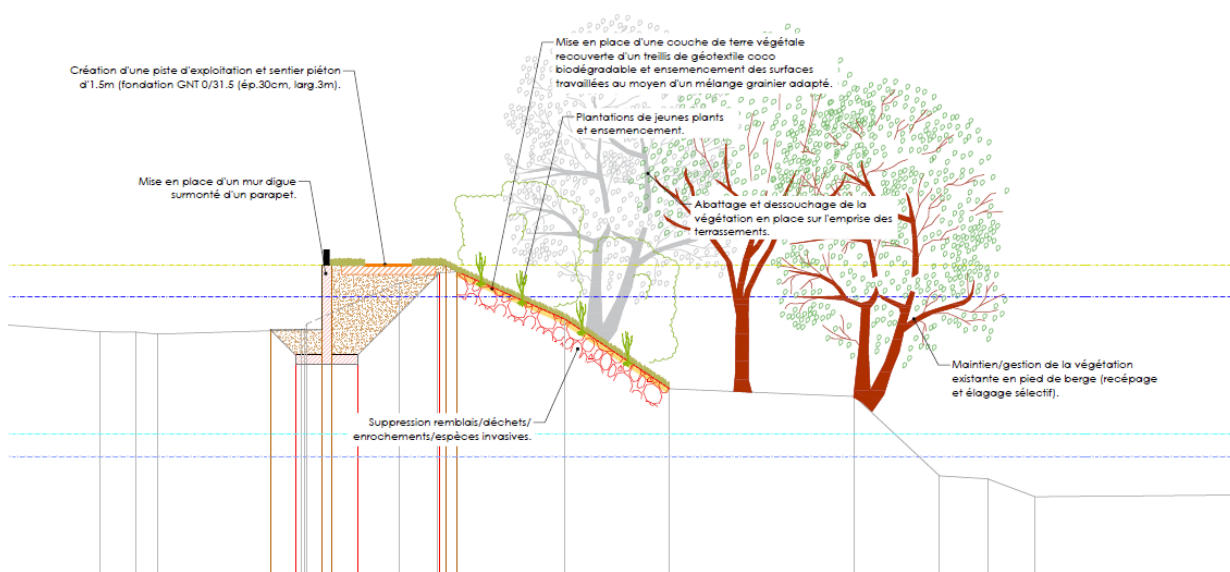


Figure 62 : Profil type RG-T16

Au droit du raccordement avec le tronçon RG-T15, un local annexe de la résidence est présent. Les modalités de raccordement au droit du local seront à étudier au stade PRO.

Au droit du tronçon RG-T15, dans la continuité des secteurs RG-T12 à RG-T14, 3 épis en protection du pied de la berge seront mis en place.

Au droit des tronçons RG-T16 et T17, une risberme est présente en pied de la digue existante. La partie supérieure de la berge, constituée de remblais divers, voire de déchets sera requalifiée avec la purge des matériaux existants et leur remplacement par des matériaux gravelo-terreux d'apport, leur ensemencement avec un mélange grainier indigène et adapté, la couverture des substrats avec un géotextile tissé biodégradable puis la plantation d'espèces ripicoles indigènes.

Enfin, à l'extrémité aval du tronçon RG-T17, un thalweg est présent avant le pont de la prison, nécessitant la mise en place d'un muret digue pour assurer la continuité hydraulique entre l'épaulement et le pont de la prison.

Réflexion paysage

Les pentes de l'épaulement à l'arrière pourront être diversifiées et sinuées dans le boisement, évitant les arbres existants lorsque cela est possible.

En crête, un sentier sera aménagé et assurera la continuité piétonne entre le pont de l'Europe et la passerelle piétonne à l'amont.

Plus en aval, la digue sera reprise et reconstituée entièrement. Une végétation dense sera replantée (illustration ci-contre). La continuité piétonne sera assurée jusqu'à la

confluence. Côté val, un garde-corps sera par endroit nécessaire, lorsque la chute est possible entre le chemin et la voirie de desserte des garages.



Photomontage : Atelier Polis- Quartier Bois Jolivet à l'aval de la passerelle - 15 ans après travaux.

5.2.2.4.10 Digue rive gauche – RG-T18 (T01 – Merlon de la Prison)

Linéaire d'application : 175 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce secteur est situé en aval du pont du Quai d'Arve (quartier de la prison). Il s'agit ici d'une reprise intégrale de l'ouvrage dont la cote supérieure actuelle est proche de la cote Q_{100} +revanche. La reprise de l'ensemble du talus amont permet également de supprimer le petit merlon qui fait office de digue aujourd'hui puis de le remplacer par un muret/digue de faible hauteur, ce qui permet d'adoucir le profil de pente à quelques 2.2H/1V afin de protéger efficacement la berge d'Arve dans un secteur particulièrement étroit et sollicité du cours d'eau. Le talus amont est protégé par une technique mixte, ce qui permet de recréer un cordon ripicole indigène et adapté.

Les caractéristiques du profil sont les suivantes :

- Pentes de talus : 2.2H/1V,
- Enrochement 1000/3000 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de juillet surélevé de 30 cm,
- Lits de plants et plançons 30 cm au-dessus du niveau du débit moyen mensuel de juillet établis sur quatre niveaux en fonction des contraintes hydrauliques plus élevées sur ce tronçon étroit de l'Arve,
- Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de plantations indigènes adaptées puis de prairie en partie supérieure.
- Bèche de stabilisation :
 - Epaisseur : 2 m,
 - Largeur en partie supérieure : 6 m,

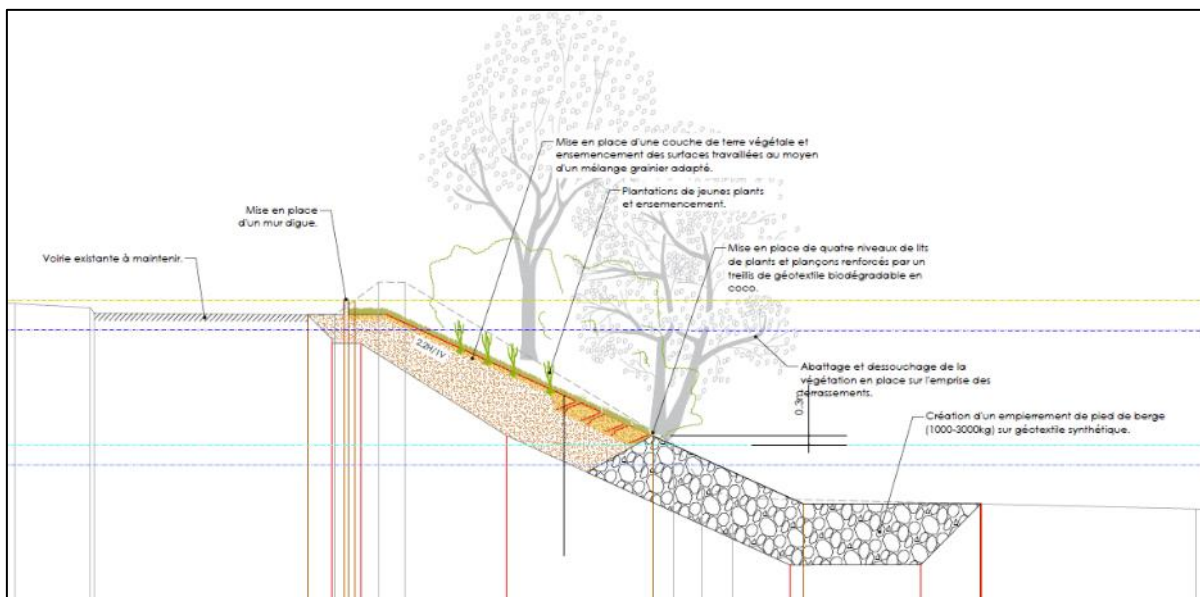


Figure 63 : Profil type RG-T18

Réflexion paysage

La suppression des arbres existants ouvrira de nouvelles vues sur l'Arve, mais aussi sur le bâtiment de la prison depuis la rive opposée. La végétation de la technique mixte améliorera rapidement le paysage après travaux, car les lits de plants et plançons, composés de saules se développent rapidement.

Les arbustes indigènes plantés au-dessus assureront une diversité du corridor après les travaux.

La commune engagera prochainement une nouvelle étude pour l'aménagement de l'espace Queue du Borne. Les propositions d'aménagements devront être intégrées et cohérentes avec le projet de confortement des digues de l'Arve et du Borne.

5.2.2.4.11 Digue rive gauche – RG-T19 (Merlon Prison) → hors SE

Linéaire d'application : 275 m,

Type d'intervention : dépose de la digue et adoucissement de la berge

Au droit de ce secteur, l'altimétrie du TN est supérieur au niveau de Q_{100} + revanche. En conséquence, il n'est pas nécessaire de refaire une digue sur ce tronçon. Cependant, en raison de la raideur du talus de berge, il est proposé la requalification complète de la partie supérieure de cette dernière avec la suppression d'un merlon existant et l'adoucissement de la pente du talus (4H/1V).

Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Pentes de talus : 4H/1V,
- Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de plantations indigènes adaptées et de prairie.

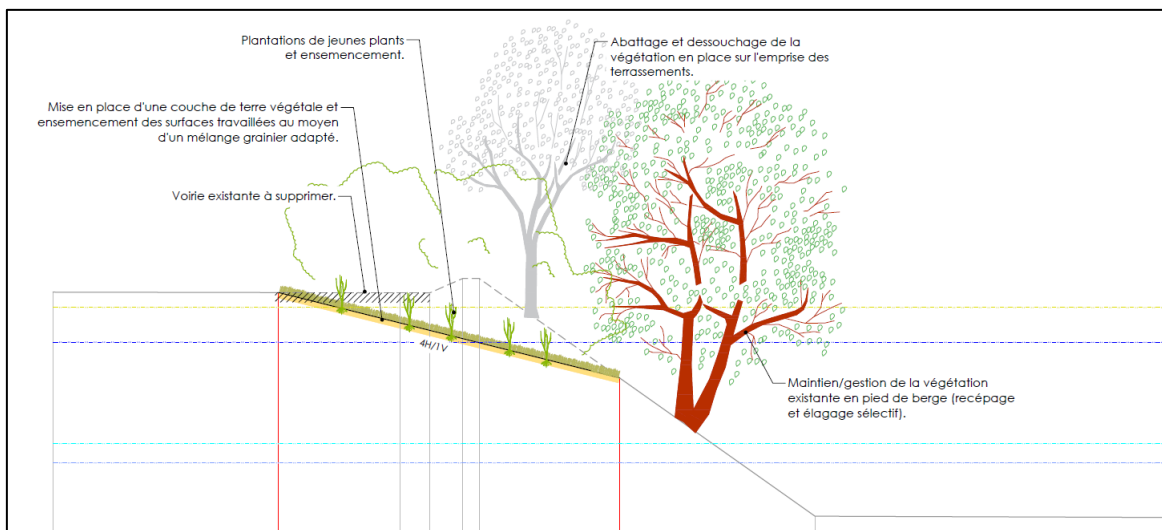


Figure 64 : Profil type RG-T19

5.2.2.4.12 Digue rive gauche – RG-T20 (Confluence) → Hors SE

Linéaire d'application : 105 m,

Type d'intervention : terrassement/adoucissement de la confluence Arve/Borne.

Ce secteur constitue la confluence de l'Arve avec le Borne. De même que dans l'opération du Borne, il est ainsi prévu de dynamiser l'activité alluviale au droit de cet élargissement avec un abaissement de la pointe à la cote des eaux de fonte des neiges (mai sur le Borne et juillet sur l'Arve). Sur ces surfaces basses, mise en place de pieux vivants et boutures de salicacées en massifs dans le but d'initier l'implantation d'un type de végétation pionnière indigène et adaptée.

Réflexion paysage

Le secteur confluence a fait l'objet d'une réflexion paysagère dans le cadre de la phase 1 : diagnostic global Borne et Arve.

5.2.2.5 Pistes d'exploitations

La réalisation d'une piste d'exploitation en crête est intégrée sur la quasi-totalité du linéaire, excepté :

- Partie aval du tronçon RG-T4 (420 m) et RG-T5 (Bordet T01) : en raison la présence de la voirie en pied (quai du Bargy), une piste en crête n'est pas nécessaire ; celle-ci est donc réduite à un cheminement d'1m de large au droit de la partie aval du tronçon RG-T4,
- RD-T6 (T02 – Digue du Trésor public) : présence d'une voirie en pied de talus (quai du général Dorange) et maintien de la piste existante en crête,
- RG-T8 à RG-T10 (Places T01 et T02) : voiries existantes en crêtes, mise en œuvre d'un cheminement de 1 m de large à mi-talus),
- RG-T12 (T02 – Bois Jolivet Amont) : sur une vingtaine de mètres où l'emprise est insuffisante à l'angle de l'école, mise en œuvre d'un cheminement de 1m de large pour garantir la continuité piétonne ;
- RG-T16 (T01 – Bois Jolivet Aval) : présence de l'accès aux garages de la résidence en pied d'ouvrage, maintien de la continuité piétonne en crête par un cheminement de 1 m large.

Cette piste d'exploitation est constituée de grave non traitée (GNT) 0/31.5, sur une largeur de 3 m et une épaisseur de 0.3 m ; des accotements enherbés de 0.5 m de largeur seront réalisés de part et d'autre de la piste.

Hormis pour les tronçons au droit desquels une coupure hydraulique est mise en œuvre (palplanche ou mur béton), l'intégration d'une couche de grave sur la partie supérieure de l'ouvrage est de nature à augmenter fortement la perméabilité dans les 30 derniers centimètres (revanche). En conséquence, une étanchéité est prolongée jusqu'au niveau de $Q_{100} +$ revanche via la mise en place d'une géomembrane. Les sujétions d'ancrage et de confinement de cette géomembrane nécessitent, au droit des secteurs concernés, de relever l'arase de la piste de 10 cm par rapport à l'arase usuelle de $Q_{100} +$ revanche (cf. figure ci-après).

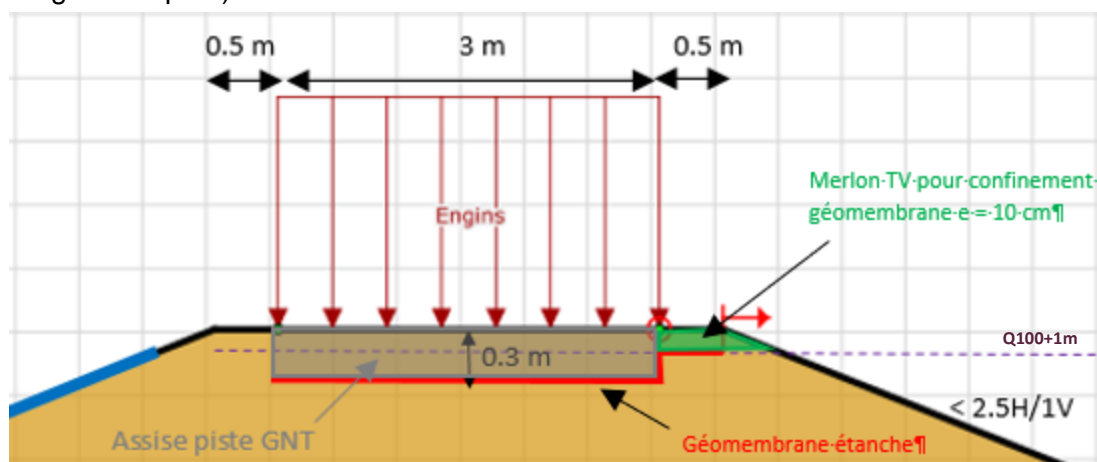


Figure 65 : Etanchéité au droit des pistes d'exploitation.

Concernant les cheminements de 1 m de large, leur structure est identique à celle des pistes d'exploitation.

5.2.2.6 Restauration hydro-écologique

Les épis seront implantés perpendiculairement aux berges. Ils ont pour but premier de participer à la protection de la partie basse des berges sur des sections particulièrement contraintes, mais ils permettent également en diversifiant les écoulements proches de la berge de participer à la diversification des habitats en favorisant localement le dépôt de matériaux en transport par l'Arve (création de petits bancs de sables eux-mêmes pouvant initier l'implantation de végétation hélophytique, création de sur-profondeurs, etc.). Ils seront des ouvrages courts (environ 10-15 mètres). Ils seront de forme plongeante et constitués d'enrochements libres rangés. Leur côte supérieure sera établie quelques 30 cm au-dessus de la cote atteinte par les hautes eaux moyennes de fonte des neiges (juillet). Leur espacement est variable suivant les tronçons, globalement entre 30 et 80 mètres Leur base arrière (ancrage en berge) mesurera 7 mètres alors que leur largeur en pointe mesurera environ 3 mètres.

5.2.2.7 Voie d'accès aux digues du système d'endiguement

La largeur des digues projetées est de minimum 3 m afin de permettre le passage des engins d'entretien du SM3A. Les principales voies d'accès aux digues de l'Arve rive gauche et aux digues du Borne rive droite sont représentées avec la couleur orange sur les deux figures suivantes :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne" - ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

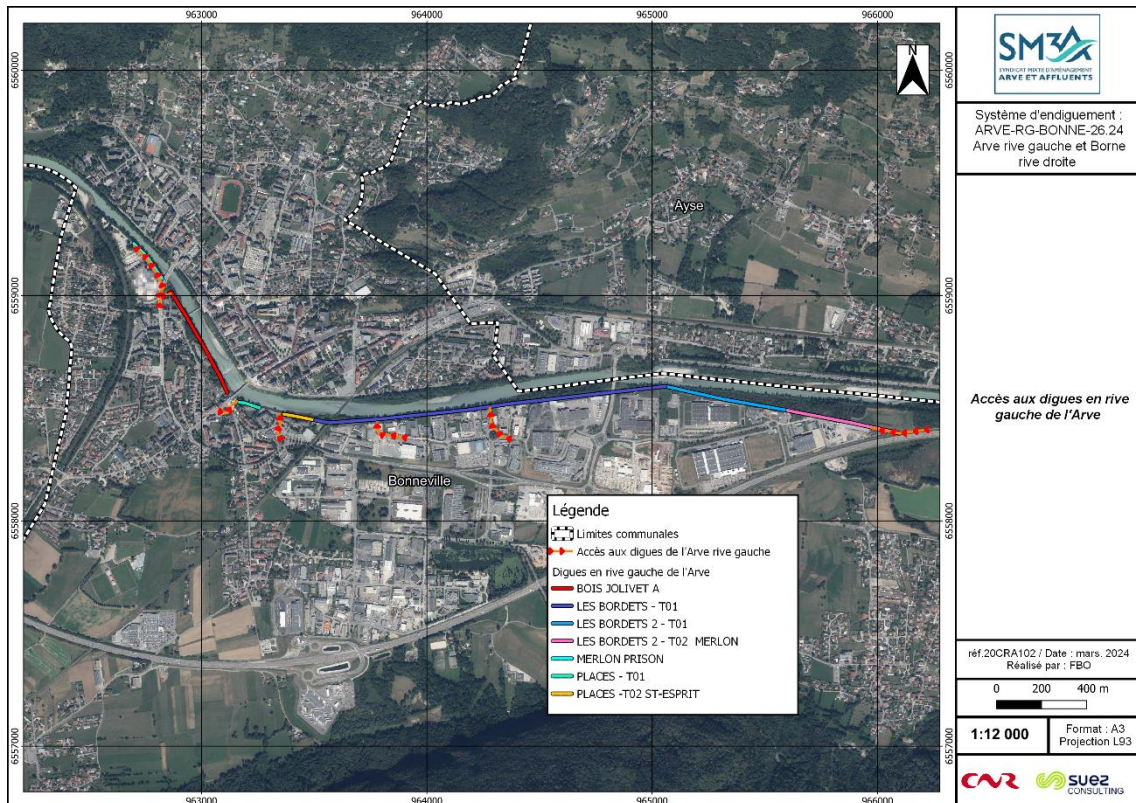


Figure 66 : Voies d'accès au système d'endiguement – digues de l'Arve rive gauche



Figure 67 : Voies d'accès au système d'endiguement – digues du Borne rive droite

Les rampes permettant l'accès aux digues avec des engins ou des VL sont intégrées au programme de travaux. Certaines sont déjà existantes.

5.2.3 Phasage des travaux

5.2.3.1 Description du phasage des travaux

Les travaux sur les digues de l'Arve (rive gauche et rive droite) sont séparés en 4 phases. Sur les digues en rive gauche de l'Arve, on retrouve la réalisation des différents tronçons homogènes par phases suivantes :

- Phase 1 : Tronçons RG-T18 à RG-T20 ;
- Phase 2 : Tronçons RG-T7 à RG-T17 ;
- Phase 3 : Tronçons RG-T1 à RG-T6.

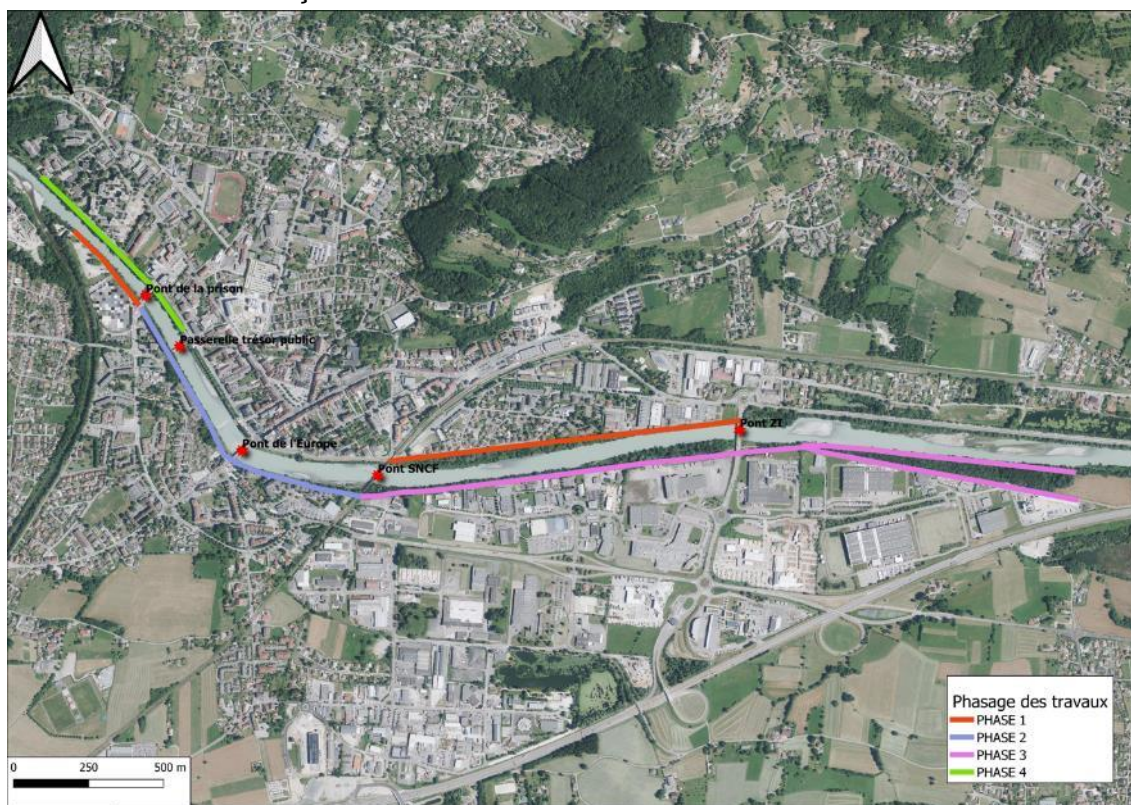


Figure 68 - Phasage des travaux

Le planning prévisionnel des travaux, sous réserve d'obtention de l'arrêté préfectoral autorisant les travaux, est comme suit :

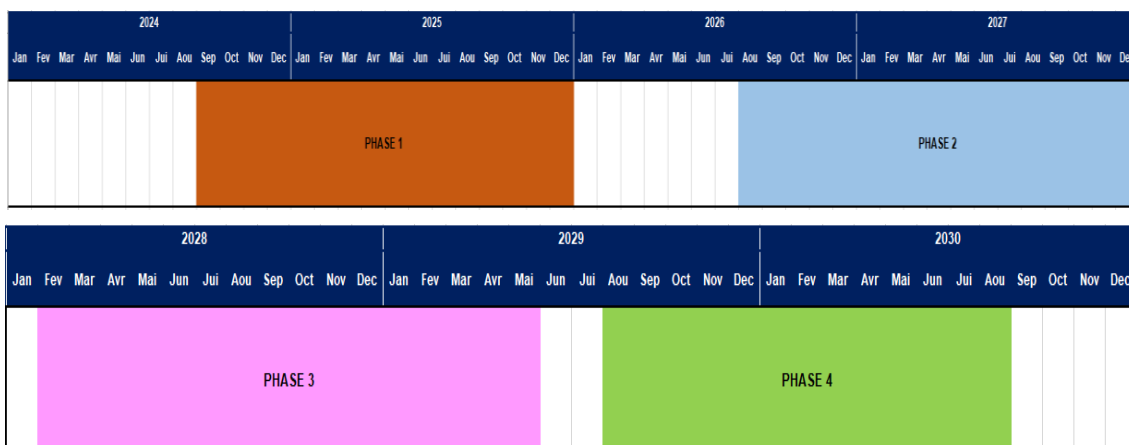


Figure 69 : Planning prévisionnel des travaux

Compte tenu du planning des travaux, il est convenu avec les services de l'Etat (DREAL/DDT) lors de la réunion du 21/06/2023 de ne pas classer les ouvrages en « situation intermédiaire » - par phase. L'objectif de l'étude de dangers est donc l'étude pour le classement du système d'endiguement à l'état final.

Cependant, comme cela est précisé dans l'article 3 de l'arrêté du 30 septembre 2019, l'étude de dangers évalue les situations particulières pendant la réalisation des travaux tenant compte de la durée prévue pour ceux-ci. Il a donc été décidé d'analyser à la suite des phases 1 et 2 les écoulements dans l'Arve et les éventuels atteintes d'enjeux au droit des digues dont les travaux sont prévus lors des phases 3 (pour la rive gauche) et 4 (pour la rive droite – faisant l'objet d'une EDD à part).

Les différents états suivants ont donc été étudiées :

- **Etat actuel** : cette analyse a été menée dans le cadre de l'EDD 2019 CNR, que l'on retrouve en annexe de la présente étude. Les risques d'inondation à l'arrière des digues ont été évalués. Cette étude de dangers définissait les niveaux de protection et de dangers suivants :

DIGUE	Niveau protection Etat actuel	Niveau de Sureté Etat actuel	Niveau dangers Etat actuel	Niveau protection Etat projet	Niveau de Sureté Etat Projet	Niveau dangers Etat projet
LES BORDETS 2-T02 MERLON	Q10 Arve 525 m3/s Cas 1	Q10 Arve Cas 1	Q100 Arve 870 m3/s Cas 1	Q100 Arve 870 m3/s Cas 2	Q200 Arve 972 m3/s Cas 2	Q300 Arve 1031 m3/s Cas 2
LES BORDETS 2-T01						
LES BORDETS-T02						
LES BORDETS-T01						
LES PLACES - T02 -ST ESPRIT						
LES PLACES - T01						
BOIS JOLIVET A						
MERLON PRISON						
DIGUE DES OUCHES	Q10 Borne 120 m3/s Cas 1	Q10 Borne Cas 1	Q100 Borne 180 m3/s Cas 1	Q100 Borne 180 m3/s Cas 1 (Ouches) et Cas 2	-	Q200 Borne 195 m3/s Cas 1 (Ouches) et Cas 2
BOIS JOLIVET B						
QUEUE DU BORNE						

Figure 70 - Niveau de référence de l'état actuel (source : EDD Bonneville Ayze, CNR, 2019)

- **Etat intermédiaire** - situation particulière durant les travaux : travaux des phases 1 et 2 finalisés // les travaux de la phase 3 et 4 ne sont pas encore réalisés. Pour l'état intermédiaire, les digues à l'amont sont en état initial, celle-ci n'ont donc pas de zone protégée, car le niveau de sûreté justifié par l'EDD de CNR correspond au niveau de mise en charge de la digue.

Il est recommandé pour cet état intermédiaire de mettre en place des mesures de gestions particulières en cas de crue, dont les niveaux sont conformes avec les conclusions de l'étude de dangers menée par CNR sur l'état initial des digues. Des mesures de gestions recommandées ont été rédigées au chapitre 9.9 de la présente étude de dangers.

- **Etat final** : les travaux de confortement des digues de l'Arve sont finalisés. A la suite de la réalisation de ces travaux, il n'est pas constaté de venues d'eau en aval des digues pour une crue de temps de retour 100 ans, en considérant le bon fonctionnement des vannes de régulation des réseaux traversants.

5.2.3.2 Travaux - Mesures temporaires prises contre les crues et tempêtes

Durant la période de rénovation des ouvrages existants, le risque de crue ou de tempêtes entraînant une montée du niveau de l'eau dans l'Arve et le Borne est présent. C'est pourquoi plusieurs mesures seront mises en place afin de garantir la sécurité des différents enjeux présents derrière les ouvrages de protection en maintenance.

- La réfection des ouvrages de type digue se fera par passe maximum de 50 m à 100 m. Un protocole de confortement rapide sera établi en cas d'alerte crue. Ce protocole intégrera aussi des prescriptions de maintien de la continuité de la digue de façon qu'elle remplisse son rôle durant les phases d'arrêt de chantier.
- Lors des périodes de travaux, un batardeau de protection sera mis en place, à la fois pour mettre la zone d'opération hors d'eau, mais aussi pour protéger les installations de chantier contre une crue de période de retour 5 ans.
- Des échelles limnimétrique seront mises en place en amont des zones de chantier et des seuils d'alerte seront fixés.
- Des seuils d'alerte seront aussi fixés aux stations limnimétrique en amont (station de Sallanches sur l'Arve ou Saint Jean de Sixt sur le Borne) et le Giffre à Marignier.
- D'une manière générale, les travaux seront engagés, dans la mesure du possible, sur des périodes de basses hydraulicités.

5.3 Description fonctionnelle du système d'endiguement

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019, la description fonctionnelle du système d'endiguement comporte une étude hydraulique des écoulements qui se produisent, en tenant compte du système d'endiguement, autour de la zone protégée sans y pénétrer jusqu'au niveau de protection (Q100).

Le modèle mathématique utilisé pour l'étude hydraulique est décrit au chapitre 4.3 (+ rapport en annexes). Les simulations hydrauliques, pour le fonctionnement nominal, ont été réalisées pour une occurrence de crue Q100 avec la géométrie projet.

Des adaptations ont été apportées au modèle état actuel pour intégrer l'avant-projet de confortement sur les digues du Borne et de l'Arve.

Les principales adaptations apportées au modèle état actuel sont :

- Actualisation des crêtes de digue ;
- Prise en compte des bancs dans le lit mineur de l'Arve ;
- Intégration des épis ;
- Abaissement en rive gauche de l'Arve en amont du pont de la ZI (Bouchet T02)

Crue Q100 de l'Arve – Situation particulière en travaux ou état intermédiaire

Comme cela est précisé dans l'article 3 de l'arrêté du 30 septembre 2019, l'étude de dangers évalue les situations particulières pendant la réalisation des travaux tenant compte de la durée prévue pour ceux-ci. Il a donc été décidé d'analyser à la suite des phases 1 et 2 les écoulements dans l'Arve et les éventuels atteintes d'enjeux au droit des digues dont les travaux sont prévus lors des phases 3 et 4.

Ainsi, à la suite de la réalisation des phases 1 et 2 des travaux, on retrouve les venues d'eau présentées dans la Figure 71 pour une crue de temps de retour 100 ans. En effet, le niveau de danger défini par l'EDD de CNR de 2019, sur les digues existantes, correspondrait à une crue de temps de retour 100 ans. La survenue d'une telle crue emmène donc une brèche, qui a été modélisé sur le tronçon du secteur entre le pont de la ZI et le pont SNCF.

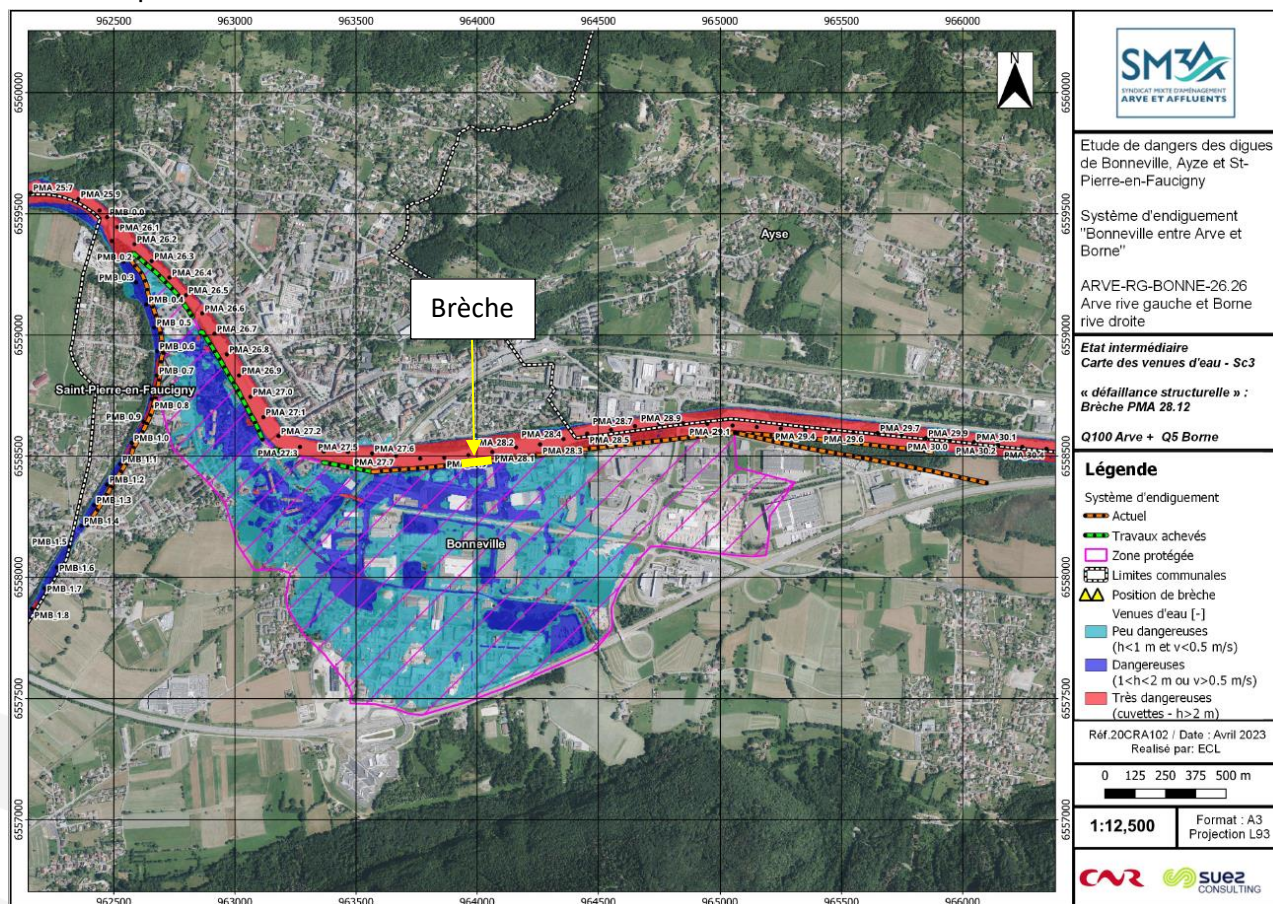


Figure 71 : Venues d'eau pour une crue de temps de retour 100 ans, à la suite d'une brèche en état de travaux (phase 1 et 2 réalisées)

A noter que les digues du Borne sont considérées en état de travaux dans cet état intermédiaire.

Des mesures de gestion de la situation particulière en travaux ont été recommandées par le bureau d'étude agréé au chapitre 9.BIS.

Crue Q100 de l'Arve – état final

Le présent paragraphe explicite le mécanisme des écoulements d'une crue centennale. Aucun débordement n'est observé pour cette occurrence de crue au droit des enjeux de la zone protégée.

La modélisation (voir figure ci-dessous) montre que la crue centennale de l'Arve ne déborde pas dans la zone protégée par le système d'endiguement en situation de travaux achevés.

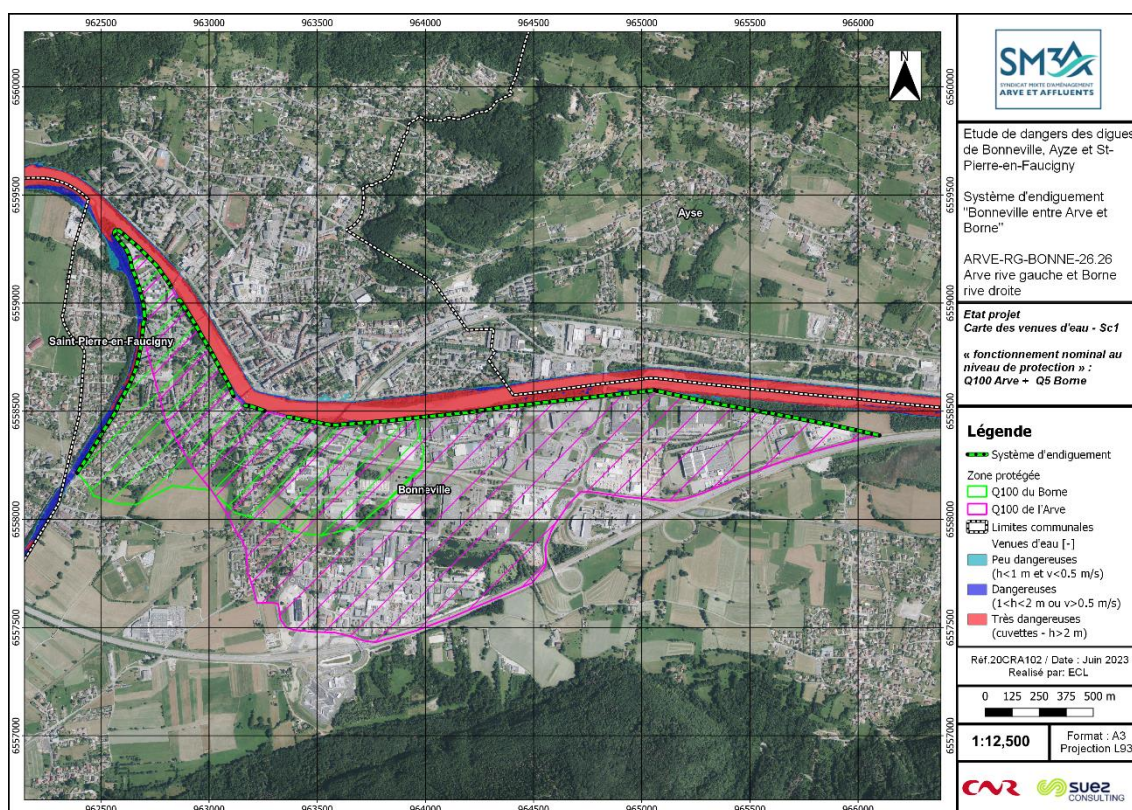


Figure 72 : Cartographie des venues d'eau en Q100 Arve à l'état final

Pour rappel, l'emprise en « vert » représente la zone protégée par les digues du Borne contre la crue centennale du Borne.

6. RETOUR D'EXPERIENCE CONCERNANT LA ZONE PROTEGEE ET LE SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 définissant le plan de l'étude de danger des barrages et des digues et en précisant le contenu, la rubrique 6 « Retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement » est établie en préparation du chapitre 7 pour orienter la réalisation du diagnostic approfondi. Il vise aussi à orienter, en fonction des résultats du diagnostic approfondi, l'élaboration des consignes de surveillances et des consignes de surveillance lors des crues ou des tempêtes en fonction des points particuliers de fragilité identifiés sur les tronçons du système d'endiguement ou ses équipements annexes.

6.1 Présentation de la démarche

6.1.1 Obligations réglementaires

La rubrique 6 de l'arrêté du 30 septembre modifiant l'arrêté du 7 Avril 2017 définissant le plan de l'étude de dangers, impose au responsable mentionné à l'article R. 214-115 du code de l'environnement (concessionnaire d'un barrage de classe A ou B ou d'une digue de classe A, B ou C) les obligations suivantes :

- 1° La liste et la description des incidents et accidents survenus sur l'ouvrage ;
- 2° Les exemples connus d'incidents et d'accidents survenus sur des ouvrages de même type ;
- 3° Les scénarios de défaillance qui peuvent être mis en évidence par l'étude d'accidentologie faite en exploitant les informations mentionnées dans les deux alinéas précédents et l'analyse de ces scénarios.

6.1.2 Méthodologie

Nous avons analysé les événements significatifs survenus sur le système d'endiguement en nous appuyant sur les renseignements, analyses, mesures et retours d'expériences effectués disponibles et notamment sur les données historiques transmises par le S.M.3.A. (Obligation n°1) et notamment par le biais de l'étude historique réalisée par la société Acthys Diffusion en juillet 2017. Dans cette partie, nous mentionnerons les événements particuliers survenus sur le site tels que les crues d'importance significative et les séismes, y compris lorsqu'ils n'ont pas entraîné d'incident notable.

Dans un deuxième temps, nous évoquerons les événements ayant eu lieu sur d'autres tronçons du bassin versant de l'Arve et même plus généralement sur d'autres ouvrages du même type. Ces données permettront notamment d'éclairer la dynamique des phénomènes et leur occurrence (Obligation n°2).

Ces éléments permettront d'alimenter les modes de défaillances pouvant survenir sur les ouvrages en différenciant les agressions potentielles externes et internes (Obligation n°3).

6.2 Défaillances, accidents, incidents et évolutions lentes survenus sur les ouvrages

6.2.1 Crues historiques sur le système

D'après l'étude historique, depuis le XVII^e siècle (1651), 154 crues (113 sur l'Arve et 41 sur le Borne son affluent) ont eu cours sur le système d'endiguement de Bonneville entre Arve et Borne et 60 l'ont impacté matériellement.

La plupart des crues ayant eu lieu avant les années 1965 sont surtout localisées durant la période automnale, du fait des fortes précipitations ou au printemps en combinaison avec la fonte des neiges.

Le Tableau 6 (chapitre 4.2.3), tiré de l'étude historique fait état des crues ayant eu le plus d'impact.

Plusieurs débits ont été soit calculés soit estimés aux abords de l'endiguement étudié.

Localisation	1852	1859	2015
Pont de Bonneville (Arve)	785-1050 m ³ /s	912-1000 m ³ /s	777m ³ /s*
Confluence avec le Borne	1250 m ³ /s	-	-
Amont du modèle hydraulique (Borne)	-	-	100m ³ /s*

Tableau 16 : Débits estimés et mesurés durant différentes crues de l'Arve et/ou du Borne dans le secteur de l'endiguement

*Débit obtenu grâce au modèle ISL.

On note également la très récente crue exceptionnelle de novembre 2023. Cette dernière n'a pas causé de dégâts sur les digues existantes (excepté les érosions marquées au droit de la confluence avec le Borne – secteur de berge). Son débit est estimé à plus de 700 m³/s au droit de Bonneville.

La carte en Figure 73 localise les crues en fonction de leur siècle d'occurrence sur un ortho photoplan.

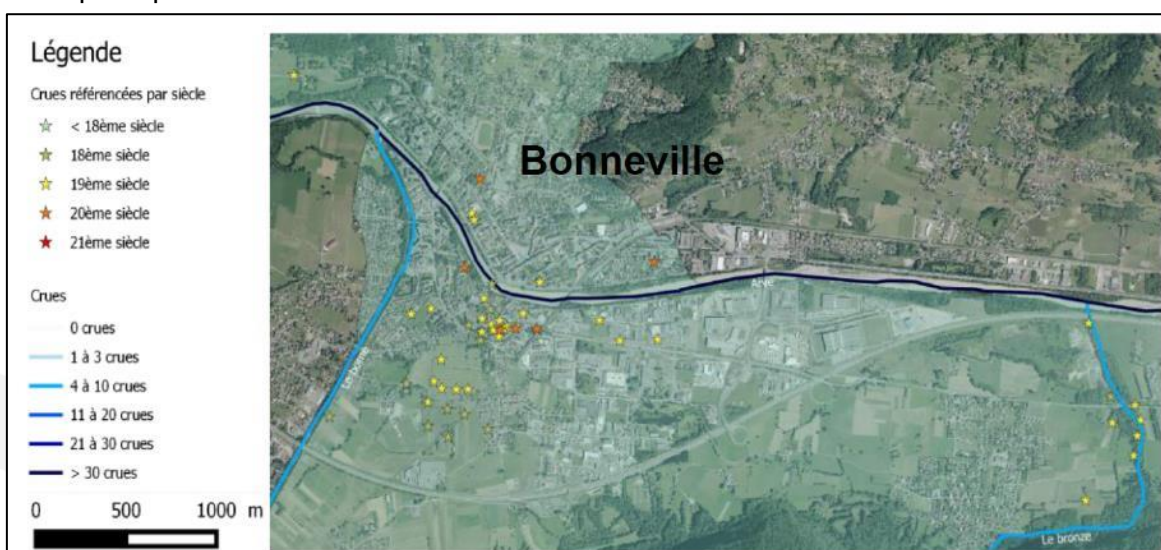


Figure 73 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude - Source S.M.3.A.

6.2.2 Synthèse des observations – typologie des désordres (VTA)

6.2.2.1 VTA du Borne – 2017 et 2020

Le rapport VTA de 2020 sur les digues du Borne est présent en annexes.

Une visite technique approfondie a été réalisée par la CNR en 2017 en vue de la production des études de dangers (EDD de 2019).

Une nouvelle VTA a été réalisée en 2020 par CNR/SAFEGE dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre pour le confortement des digues du Borne.

La VTA est une étape préalable dans l'élaboration des solutions techniques de confortement qui sont proposées en AVP détaillé et qui visent à garantir la sûreté hydraulique de l'ouvrage. Il s'agit d'un diagnostic visuel présentant principalement des observations qualitatives, les aspects techniques et précisions quantitatives sont abordés dans l'AVP détaillé.



Figure 74 : Localisation des endiguements concernés par la VTA de 2020 sur les digues du Borne

Le système d'endiguement le long du Borne apparaît comme un dispositif de protection ayant mal vieilli du fait :

- Du manque d'entretien d'une manière générale dans le temps,
- De l'évolution rapide du lit du Borne, en particulier son incision,

- De la forte pression anthropique qui a dénaturé le système de protection originel (pied aval rogné, ravinements, etc.).

Le développement de la végétation contribue par ailleurs à largement déstructurer les maçonneries sèches existantes (murs, perrés, gabions) qui bordent le cours d'eau, qui plus est lorsque cette dernière tend à mourir/pourrir, créant de nombreux points de faiblesses dans le talus amont des ouvrages.

Une incision prononcée – conséquences

Le développement de l'incision est caractérisé de manière récurrente le long du Borne par la présence d'une marche d'érosion plus ou moins continue le long des berges du Borne.

Elle contribue à saper largement l'assise des berges/digues sur le Borne aval sur l'ensemble du linéaire de digues objet de la présente étude.

Lors des crues, les talus amont, dont les protections amont sont vieillissantes et déstructurées, sont mis à nu à la suite de l'arrachage de la végétation arborée, affaiblie du fait de l'âge ou d'une croissance dans un milieu peu favorable (forte pente...). Les matériaux de berge ainsi mis à nu n'autorisent pas de tels profils d'équilibre compte tenu de leur nature (matériaux pulvérulents sans cohésion : sables, limons, graviers, ...). Il en résulte alors :

- Une érosion externe régressive par ravinement accentuant la pente du talus,
- Dans les cas extrêmes l'apparition de zones d'effondrement / glissement.

La propagation de proche en proche de l'érosion peut conduire au démantèlement quasi systématique des digues sus-jacentes, du fait qu'il n'existe pas de « zone tampon » suffisante (Franc-Bord ou ségonnal) entre la crête de berge et le pied de talus de digue.

Compte tenu des géométries des digues, des aménagements qu'elles ont subies au cours de leur histoire, les fonctions de protection hydrauliques de ces ouvrages ne sont plus totalement assurées sur le linéaire d'étude en période de crue exceptionnelle, et ce principalement en aval du pont de la RD1203 sur la quasi-totalité du linéaire de digues objet de la présente étude, du fait de la relative étroitesse des ouvrages :

- Tronçon Bois Jolivet B,
- Queue du Borne.

Hiérarchisation des désordres

Le tableau ci-après récapitule l'importance des différentes typologies de désordres par tronçon et une appréciation globale de l'état de vulnérabilité des ouvrages à l'échelle d'un tronçon tandis que chaque désordre fait l'objet d'une cotation d'urgence spécifique suivant la classification de France Digue dans le SIRS Digue.

Cette cotation de vulnérabilité est uniquement basée sur une approche visuelle. Le croisement des constats visuels avec les autres données d'entrée (charges hydrauliques réelles des ouvrages, revanches retenues, contraintes foncières, etc.) devrait permettre d'affiner le diagnostic en détaillant les actions à mener sur des sous-tronçons.

On distingue :

- +++ : désordre très important
- ++ : désordre moyen
- + : désordre faible
- - : absence de désordres significatifs

La note de l'état de Vulnérabilité est basée sur une note de 5 :

- 1 : aléa de rupture très faible
- 2 : aléa de rupture faible
- 3 : aléa de rupture moyen
- 4 : aléa de rupture élevé
- 5 : aléa de rupture très élevé

Les résultats de cette analyse sont récapitulés dans le tableau d'analyse ci-après :

		Typologie de désordre					Niveau de vulnérabilité
		Instabilités talus amont	Ouvrages traversants	Végétation	Défaut de continuité de protection hydraulique	Modification géométrie du talus aval	
Borne aval RD	Bois Jolivet B	++	++ (ruine moulin et maison encastrée)	+++	-	++ (mur soutènement, rétrécissements pour ligne électrique)	4
	Queue du Borne (amont)	++	+	+++	-	-	3
	Queue du Borne (aval)	++	+	+++	++ (difficulté à savoir où se finit la digue au niveau de la confluence ; discontinuité entre la protection par des gabions déstructurés et le perré)	-	4
Borne aval RG	Toisings	++	+	+++	-	+	4
	STEP (amont)	++	+	+++	-	-	4
	STEP (aval)	++	+	+++	++ (altimétrie chahutée, points bas)	-	4

Tableau 17 : Hiérarchisation de l'état de fragilité des endiguements du Borne

6.2.2.2 VTA de l'Arve – 2017 et 2021

Le rapport VTA de 2021 sur les digues de l'Arve est présent en annexes.

Une visite technique approfondie a été réalisée par la CNR en 2017 en vue de la production des études de dangers (EDD de 2019).

Une nouvelle VTA a été réalisée en 2020/2021 par CNR/SAFEGE dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre pour le confortement des digues de l'Arve.

La figure ci-après présente les linéaires visités en 2020/2021.

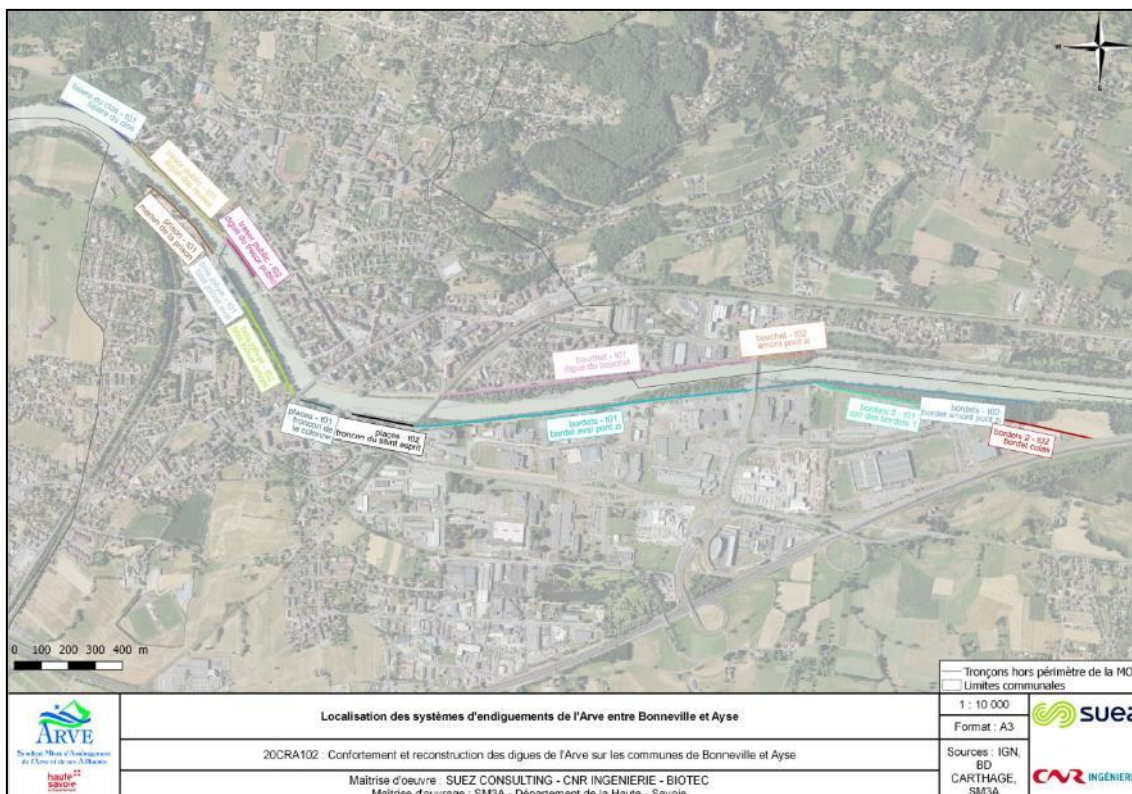


Figure 75 : Localisation des linéaires de digue de l'Arve concernés par la VTA

Les éléments synthèse de VTA en rive gauche de l'Arve appartenant au système ARVE-RG-BONNE-26.24 sont extraits de la VTA de 2021 réalisée par CNR/SAFEGE.

L'objectif de cette VTA est d'établir l'état des digues de l'Arve qui servira de support dans l'élaboration des solutions techniques de confortement qui seront analysées en AVP et visant à garantir la sûreté hydraulique de l'ouvrage. Il s'agit d'un diagnostic visuel présentant principalement des observations qualitatives.

Comme susmentionné, Le diagnostic visuel ou VTA permet d'identifier sur les linéaires de digue auscultés les éventuelles anomalies relevant :

- De défaut de protection du talus amont de l'ouvrage,
- De la présence de dégradation des protections du talus amont, et leur éventuelle évolution,
- De modification à priori du profil de digue originel,
- De la présence d'une géométrie de digue « non conventionnelle » (digue très étroite, talus amont ou aval très raides ...),
- De l'existence d'indices d'instabilité (glissement/effondrement, affouillement en pied de l'ouvrage, tassement, fontis, fissuration ...), et constatations de leur éventuelle évolution,

Le système d'endiguement le long de l'Arve apparaît comme un dispositif de protection ayant mal vieilli du fait :

- Du manque d'entretien d'une manière générale dans le temps,
- De l'évolution rapide du lit de l'Arve, en particulier son incision, qui a conduit à rapidement endommager les ouvrages de protection situés à proximité,

- Des fortes contraintes anthropiques, en lien avec le développement des zones d'activités en bordure immédiate des ouvrages.

Le développement de la végétation contribue à déstructurer les maçonneries sèches existantes (murs, perrés) qui bordent le cours d'eau. De plus, lorsque cette végétation tend à mourir/pourrir elle crée de nombreux points de faiblesses dans le talus amont des ouvrages.

Des talus arborés, partiellement protégés côté rivière, généralement érodés

Du fait du phénomène d'incision du lit de l'Arve, Les talus côté rivière sont très raides, de l'ordre de 1H/1V, voir plus raides en de nombreux points (supérieur 1H/2V, voir sub-verticale), et ce pour des hauteurs de talus élevées (plusieurs mètres, voir jusqu'à 5-10 m depuis le fond du lit), ce qui constitue des configurations limites extrêmes en termes de stabilité.

L'érosion importante, jusqu'en partie haute des talus, indique que :

- L'érosion des berges s'effectue principalement pour les grosses crues, et est amplifiée par :
 - La présence d'une végétation arborée dense et de souches,
 - L'absence de protections hydrauliques continues adéquates sur les talus,
 - Des matériaux facilement érodables (limons sable graviers ...).
- Les petites crues courantes n'impactent pas la géomorphologie de la rivière, sauf sur certains secteurs où la stabilité du talus n'est pas acquise.

On observe d'ailleurs souvent de petites banquettes végétalisées en pied ce qui tend à prouver que le pied de berge se fixe de lui-même en l'absence de grandes crues, mais qui sont potentiellement largement remobilisables.

La plupart des tronçons sont touchés par ce phénomène, à l'exception des secteurs situés en intrados du cours d'eau ou plus régulièrement entretenus dans le centre-ville de Bonneville.

Des potentialités d'évolution importantes

Lors des crues, les talus amont sont mis à nu à la suite de l'arrachage de la végétation arborée, affaiblie du fait de l'âge ou d'une croissance dans un milieu peu favorable (forte pente...). Les matériaux de berge ainsi mis à nu n'autorisent pas de tels profils d'équilibre compte tenu de leur nature (matériaux pulvérulents sans cohésion : sables, limons, graviers...). Il en résulte :

- Une érosion régressive par ravinement accentuant la pente du talus,
- Dans les cas extrêmes l'apparition de zones d'effondrement / glissement (Figure 76).



Figure 76 : Merlon de la maison d'arrêt en rive gauche de l'Arve : érosion en pied / affaissement

La propagation de proche en proche de l'érosion peut conduire au démantèlement des digues, sachant qu'il n'existe pas de « zone tampon » suffisante (Franc-Bord ou ségonnal) entre la crête de berge et le pied de talus de digue.

Compte tenu des géométries des digues, des aménagements qu'elles ont subi au cours de leur histoire, les fonctions de protection hydrauliques de ces ouvrages ne sont plus totalement assurées sur le linéaire en période de crue exceptionnelle.

Les désordres observés sont encore largement évolutifs et attendent les prochaines grandes crues pour être réactivés.

Nous craignons plus particulièrement l'apparition de désordres graves à court terme ou moyen terme sur le secteur en amont du pont SNCF en rive gauche (Bordet T01 / T02 en particulier).

Sur cette rive, le risque d'un effondrement de la berge et de la digue est très élevé. Des sous cavages allant jusqu'à 1,5m de profondeur ont pu être observés.

En outre, l'omniprésence de la végétation arborée et les risques d'érosion interne associés conduisent à augmenter de manière significative la fragilité de ces ouvrages.

Merlon des Bordets - la présence d'un point bas

La jonction Ouest du Merlon des Bordets à l'autoroute A40 présente un point bas allant jusqu'à -70 cm en dessous de la cote de protection du tronçon des Bordets T02. En cas de surverse sur cette zone, l'eau pourrait se propager par le chemin d'accès réservé à la maintenance derrière le merlon. Ce chemin préférentiel viendrait directement inonder la ZAC des Bordets.

Hiérarchisation des désordres

Le tableau ci-après récapitule l'importance des différentes typologies de désordres par tronçon et une appréciation globale de l'état de vulnérabilité des ouvrages à l'échelle d'un tronçon tandis que chaque désordre fait l'objet d'une cotation d'urgence spécifique suivant la classification de France Digue dans le SIRS Digue.

Cette cotation de vulnérabilité est uniquement basée sur une approche visuelle. Le croisement des constats visuels avec les autres données d'entrée (charges hydrauliques réelles des ouvrages, revanches retenues, contraintes foncières,

etc.) devrait permettre d'affiner le diagnostic en détaillant les actions à mener sur des sous-tronçons.

On distingue :

- +++ : désordre très important
- ++ : désordre moyen
- + : désordre faible
- - : absence de désordres significatifs

La note de l'état de Vulnérabilité est basée sur une note de 5 :

- 1 : aléa de rupture très faible
- 2 : aléa de rupture faible
- 3 : aléa de rupture moyen
- 4 : aléa de rupture élevé
- 5 : aléa de rupture très élevé

Les résultats de cette analyse sont récapitulés dans le tableau d'analyse ci-après :

Identification et localisation des endiguements		Typologie des désordres					Niveau de vulnérabilité	
		Instabilités sur talus amont	ouvrages traversants	végétation arborée	Défaut de continuité de protection hydraulique	Modification géométrie talus aval		
ARVE-RG-BONNE-26.24	Arve RG amont confluence	Les Bordets S2 - T01	+	+	+	-	-	1
		Les Bordets S2 - T02	-	+	-	+Point bas à l'extrémité amont	-	1
		Les Bordets T01	+++	+	+++	-	-	4
		Les Bordets T02	+++	+	+++	+Point bas (altimétrie à vérifier)	-	4
		Place T01(tronçon de la colonne)	++	+	+	-	-	2
		Place T02(St Esprit)	++	+	+	-	-	2
		Bois Jolivet A	+	+	++	-	+	3
		Merlon Prison	++	-	++	-	-	2
ARVE-RD-BONNE-25.79		Bouchets T02	+++	+	+++	-	-	4
		Bouchets T01	+++	+	++	-	+	4
		Trésor Public T2	++	+	++	-	+	2
		Trésor Public T1	+++	+	++	-	-	4
		Lisière du clos	+++	+	++	+ (points bas en aval)	-	2

Tableau 18 : Hiérarchisation de l'état de fragilité des endiguements de l'Arve (rive gauche et rive droite)

6.2.3 Autres évènements particuliers survenus sur le site

Sans objet.

6.2.4 Retour d'expérience sur des ouvrages gérés par le SM3A

Source : SM3A.

L'analyse d'accidentologie des événements survenus sur des ouvrages gérés par le S.M.3.A. confirme que les mécanismes et causes de rupture des ouvrages (érosion interne, externe, glissement), identifiés par l'accidentologie internationale, sont effectivement observés dans la vie de ses ouvrages.

D'une manière générale, les retours d'expérience mettent en évidence les points suivants :

- Les brèches font des dégâts importants, surtout matériels, aux voies de circulation et aux habitations ;
- Le coût des réparations des digues est conséquent ;
- Le risque lié à un mauvais confortement d'une brèche est important. Ce risque a été observé sur les digues bonnevilloises, les brèches se produisant majoritairement aux mêmes endroits ;
- Les digues, dans la plupart des cas, ne sont pas résistantes à la surverse ;
- Les digues de montagne sont sujettes au risque d'érosion externe et à l'affouillement du fait des fortes vitesses des cours d'eau ;
- L'évaluation du risque d'érosion interne est complexe et encore difficile à évaluer surtout sur les digues de protection contre les inondations qui ne sont en charge que peu de jours par an.

Un entretien régulier des digues allié à une gestion de la végétation raisonnée et une surveillance en crue limite le risque de rupture de l'ouvrage, ce qui n'était pas le cas sur les digues du SM3A jusqu'à présent.

Plus précisément, sur les digues du SM3A, les brèches observées sont dues à une structure de digue qui n'était pas adéquate (érosion interne, perte de stabilité avant surverse) du fait :

- Soit d'une construction d'ouvrage qui ne répondait pas aux règles de l'art ;
- Soit des réparations réalisées rapidement en temps de crue ou très rapidement après ;
- Soit d'un entretien et une surveillance qui ont fait défaut.

Une meilleure gestion du risque passe donc par :

- Des retours d'expérience entre gestionnaires de digues de protection ;
- L'établissement de diagnostics et une sectorisation des digues dangereuses ;
- La remise en état des ouvrages défaillants suivant un plan de gestion des risques inondation global et raisonné en intégrant la vulnérabilité des sites ;
- L'organisation d'actions d'entretien et de surveillance périodiques et efficaces.

6.2.5 Exemples connus d'incidents et d'accidents survenus sur des ouvrages similaires

Les digues de protection contre les inondations peuvent être un danger réel, à la fois pour les vies humaines et pour les activités économiques. Contrairement aux ruptures de barrage, le phénomène de rupture de digue est moins documenté. Quelques exemples de rupture de digue peuvent cependant illustrer ce danger. Le retour d'expérience porte particulièrement sur les deux exemples suivants :

- La crue de mai 2015 sur l'Isère.
- Rupture de la digue en rive gauche à Domène (crue de 2005 sur le Domeynon) ;

6.2.5.1 La crue de mai 2015 sur l'Isère

Référence : www.isere-drac-romanche.fr et <http://www.irma-grenoble.com>

6.2.5.1.1 Contexte météorologique

L'épisode pluvieux marqué du vendredi 1^{er} mai a provoqué une crue généralisée de l'Isère le lendemain.

Le jeudi 30 avril, le SPC – Service de Prévision des Crues – a diffusé un bulletin annonçant qu'une perturbation océanique très active était attendue en fin de nuit et toute la journée de vendredi sur les Alpes du Nord, en particulier sur le bassin de l'Arly. Elle devait être accompagnée d'un redoux marqué et de précipitations abondantes sur une grande partie du bassin de l'Isère le vendredi, la limite pluie-neige étant située autour de 2 500 m.

L'épisode pluvieux du 1^{er} mai a effectivement été très marqué, provoquant une crue généralisée de l'Isère et un premier pic de crue le samedi 2 mai. Entre samedi fin d'après-midi et le milieu de la journée du dimanche 3 mai, de nouvelles précipitations ont concerné le bassin de l'Arly et le nord de la Tarentaise. Bien que les cumuls aient été inférieurs à ceux du 1^{er} mai, elles ont provoqué un second pic de crue mais avec des niveaux moindres que ceux du 2 mai.

6.2.5.1.2 Déroulement de la crue

Sur l'Isère amont, le débit a commencé à croître à partir de vendredi 1^{er} mai 14 h, le gradient d'environ 55 m³/s et par heure s'amenuisant ensuite, après 1 h du matin. A Pontcharra, le pic de crue a été observé dans la nuit de vendredi à samedi, vers 3 h 30. Avec le décalage habituel de 8 h, il a ensuite atteint Grenoble-Bastille le samedi 2 mai à 11 h 30 du matin.

Le débit mesuré alors à cette station – 966 m³/s – apparaît comme étant supérieur au pic de crue de la crue de mars 2001 mais inférieur aux 980 m³/s de la crue de septembre 1968 qui reste le débit de référence pour une crue d'ordre décennale. Le débit de l'Isère a ensuite décroché jusqu'à 600 m³/s dimanche 3 mai à 12 h 30, puis il est remonté jusqu'à 729 m³/s dans la nuit de dimanche à lundi, avant de décroître durablement.

En aval de Grenoble, le pic de crue a été observé à la station de Saint-Gervais le 2 mai entre 10 h et 10 h 30, avec un débit estimé à 1 354 m³/s. Après un premier fléchissement à 785 m³/s, le niveau s'est à nouveau élevé jusqu'à 961 m³/s lundi 4 mai avant d'amorcer une nouvelle baisse durable. Le débit d'une crue décennale à Saint-Gervais étant de 1 600 m³/s, la crue de début mai 2015 reste donc bien inférieure à ce niveau, ceci grâce au fait que les précipitations ont été bien moindres dans le secteur Drac-Romanche que sur le bassin de l'Isère.

6.2.5.1.3 Dispositions prises par le gestionnaire de digues

Dès le bulletin d'information du SPC du 30 avril, l'AD Isère Drac Romanche a immédiatement déclenché son dispositif alerte-crue. Cela s'est traduit par une notification de mise en alerte de niveau 1 aux entreprises Converso TP et Midali chargées d'effectuer d'éventuels travaux d'urgence en amont de Grenoble, et par l'établissement du planning des équipes de surveillance durant ce long week-end de 3 jours en cas d'atteinte des niveaux d'alerte de l'AD.

Le vendredi 1^{er} mai marqué par de fortes précipitations, la surveillance diurne s'est limitée à effectuer un suivi des niveaux de l'Isère amont et de l'Isère aval sur le site Vigicrues. Les seuils d'alerte de niveau 1 et 2 sur l'Isère amont ayant été atteints respectivement vendredi 1^{er} mai à 23 h 30 et samedi 2 mai à 7 h du matin et l'alerte de niveau 1 sur l'Isère aval samedi 2 mai à 3 h 30 du matin, le personnel a rejoint les locaux dès 8 h du matin. Après notification aux entreprises Carron et Mandier d'une alerte crue et d'éventuels travaux à effectuer en aval de Grenoble, les 3 équipes de 2 personnes ont rejoint leur secteur de surveillance : deux sur l'Isère amont et une sur l'Isère aval.



Figure 77 : Meylan, Ile d'Amour et Isère amont, courbe de Charlet (photos : AD Isère)

Sur l'Isère amont, le directeur de l'AD Isère Drac Romanche est resté en contact permanent toute la journée avec de nombreux interlocuteurs locaux (agriculteurs, communes) et acteurs de la sécurité civile (SIPC, pompiers, gendarmes) afin de limiter la circulation dans certains secteurs comme autour de la Chantourne de Meylan, ou certaines parties de digues. L'inondation ponctuelle par refoulement de l'Isère dans le canal Cheminade et le fossé de l'Essorton a été réglée par une intervention manuelle pour fermer des vannes (Egis et Moulin TP). Sur demande de l'AD et après concertation avec les représentants du SYMBHI, l'entreprise Guintoli a rehaussé de 50 cm le niveau de la crête de la courbe de Charlet afin d'éviter une surverse et tout risque de rupture de la digue associé.

Le dimanche 2 mai, notre surveillance s'est poursuivie sur l'Isère amont malgré l'atténuation du niveau d'alerte. Puis, le lendemain, des visites « post-crue » ont été organisées afin de préciser les désordres que les ouvrages hydrauliques avaient pu subir par endroits. Depuis, nos observations ont fait l'objet de rapports remis aux services de contrôle.

6.2.5.1.4 Analyse et enseignements

Le retour d'expérience du gestionnaire des digues de l'Isère lors de la crue de mai 2015 traduit l'application des consignes de surveillance des ouvrages, basée sur les différents niveaux d'alerte.

La mobilisation importante des personnels et entreprises impliqués dans le suivi, la surveillance et la gestion des ouvrages de protection a permis de limiter les conséquences de la crue : fermeture ponctuelle de vanne pour limiter les entrées d'eau, intervention d'urgence sur les digues pour éviter la surverse... Par ailleurs, une communication efficace avec les communes et la sécurité civile a eu pour effet de limiter l'accès du public à certaines zones potentiellement dangereuses du fait de la montée des eaux.

Après la crue, la surveillance s'est poursuivie, et les visites post-crues ont eu pour objet d'identifier les éventuels désordres apparus sur les ouvrages.

Cet exemple traduit l'importance, lorsque la durée de la crue le permet, de suivre et d'anticiper l'évolution de la montée des eaux pour assurer à la fois la sécurisation des ouvrages de protection et la mise en sécurité des personnes.

6.2.5.2 Crue de 2005 sur le Domeynon

Référence : <http://www.irma-grenoble.com>

Le Domeynon est un torrent de montagne. Il descend des lacs du Grand et du Petit Domeynon pour se jeter dans l'Isère à Domène, milieu très urbanisé où le Domeynon est endigué sur une grande partie de son linéaire.

La crue du 22/08/2005 concerne le secteur des Chenevières et l'ensemble sportif Salvador Allende.

6.2.5.2.1 Observations et déroulé de la crue

La crue de 2005 est une crue torrentielle très violente du Domeynon qui a commencé à grossir vers 17 heures le lundi 22. Le pic de crue a eu lieu dans la nuit du 22 au 23 entre minuit et quatre heures du matin. D'après les habitants, un embâcle s'est formé environ 200 mètres en aval du pont SNCF. Des débordements se sont alors produits en rive droite et en rive gauche jusque vers 3 heures du matin. La digue rive gauche s'est alors rompue et le flot du Domeynon a envahi l'ensemble du lotissement de la Chenevières causant des dégâts très importants mais heureusement sans faire de victime. Dès le matin une pelleteuse travaillait à reconstruire la digue pour ramener le Domeynon dans son lit.

6.2.5.2.2 Désordres et brèches observés

Environ 200 habitants ont dû être évacués. Environ 70 habitations ont été fortement endommagées. Le transport solide par le torrent (cailloux, galets, blocs...) a été très important comme en témoigne les terrains et les premières maisons engravées, immédiatement en aval de la brèche (sur près de 2 mètres de hauteur). Plus bas le débit était plus liquide et les habitations ont été envahies par l'eau jusqu'à 1,5 mètres de hauteur par endroit (voir les différentes laisses de crues sur les photos). Lorsque l'eau s'est évacuée, il restait partout, dans les rues et les maisons environ 30 à 40 cm d'une boue très épaisse et collante.

Il semblerait que la brèche ait été provoquée par surverse à la suite de l'obstruction de l'écoulement du Domeynon par des dépôts solides. Cette accumulation de matériaux a complètement détourné le ruisseau de son lit.



© Photothèque IRMa / Sébastien Gomet

Figure 78 : Rupture de la digue en rive gauche



Figure 79 : Début de renard hydraulique RG en amont de la brèche

6.2.5.2.3 Analyse et enseignements

La crue du Domeynon est liée à un événement météorologique intense et très rapide, quasi impossible à anticiper. Le mécanisme à l'origine de la rupture de la digue est la surverse, qui a été provoquée par une obstruction du lit en aval. Une fois la brèche amorcée, le lit s'est comblé et le torrent s'est dévié de son lit originel vers le lit majeur, emmenant avec lui d'importants volumes de matériaux.

Cependant, les photographies fournies montrent également des amorces de renard hydraulique dans la digue, ce qui aurait tout autant pu déclencher la rupture en l'absence de surverse. Les mécanismes potentiels à l'origine de la rupture peuvent être multiples. Sur ce type de torrent à réaction rapide, la brutalité et la variabilité des épisodes pluvieux, le caractère torrentiel des écoulements et le transport solide potentiel rendent impossible la prédiction des événements et ne permettent pas de mettre en œuvre de façon fiable des mesures d'anticipation ou de suivi de la crue.

Les mesures de réductions des risques passent donc par l'entretien, la surveillance et le suivi des ouvrages de protection, mais aussi de leurs abords : gestion de la végétation pour limiter les embâcles, gestion du transport solide en amont... Le rôle du gestionnaire de digue est dans ce cadre essentiel.

6.3 Scénarios de défaillance probables

Une analyse primaire des événements pouvant être à l'origine d'une défaillance des ouvrages de protection formant le système d'endiguement est réalisée sur la base des informations mentionnées dans les paragraphes précédents.

6.3.1 Analyse accidentologique

L'analyse des crues historiques et le retour d'expérience met en avant les scénarios de défaillance possibles sur l'Arve :

- Déversement dans le lit majeur du fait de conditions supérieures à la capacité du système d'endiguement ;
- Rupture d'une digue mal entretenue dont l'origine de la rupture est inconnue (érosion interne ou externe, érosion par surverse, chocs, glissements d'ensemble).

Afin de compléter l'analyse sur les scénarios de défaillance, il est rappelé les scénarios « classiques » observés sur des digues fluviales en terre. Une analyse de ce qui peut être ou non rencontré sur un système d'endiguement de protections contre les crues est proposée ici.

Les mécanismes de ruptures possibles de la digue sont :

- Rupture par surverse ;
- Rupture par érosion externe (affouillement) ;
- Rupture par érosion interne (renard hydraulique) ;
- Rupture par glissement d'ensemble (défaut de stabilité).

6.3.1.1 Rupture par surverse

L'ouvrage est submergé par le niveau d'eau du cours d'eau. L'eau déborde sur la digue et érode le parement aval. Les matériaux sont arrachés par la force du courant en pied de digue. S'en suit un affouillement important qui peut conduire à la rupture de l'ouvrage.

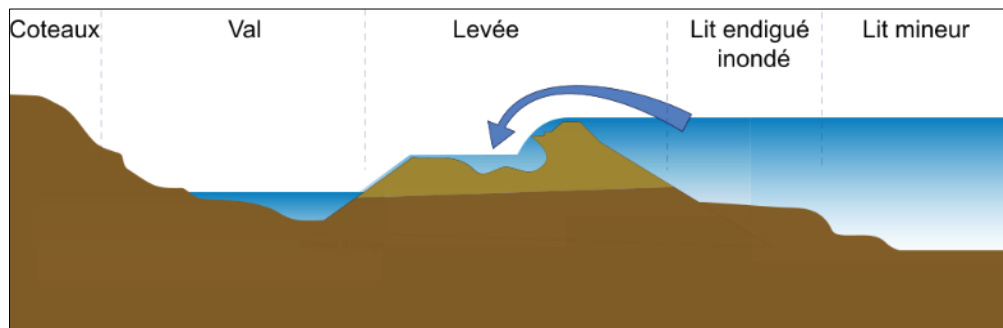


Figure 80 : Schéma de principe d'une rupture par surverse

Les facteurs de sensibilité d'une rupture par surverse sont les suivants :

- Hauteur d'eau / charge ;
- Les vitesses locales : les érosions augmentent avec la vitesse du courant ;
- Caractéristiques géotechniques : la nature des matériaux constitutifs de la digue, leurs homogénéité, compacité, etc. conditionne la rupture et sa rapidité ;
- Protection de la digue au niveau du parement extérieur de la digue ;
- Surélévation du fond du lit augmentant les chances de surverse.

6.3.1.2 Rupture par érosion externe (affouillement)

L'ouvrage est déstabilisé par l'érosion externe par affouillement de sa base (imputable au courant de la rivière) avec affaiblissement des caractéristiques mécaniques du corps de la digue pouvant conduire à la rupture de l'ouvrage.

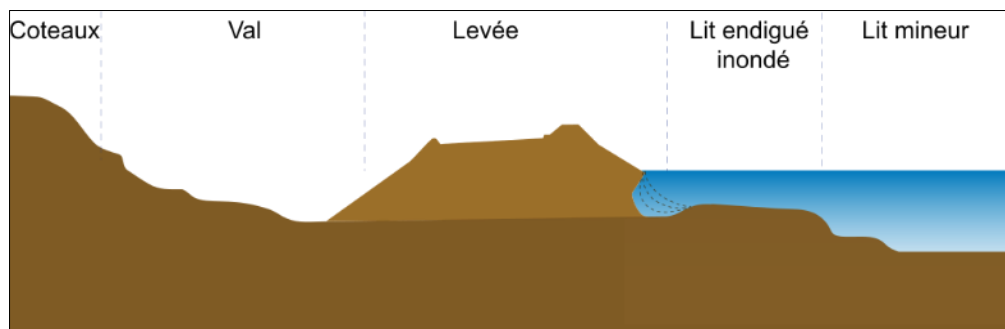


Figure 81 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe

Les facteurs de sensibilité d'une rupture par érosion externe sont les suivants :

- Hauteur d'eau / charge ;
- L'hydromorphologie : au cours de la crue, le fond du cours d'eau peut notamment s'abaisser (incision) et mettre à nu le pied des protections de berge ;
- Les vitesses locales : les érosions augmentent avec la vitesse du courant ;
- Les perturbations hydrauliques locales : la présence de souches, arbres, élargissement brusque, etc. peuvent entraîner des tourbillons favorisant les érosions ;
- Caractéristiques géotechniques : la nature des matériaux constitutifs de la digue, leurs homogénéité, compacité, etc. conditionne la rupture et sa rapidité ;
- Protections de la digue : la présence de protections de berges (type gabions, enrochements, génie végétal) protège contre les érosions.

6.3.1.3 Rupture par érosion interne

Les hétérogénéités de perméabilité dans le corps de la levée peuvent être à l'origine de circulation d'eau. Selon la nature des matériaux et la charge hydraulique, on peut atteindre le gradient hydraulique critique qui provoque localement l'érosion interne. De part en part, cette érosion peut se propager jusqu'à former une vraie galerie qui provoque une brèche dans la levée par effondrement des matériaux.

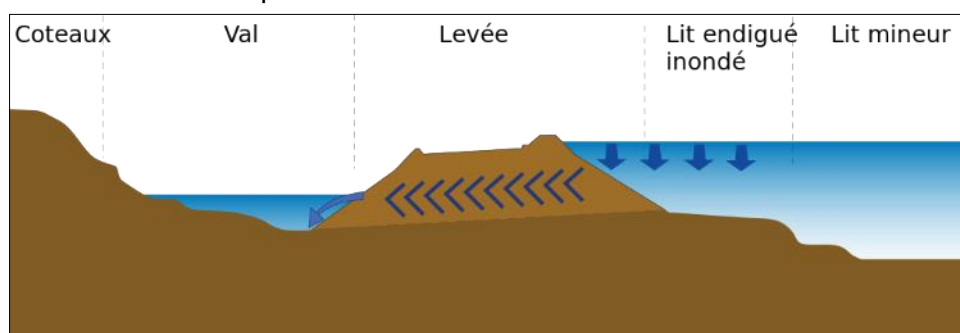


Figure 82 : Schéma de principe d'une rupture par effet de renard hydraulique

Les facteurs de sensibilité d'une rupture par érosion interne sont les suivants :

- La présence de galeries, comme celles que peuvent faire certains animaux comme les ragondins ou les castors ;
- Une mauvaise étanchéité entre couches de remblais ;
- Une hétérogénéité des matériaux ;
- Les racines d'arbres abattus qui, en pourrissant, laissent pénétrer l'eau sous les digues ;

La gestion de la végétation de la digue est très importante afin d'éviter la migration de particules vers l'aval à partir des passages préférentiels formés par les racines des arbres.

La présence de quelques canalisations traversantes constitue également des points de fragilité dans la digue constituée de remblais. Bien que la majorité des canalisations identifiées lors des VTA sont situées sous la digue, il convient de les surveiller pour déterminer si l'intégrité de cette dernière n'est pas menacée. En effet, ces ouvrages, comme les racines des arbres morts, constituent des passages préférentiels de l'eau en période de crue. Lorsque le réseau n'est pas sécurisé, l'eau qui circule le long de l'ouvrage traversant en période de crue, peut entraîner petit à petit les matériaux de la digue et initier une érosion interne. Cette érosion peut aboutir à la brèche et causer des dommages conséquents.

6.3.1.4 Défaut de stabilité de la digue et de sa fondation

Une rupture de masse de la levée peut intervenir en cas d'instabilité générale du corps de remblai. On pense qu'une rupture de masse peut intervenir quand les facteurs suivants sont réunis :

- Profil de digue étroit avec pente de talus fortes ;
- Piézométrie élevée dans la digue en absence de drainage.

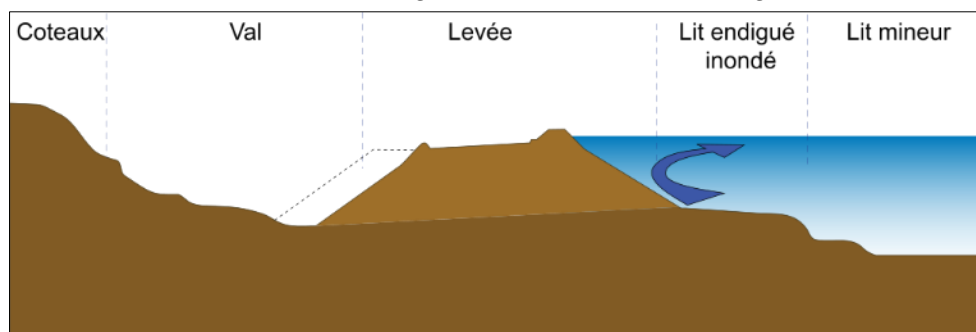


Figure 83 : Schéma de principe de rupture d'ensemble

6.3.1.5 Surverse sans rupture

Dans le cas d'une surverse sans rupture, la capacité du lit est dépassée, la crête de la digue est submergée et la zone protégée est progressivement inondée.

Les facteurs de sensibilité dans le cas d'une surverse sans rupture sont les suivants :

- Hauteur d'eau / charge : plus le niveau d'eau est élevé, plus le débit déversé est important,
- Surélévation du fond du lit du cours d'eau par transport solide ponctuel lors d'une crue ou par dépôt progressif et exhaussement.

6.3.1.6 Dysfonctionnement d'un ouvrage hydraulique

Notre système d'endiguement est composé de digues et de protections de berges.

Les ouvrages traversants sont décrits dans le chapitre 5.1.3. Des défaillances fonctionnelles des organes hydrauliques sont étudiées dans le cadre de cette étude de dangers.

6.3.1.7 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. Par conséquent, l'objectif est de vérifier la tenue des ouvrages neufs ou refaits vis-à-vis du séisme.

La méthode d'analyse au séisme est décrite dans le diagnostic approfondi au chapitre 7.

6.3.2 Synthèse sur les scénarios de défaillance probables

L'analyse réalisée précédemment permet d'aboutir aux éventuels scénarios de défaillance suivants :

- **Défaillance fonctionnelle :** Remontée de l'Arve dans le réseau Bois Jolivet et inondation de la ZP (voir §5).
- **Défaillance structurelle :**
 - Erosion externe en pied de berge entraînant une déstabilisation
 - Glissement du parement de la protection ;
 - Erosion interne (renard entraînant la formation d'une brèche) ;
 - Submersion de la digue lors d'un événement supérieur au niveau de protection ;
 - Surverse à la suite du dépassement du niveau de protection.

Ce paragraphe a permis de détailler l'ensemble des potentiels de dangers, et de situations dangereuses associées, pouvant impacter le système d'endiguement.

1. Les situations dangereuses (qui peuvent conduire ou qui conduisent à la perte d'une fonction principale). Les situations suivantes, représentatives des événements susceptibles d'impacter les ouvrages, sont à rechercher en priorité :

- Un affouillement du talus amont de l'endiguement,
- Une érosion interne,
- Une érosion externe du talus amont de l'endiguement,
- Une niche de glissement du talus amont.

2. Les causes potentielles (défaillance conduisant à la situation dangereuse). Les causes suivantes, représentatives des situations dangereuses peuvent être liées à :

- **Causes internes à l'ouvrage :**
 - Une couche de sol du corps de digue suffusive ;
 - Un parement amont de l'ouvrage non protégé (absence de couche filtre/géotextile sous les enrochements) ;
- **Causes externes à l'ouvrage :**
 - Une crue exceptionnelle ;
 - Une décrue rapide ;
 - Une végétation dense ;
 - La présence potentielle d'animaux fouisseurs ;
 - La défaillance d'un ouvrage transversal dans le lit mineur.

3. Les conséquences ou accidents potentiels.

Les situations dangereuses peuvent conduire aux évènements redoutés centraux suivant :

- La rupture de l'endiguement par brèche ;
- La rupture de l'endiguement par surverse pour des crues supérieure à la crête des endiguements.

Le tableau suivant résume les principaux potentiels de rupture ainsi que les modes de rupture associés.

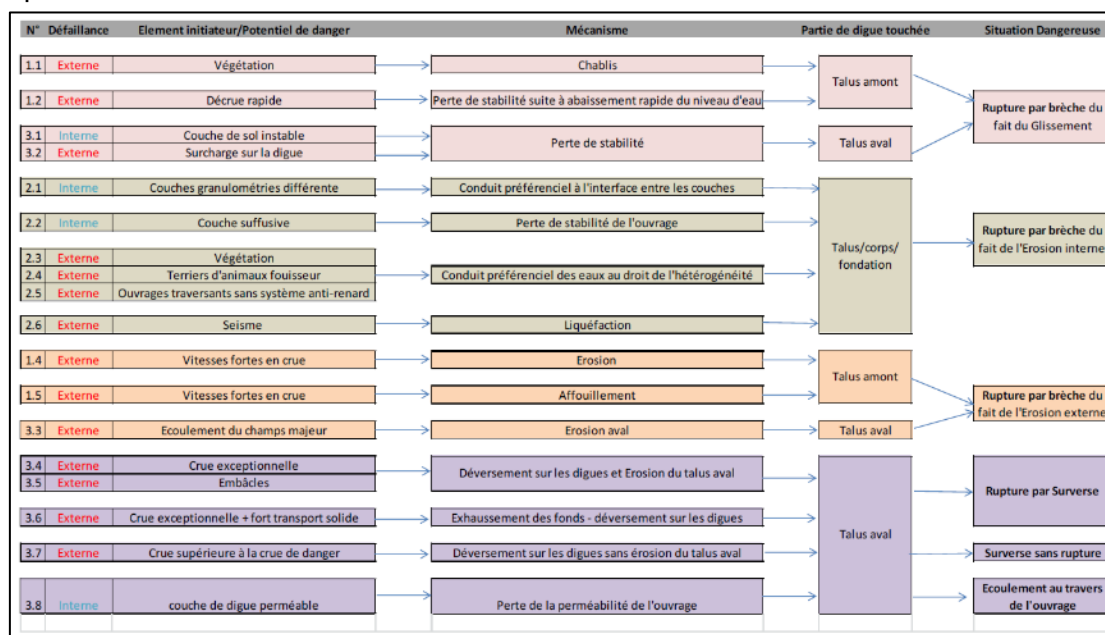


Tableau 19 : Identification des Situations dangereuses et Potentiels de danger pouvant intervenir sur une digue de protection contre les inondations (source : CNR, 2019)

7. DIAGNOSTIC APPROFONDI DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET TENUE DES OUVRAGES

Ce chapitre établit le diagnostic approfondi des digues et autres ouvrages associés composant le système d'endiguement. Il s'appuie sur les éléments exposés dans le chapitre 6. Il détaille l'ensemble des connaissances disponibles sur chacun des éléments qui composent ce système, en présentant le contenu et les résultats des reconnaissances spécifiques et approfondies. Il tient notamment compte de la présence d'ouvrages traversant et d'éventuelles singularités.

La justification de la résistance mécanique des ouvrages au moins jusqu'au niveau de protection s'appuie sur :

- Les résultats d'un diagnostic approfondi effectué par un organisme agréé ;
- L'ensemble de la documentation afférente aux ouvrages, en particulier le dossier technique constitué en application de l'article R. 214-122, les rapports de surveillance passés et la précédente étude de dangers ;
- L'analyse des moyens mis en œuvre pour assurer l'entretien, la surveillance et les réparations courantes des ouvrages.

7.1 Diagnostic approfondi sur les digues rive droite du Borne

Le diagnostic des digues rive droite du Borne a été décrit dans l'étude de dangers Arve-RG-Bonne-26.24 déposée dans le cadre du dossier réglementaire « Borne ».

Ce diagnostic approfondi du projet de confortement justifie les niveaux de protection et de danger prévus à l'AVP. Il y est en effet établi les conclusions suivantes :

- **Le niveau de protection assuré par la digue en rive droite du Borne à l'état projet est égal à une crue de temps de retour 100 ans.**
- **La durée de la crue ne variant que peu entre un temps de retour 100 ans et 300 ans, il est justifié de considérer que le niveau de danger correspond à la cote maximale atteinte lors de la crue de temps de retour 300 ans.**

On retrouve dans cette étude de dangers le détail de la justification des niveaux de protection et de dangers de la digue en RD du Borne.

7.1.1 Niveau de protection

Tableau 20 - Estimation du niveau de protection de chacun des tronçons (Source : EDD ARVE-RG-BONNE-26.24-ARVE-RIVE-GAUCHE-ET-BORNE-RIVE-DROITE)

Tronçon	Rupture par surverse	Rupture par glissement de talus	Rupture par instabilité du muret	Rupture par érosion de conduit	Rupture par érosion régressive	Rupture par érosion externe
T1	Z _{Q100} +1m	-	Z _{Q100}	>Z _{Q100}	-	>Z _{Q100}
T2	Z _{Q100} +1m	-	Z _{Q100}	>Z _{Q100}	-	>Z _{Q100}
T3	Z _{Q100} +1m	>Z _{Q100}	-	>Z _{Q100}	-	>Z _{Q100}
T4	Z _{Q100} +1m	>Z _{Q100}	-	>Z _{Q100}	-	>Z _{Q100}
T5	Z _{Q100} +1m	-	-	>Z _{Q100}	-	>Z _{Q100}
T6	Z _{Q100} +1m	>Z _{Q100}	-	-	-	-
T7	Z _{Q100} +1m	>Z _{Q100}	-	-	-	-

Le niveau de protection assuré par les digues en rive droite du Borne à l'état projet est égal à une crue de temps de retour 100 ans.

7.1.2 Niveau de danger

Tableau 21 - Estimation du niveau de danger de chacun des tronçons (Source : EDD ARVE-RG-BONNE-26.24-ARVE-RIVE-GAUCHE-ET-BORNE-RIVE-DROITE)

Tronçon	Rupture par surverse	Rupture par glissement de talus	Rupture par instabilité du muret	Rupture par érosion de conduit	Rupture par érosion régressive	Rupture par érosion externe
T1	>Z _{Q300}	-	Z _{Q300}	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}
T2	>Z _{Q300}	-	Z _{Q300}	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}
T3	>Z _{Q300}	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}
T4	>Z _{Q300}	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}
T5	>Z _{Q300}	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}	-	Z _{Q300}
T6	>Z _{Q300}	Z _{Q300}	-	-	-	-
T7	>Z _{Q300}	Z _{Q300}	-	-	-	-

Le niveau de danger fixé pour les digues en rive droite du Borne à l'état projet est une crue de temps de retour 300 ans.

Les scénarios (fonctionnement nominal et défaillances structurales) sont donnés dans l'étude de dangers déposée dans le cadre du dossier réglementaire « Borne ».

7.2 Diagnostic et reconnaissances sur les digues de l'Arve (EDD CNR de 2019)

7.2.1 Reconnaissances géophysiques

7.2.1.1 Localisation des reconnaissances

Plusieurs investigations géophysiques ont été réalisées par les entreprises SAGE (2010), SAFEGE (2011) et plus récemment IMG (2017). On retrouve sur la Figure 84 la localisation des reconnaissances géophysiques réalisées sur l'ensemble des digues gérées par le SM3A dans le secteur d'étude :

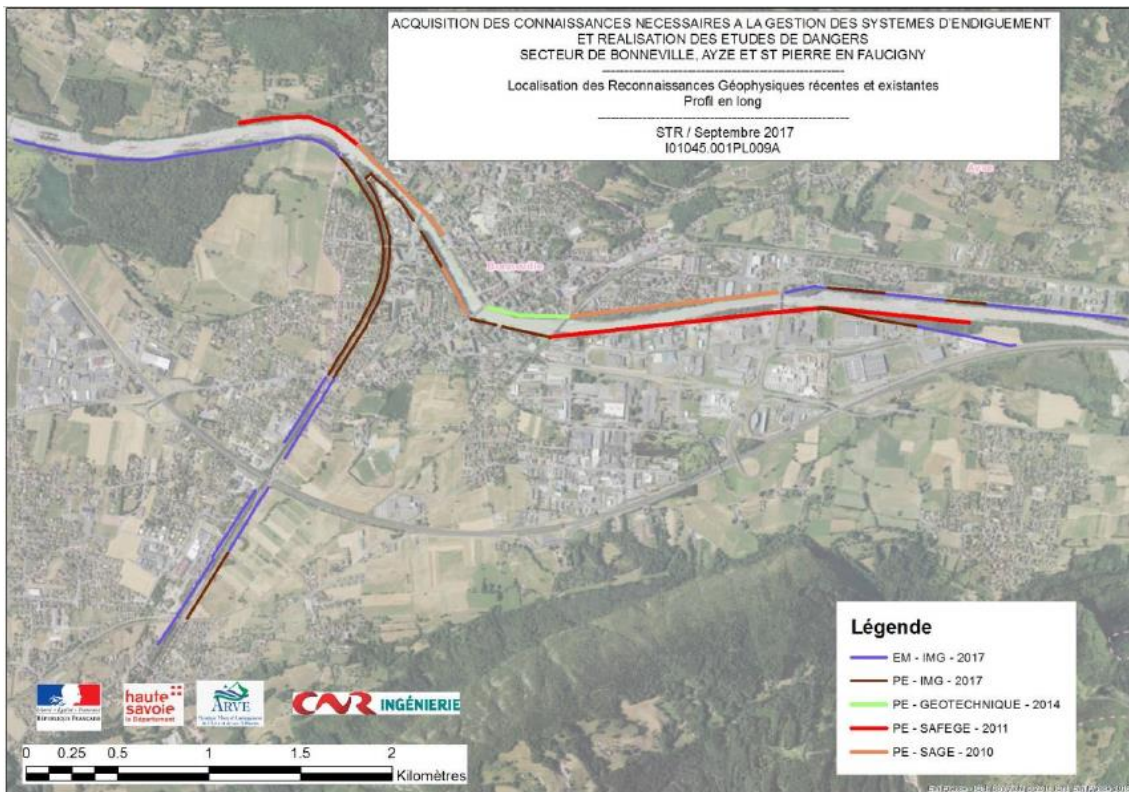
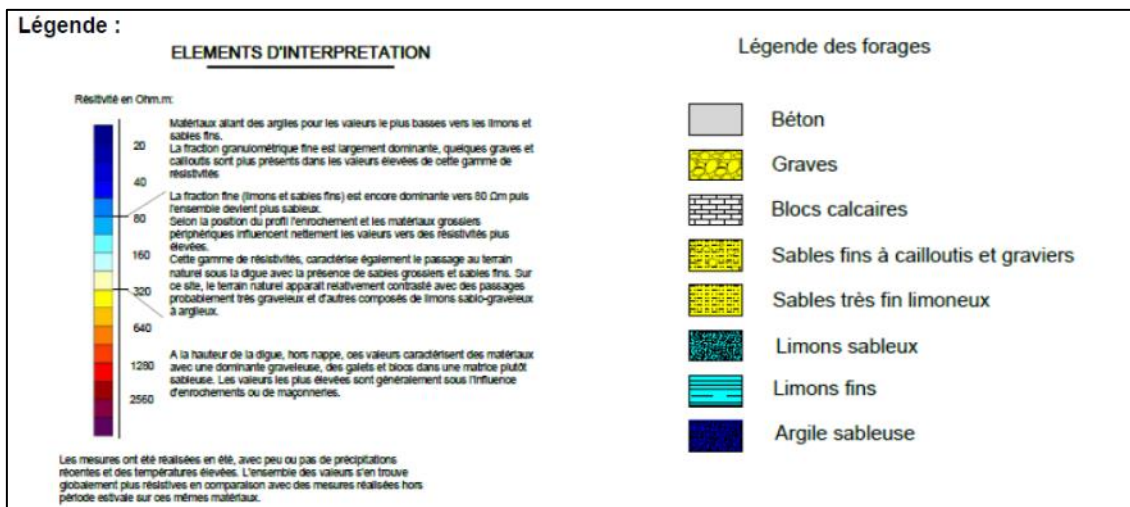


Figure 84 - Localisation des campagnes de reconnaissances géophysiques

7.2.1.2 Reconnaissances géophysiques en rive gauche de l'Arve

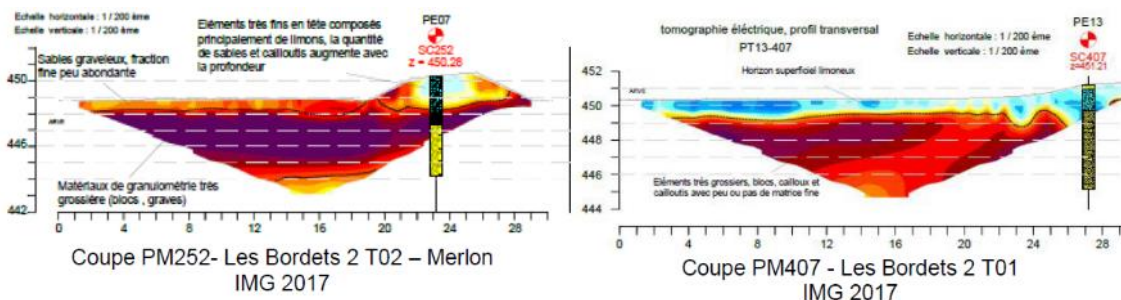
Les figures suivantes sont légendées comme suit :



7.2.1.2.1 Les Bordets 2 T01 et T02

Composition : Digue homogène sur le linéaire. Corps sablo-limoneux et fondation sablo-graveleuse.

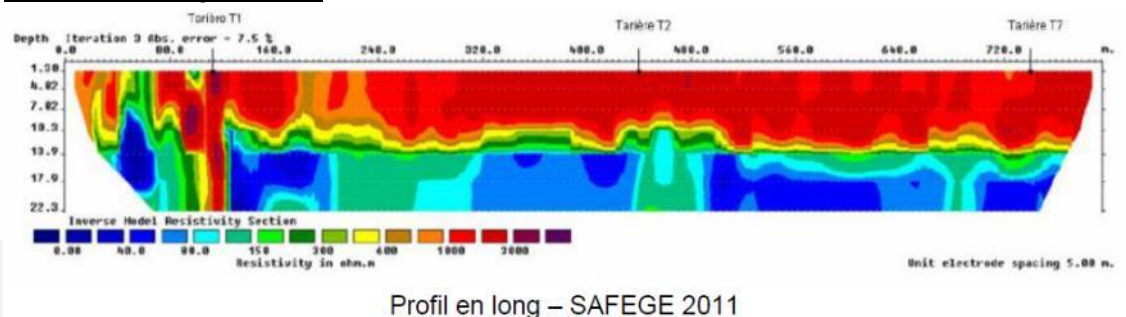
Réseaux – singularité : pas de réseaux repérés par les méthodes.



7.2.1.2.2 Les Bordets T02

Composition : sable fin sur les 3 premiers mètres puis corps grossier sablo-graveleux jusqu'à 11m ;

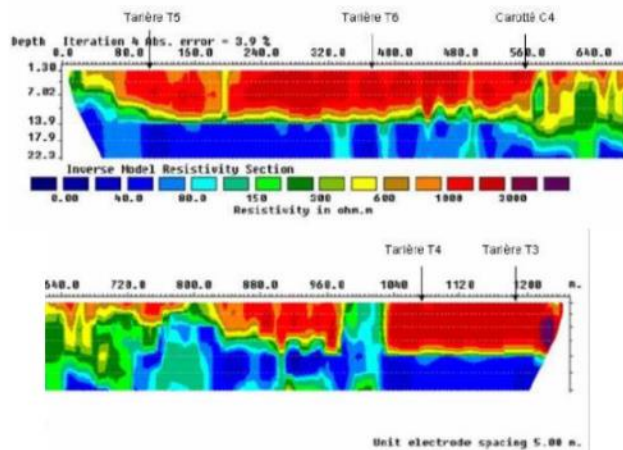
Réseaux – Singularités : Artefacts entre PM 560 et PM 1000.



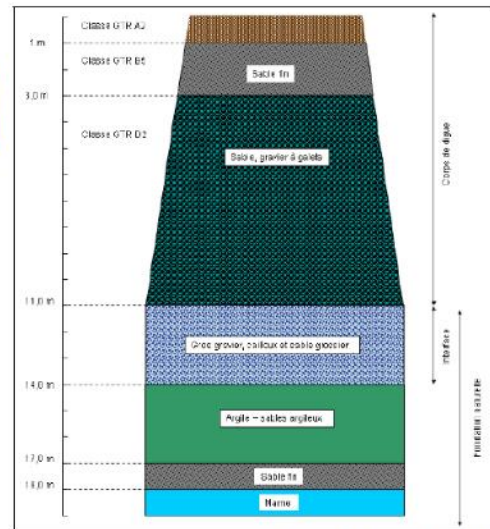
7.2.1.2.3 Les Bordets T01

Composition : Sable fin sur les 3 premiers mètres puis corps grossiers sablo-graveleux jusqu'à 11m ;

Réseaux – Singularités : Artefacts entre PM 560 et PM 1000.



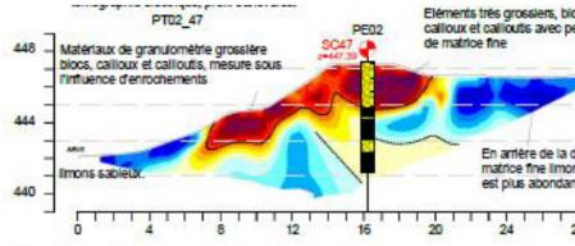
Profil en long – PE SAFEGE 2011



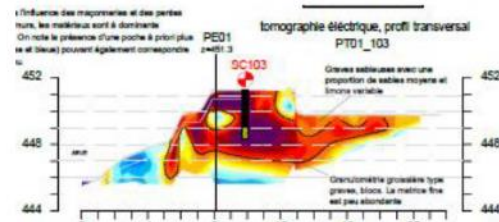
7.2.1.2.4 Les Places

Composition : Corps grossier et fondation plus fine. Parements en enrochements ou perré ;

Réseaux – Singularités : Passages plus fin en surface en début de T01.



Coupe PM47 - Les places T02 Pont Saint Esprit
IMG 2017

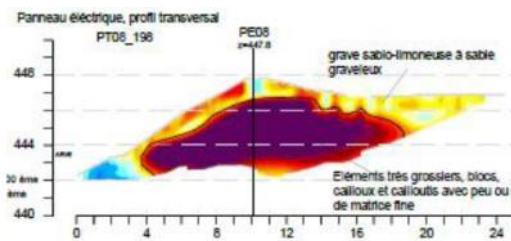


Coupe PM103 - Les places T01
IMG 2017

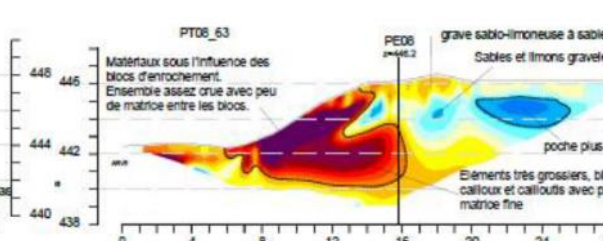
7.2.1.2.5 Bois Jolivet A

Composition : Premier mètre assez fin et fondation plus grossière voire très grossière. Parements en enrochements pas toujours très marqué ;

Réseaux – Singularités : Passages plus fin en corps de digue sur les profils les 70 m les plus en aval.



Coupe PM196 - Profil type de la digue
IMG 2017

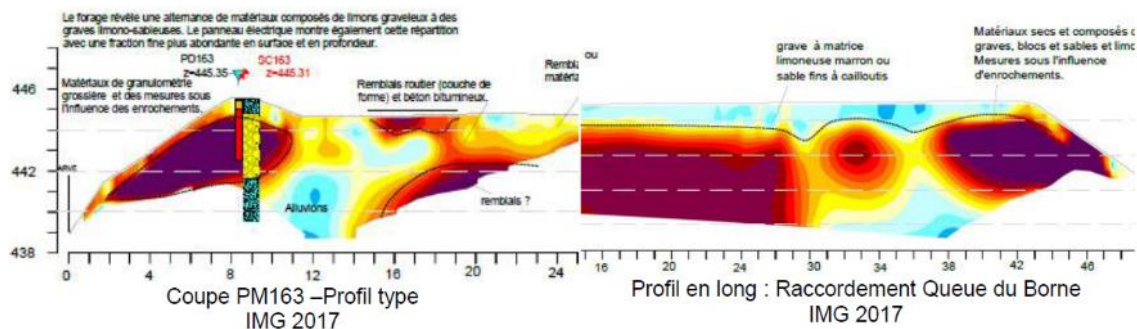


Coupe PM63 - 70 m les plus à l'aval Corps plus fin
IMG 2017

7.2.1.2.6 Merlon Prison

Composition : Corps de digue fin et fondation plus grossière voire très grossière. Parements en enrochements ;

Réseaux – Singularités : Raccordement à la queue du Borne corps fin sur matériaux grossiers.



7.2.2 Evaluation de la stabilité des digues existantes (Arve rive gauche)

7.2.2.1 Rappel du diagnostic de 2018 par CNR

Un diagnostic de stabilité complet a été réalisé en 2018 sur les digues du linéaire d'étude à partir des mêmes informations géologiques et géotechniques que celles présentées dans ce rapport.

Le tableau suivant reprend, à la maille des tronçons globaux, les conclusions apportées par le diagnostic de 2018 en considérant les nouvelles hypothèses hydrauliques tandis que les réflexions complètes (hypotheses, application des principes, etc.) restants semblables à celles du diagnostic, elles sont disponibles dans les rapports de diagnostic.

Tableau 22 : Synthèse extraite de l'EDD de 2019 avec Arve en état actuel (CNR)

	Cours d'eau	Charge	B/H	Surverse	Erosion interne	Erosion Externe Affouillement	Glissement	Risque
BORDETS - T02	Arve RG	Entre Q10 et Q100	6.6	Q1000 / PK29.2	Instable	Oui	Talus rivière Instable	3
BORDETS - T01		Q10	4.0	Q1000 PK27.7 voire PK28.6	Instable	Oui	Talus rivière Instable	4
LES BORDETS 2 - T01 et T02		Q10	11.88	Q1000 PK29.2	Instable	Non	Non testé car rapport B/H fort	1
PLACES T01 - T02		Q100	4.0	Q1000 PK27.5	Instable	Non mais perré voire mur	Talus rivière Instable	3
BOIS JOLIVET A		Entre Q10 et Q100	4.3	Q1000 PK26.9 à PK26.7	Instable	Oui partie aval	Talus rivière Instable	3
Merlon PRISON		Q1000	0.9	>Q1000	Instable	Non (1 profil très raide, les	Non Testé car en charge à Q1000	2

Le tableau résume les principales conclusions selon les caractéristiques et les risques propres à chaque secteur : Charge sur les digues, Dimensions des ouvrages, Erosion interne, Erosion externe, Surverse et Glissement.

Ce tableau présente aussi un niveau de risque associé à chaque digue. Ce niveau est hiérarchisé de 1 à 5.

- Le niveau 1 correspond aux digues non en charge et ne présentant pas de risque d'érosion externe ;

- Le niveau 2 correspond aux digues très faiblement en charge ou non en charge présentant des dysfonctionnements locaux comme des érosions externes ou des débordements hors endiguement ;
- Le niveau 3 correspond à des digues en charge généralement entre Q10 et Q100, présentant des risques d'instabilité soit par glissement soit par érosion interne et/ou externe et des rapports B/H modérés à faibles ;
- Le niveau 4 correspond à des digues en charge pour des crues Q10 présentant des risques d'instabilité sur au moins 3 à 4 des phénomènes testés et des rapports B/H très faibles ;
- Le niveau 5 correspond à des digues en charge pour des crues inférieures à Q10 présentant des risques d'instabilité sur au moins 3 à 4 des phénomènes testés et des rapports B/H très faibles.

Ce diagnostic réalisé par CNR en 2018/2019 a permis de montrer que l'état actuel des digues en rive gauche de l'Arve ne permettait pas de justifier un niveau de protection au-dessus de la cote du TN aval. Cette justification a été faite pour une crue de temps de retour 10 ans (occurrence de crue des premières mises en charge des digues de l'Arve). Le niveau de dangers correspond au niveau d'aléa à partir duquel la probabilité de rupture des ouvrages n'est plus considérée comme négligeable par le maître d'ouvrage (borné à 50 % par la réglementation). Pour l'endiguement en rive gauche de l'Arve (avant travaux), il correspond à la crue de période de retour centennale de l'Arve.

7.2.2.2 Etude de sensibilité de 2020

Une étude de sensibilité sur les paramètres géomécaniques des sols rencontrés sur les digues du Borne a été réalisée en 2020 de manière à quantifier l'impact de ces coefficients sur les résultats de stabilité au glissement. Celle-ci concluait sur le fait que les deux approches montraient que les paramètres géomécaniques exercent une influence relative qui ne permet pas de modifier les conclusions. En effet, la conclusion sur la stabilité des profils reste identique dans plus de 98% des calculs. En l'absence de données nouvelles depuis les reconnaissances géotechniques de 2017, la poursuite de l'étude et notamment le dimensionnement des ouvrages de confortement est réalisé en utilisant les paramètres géomécaniques retenus pour l'établissement du diagnostic de 2018.

7.3 Mission G2 – Avant-Projet de confortement des digues de l'Arve rive gauche

Ci-dessous est présenté le prédimensionnement du confortement des digues de l'Arve au stade G2AVP.

La G2PRO, pour chaque phase de travaux (cf. §5.2), sera fourni au service instructeur de la DREAL pour confirmer/valider le dimensionnement des ouvrages.

7.3.1 Reconnaissances géotechniques de 2021

7.3.1.1 Localisation des sondages réalisés

On retrouve la localisation des sondages réalisés en annexe de l'étude de G2-AVP de 2022.

7.3.1.2 Sondages et essais in-situ

Le programme des reconnaissances menées en 2020-2021 contient les essais in-situ listés ci-dessous et dont la position et la profondeur sont listés dans le Tableau 23.

Tableau 23 - Liste des Essais in-situ réalisés en Arve Rive gauche - campagne de reconnaissance 2021

Secteur / type de sondage	Profondeur	Z du TN	Essai d'infiltration/perméabilité (k)
Secteur Merlon de prison			
Sondage à la pelle mécanique			
PEL26.240ARG	3.30	445.46	
Sondage pressiométrique			
PM26.500ARG	10.00	445.70	2 NASBERG
Secteur Bois Jolivet			
Sondage à la pelle mécanique			
PEL26.830ARG	4.10	450.03	1 MATSUO
Sondages pressiométriques			
PM26.740ARG	12.00	445.29	
PM26.970ARG	12.00	449.91	
PM27.150ARG	12.10	443.18	
Sondages carottés			
SC26.740ARG	9.90	445.29	2 LEFRANC ou NASBERG
Secteur Place St Esprit			
Sondage pressiométrique			
PM27.470ARG	8.90	447.35	
Secteur Les Bordets			
Sondages à la pelle mécanique			
PEL27.590ARG	4.60	447.48	1 MATSUO
PEL27.970ARG	2.70	446.02	
PEL28.330ARG	3.00	447.89	
PEL28.540ARG	3.80	450.37	
PEL28.640ARG	1.80	447.29	
PEL28.750ARG	1.80	450.37	
PEL28.920ARG	2.40	447.29	
PEL29.270ARG	3.50	450.03	
PEL29.280ARG	1.70	446.56	
PEL29.400ARG	3.50	450.18	
PEL29.600ARG	3.60	450.18	
Sondages carottés			
SC27.980ARG	6.28	451.46	1 NASBERG
SC28.540ARG	10.08	450.37	2 NASBERG
SC28.960ARG	11.16	449.78	2 LEFRANC ou NASBERG
Sondages pressiométriques			
PM27.850ARG	10.06	448.99	
PM28.340ARG	6.04	449.96	
PM28.840ARG	12.05	449.84	
Sondages destructifs			
SD29.350ARG	6.06	449.98	2 LEFRANC ou NASBERG
SD29.900ARG	6.04	450.76	2 NASBERG

7.3.1.3 Synthèse des reconnaissances – profil géotechnique

Essais pressiométriques :

Les essais pressiométriques ont permis d'établir les caractéristiques des matériaux composant les différents tronçons homogènes étudiés. Ainsi on retrouve les caractéristiques établies dans le Tableau 24.

Tableau 24 - Résultats des essais pressiométriques

Tronçon	Sondage (s)	Z tête sondage	Profondeur	Lithologie	Limite Inf.	Épaisseur	EM	PI	EM/PI
Rive gauche									
T18	PM26500	445.7	10.1	Remblai gravelo-limoneux à gros bloc	440.7	5	20	2	10
				Sable graveleux à galets	435.6	5.1	30	3	10
T16	PM26740	445.3	12	Sable fin légèrement limoneux à gravier	441.8	3.5	20	2.2	10
				grave sablo limoneuse	436.4	5.4	10	1	10
				Silt noir	433.3	10.4	15	09-2.5	≈10
T13	PM26970	449.9	12	Remblai gravelo-sableux à blocs	445.7	4.2	4	0.5	≈10
				Sable et gravier gris	437.9	7.8	40	4	≈10
T11	PM27150	443.2	12.1	Remblai gravelo-sableux à blocs	438	5.2	8	0.6	14
				Sable et gravier gris	431.1	6.9	120	>5	<25
T08	PM27470	447.3	8.9	Sable fin	442.1	5.2	3.5	0.35	10
				Sable graveleux à blocs	438.4	3.7	40	4	≈10
T05	PM27850	449	10.1	Sable fin graveleux marron	445.4	3.6	6	0.6	≈10
				Sable limoneux graveleux	438.9	6.5	20	2	10
T05	PM28340	450	6	Sable graveleux marron à blocs	445.1	4.9	6	0.6	≈10
				Sable graveleux marron compact à blocs	444	1.1	20	2	10

Essais de perméabilités :

Les résultats des essais de perméabilités réalisés in situ sont décrits dans le Tableau 25

Tableau 25 - Résultats des essais de perméabilité in-situ

Sondage	Profondeur	Lithologie	k (m/s)
PM26.500 ARG	2-3	Sable graveleux	2.00E-05
PM26.500 ARG	4-5	Sable graveleux	4.00E-06
SC26.740 ARG	2-3	Sable fin limoneux	3.00E-07
SC26.740 ARG	6-7	Grave sableuse	5.00E-06
SC27.980 ARG	3-4	Grave sableuse	4.00E-05
SC28.540 ARG	3-4	Limon sableux	6.00E-07
SC28.540 ARG	5-6	Limon silteux-sableux	2.00E-07
SC28.960 ARG	3-4	Sable limoneux	2.00E-07
SC28.960 ARG	6-7	Sable graveleux	2.00E-05
SD29.530 ARG	2-3	Sable graveleux	1.00E-05
SD29.530 ARG	5-6	Sable graveleux	8.00E-06
SD29.900 ARG	3-4	Sable graveleux	7.00E-07
SD29.900 ARG	5-6	Sable graveleux	1.00E-06
PEL 26.250 ARD	1.27-1.50	Sable fin silteux	6.00E-06
PEL 26.830 ARG	1.29-1.45	Limons à quelques galets	2.00E-05
PEL 27.590 ARG	1.3-1.45	Sable limoneux	1.00E-05

Essais de laboratoire :

La synthèse des essais de laboratoire sur les échantillons issus des sondages carottés et des sondages à la pelle mécanique sont synthétisés **en annexe 2.5** (pour une meilleure lisibilité).

Essais de cisaillement à la boîte :

Les essais de cisaillement à la boîte ont permis d'établir les cohésions et angles de frottement effectives des matériaux des sondages réalisés.

Tableau 26 - Caractéristiques mécaniques obtenues sur les sols testés sur les boîtes de cisaillement

Tronçon	Sondage	Prof	Nature	Essais	c'_p	c'_r	φ'_p	φ'_r
RG-T16/T17	SC26.740 ARG	1.5	Sable fin limoneux brun à cailloux, cailloutis et blocs	P	8	8	33.5	33.5
RG-T5	SC27.980 ARG	0.6	Limon sablo-argileux marron brun à cailloutis et rares cailloux	P	5	4	36.1	36.4
RG-T3	SC28.960 ARG	2.6	Sable limoneux gris clair à cailloutis cailloux	P	0	0	37.3	37.3
RG-T15	Pel26.830	<4.10	Limon (écrêté par tamisage à 3.15mm)	P/ G	2	1	33.2	32.6
RG-T5	Pel28.330	<3.00	Limon (écrêté par tamisage à 3.15mm)	P/ G	8	5	32.7	32.2
RG-T4	Pel28.540	<3.80	Grave roulée sableuse (0/50mm)	G	0	0	40.6	40.6
RG-T1	Pel29.400	<3.50	Grave roulée sableuse (0/50mm)	G	0	0	34.1	34.1

Pour le corps de digue du tronçon RG-T5, il a été retenu $\varphi' = 33^\circ$ et $c'=3$ kPa, ceci est dans l'hypothèse de reconstruction de cette digue avec les mêmes matériaux. Étant donné que la digue va être complètement reconstruite, on pourra opter pour des matériaux présentant de meilleures caractéristiques. Pour le tronçon RG-T15 il a été retenu $\varphi' = 32^\circ$ et $c'=1$ kPa et pour les tronçons RGT16/T17 il a été retenu $\varphi' = 33^\circ$ et $c'=3$ kPa sur toute la hauteur de la digue/berge. Ces valeurs sont plus faibles que la moyenne, elles sont retenues par conservatisme et par manque de données (un essai par profils).

Les cohésions retenues sont inférieures à celles évaluées par les essais de cisaillement. Ceci s'explique par le fait que les essais de cisaillement à la boîte, du fait de la difficulté de drainage et du plan de cisaillement imposé, ont tendance à surévaluer ce paramètre mécanique.

7.3.2 Prédimensionnement et étude de stabilité des digues en remblais

La stabilité au glissement des digues/berges étudiées a été évaluée par la méthode de Bishop des glissements circulaires en utilisant le logiciel de calcul TALREN (de la société TERRASOL).

Les calculs ont été menés en utilisant la méthode des coefficients partiels. Les valeurs de ces derniers sont issues des « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai », du CFBR. (Tableau 27)

Tableau 27 - Coefficients partiels et de modèle à l'ELU stabilité d'ensemble au glissement

Situation	Coefficient partiel sur le poids volumique	Coefficient partiel sur la cohésion (c') et $\tan \varphi'$	Coefficient de modèle
Normale d'exploitation (Talus amont niveau bas)	1.00	1.25	1.20
Exceptionnelle de crue (Q100), transitoire (décrue rapide) et rare (charge exploitation)	1.00	1.10	1.20
Extrême de crue (limite de surverse)	1.00	1.00	1.10

Les surcharges sur les digues de l'Arve ont été prises égales à 30 et 50 kPa. Les pistes de crête ne sont pas soumises à un fort trafic. Pendant les travaux, une surcharge de 30 kPa sur la largeur de piste est très représentative. Ces charges d'exploitations sont appliquées sur une largeur de 3m pour les pistes en crête d'une largeur de 4 m.

Quand la solution implique une reconstruction totale de la digue, les pentes adoptées sur le talus amont (côté rivière) sont soit 2H/1V, soit 2,2H/1V pour les talus les plus hauts. Du côté aval (côté terre), les digues les plus hautes sont celles du secteur Bordet T01. Les pentes du talus aval adoptées sur ce secteur est de 2H/1V.

Tronçons retenus pour les calculs de stabilité

Les tronçons retenus pour les calculs de stabilité sont indiqués en bleu dans le Tableau 28.

Ces tronçons sont choisis en fonction du type de solution retenue tout en s'assurant une représentativité des différentes coupes sur tout le linéaire.

Tableau 28 - Caractéristiques géométriques des digues/berges de la rive gauche

Tronçon	Talus amont			Talus aval		
	Hauteur Amt/Arve	Pente de talus	Profil calculé	Hauteur aval/TN	Pente aval	Profil calculé
RG-T1	1	2/1	RG-T4	1	2/1	RG-T5
RG-T2	5.6	érosion tolérée: digue très en recul	so	0.8	2/1	
RG-T3	3.7	plus doux que 2.2/1	RG-T4	1.75	2/1	RG-T5
RG-T4	4.45	2/1	RG-T4	1.5	2/1	RG-T5
RG-T5	7.16	2/1	RG-T5	2.35	2/1	RG-T5
RG-T6	5.3	2/1	RG-T5	2	2/1	RG-T5
RG-T7	5.6	2/1	RF-T5	0.9	2/1	RG-T5
RG-T8	5.7	3/2 partie basse (3m) mur partie haute	RG-T9	Muret	-	-
RG-T9	5.9	2/1 partie basse (3.9m), Mur existant en haut	RG-T9	Mur	-	so
RG-T10	6.7	2/1 partie basse (4.1m), Mur ou perré en haut	RG-T10	Mur encastré	-	so
RG-T11	6.5	seuil existant avec enrochement, avec risberme à h 3.8, partir haute à 2/1 (2m)	RG-T11	2	2/1	
RG-T12	8.3	2.2/1	RG-T14	1.2	Mur	So
RG-T13	8.4	2.2/1	RG-T14	-	-	So
RG-T14	8.4	2.2/1	RG-T14	0.7	Mur	so
RG-T15	7.05	Talus avec enrochements non réaménagé (Glissement talus amont toléré)	RG-T15	0.85	2/1	Hauteur faible
RG-T16	7.5	Talus non réaménagé. Enrochement existant + mur pour l'accès parking	RG-T16	3.8m	Mur	So
RG-T17	7.2	Talus non réaménagé. Enrochement existant sur les 4.2 en haut	RG-T17	0.85	2/1	Hauteur faible
RG-T18	7.8	2.2/1	RG-T18	0.7	mur à l'aval	so
RG-T19	5.9	talus adouci	So	-	-	so
RG-T20	4.7	zone inondable en crue	so	-	-	so

Caractéristiques géotechniques retenues

- Tronçon RG-T5 : $\varphi' = 33^\circ$ et $c' = 3$ kPa ;
- Tronçon RG-T15 : $\varphi' = 30^\circ$ et $c' = 1$ kPa ;
- Tronçon RG-T16/T17 : $\varphi' = 33^\circ$ et $c' = 3$ kPa ;
- Tous les tronçons et fondation/berge RG-T5 et T15 : $\varphi' = 35^\circ$ et $c' = 0$ kPa ;
- Pour les enrochements de protection de pied de digue : $\varphi' = 45^\circ$ et $c' = 0$ kPa.

En poids volumique il a été retenu 19 kN/m³ pour les sols de berge et 20 kN/m³ pour les remblais de corps de digue (au-dessus du TN côté aval) et pour les enrochements.

Le détail des calculs de stabilité est donné dans la note de calcul de G2 AVP en annexe de la présente étude.

Les résultats des calculs de stabilité au glissement sont synthétisés dans le

Tableau 29 - Synthèse des calculs de stabilité au glissement des talus côté Arve et aval

Conditions de calcul	talus amont																Talus aval	
	RD-T2 28725	RD-T2 ¹ 28725	RD-T6 26600	RD-T7 26510	RG-T4 28525	RG-T5 28125	RG-T5 ² 28125	RG-T9 27305	RG-T10 27260	RG-T11 27110	RG-T14 26910	RG-T15 26825	RG-T15 ² 26825	RG-T17 26825	RG-T17 ² 26825	RG-T18 26510	RG-T5 28125	RG-T5 ² 28125
Q_module	0.97	1.01	1.04	1.05	1.07	0.99	1.01	1.22	1.11	1.10	1.06	1.17	1.09	1.55	1.60	1.06	1.18	1.35
Qmodule+10kPa (RN)	0.97	1.01	1.02	1.05	1.04	0.98	1.00	1.22	1.06	1.07	1.06	1.13	1.05	1.50	1.54	1.06	1.14	1.29
Qmodule+30 kPa (Transitoire)	1.06	1.10	1.12	1.16	1.12	1.10	1.11	1.34	1.11	1.17	1.17	1.21	1.13	1.61	1.63	1.20	1.16	1.25
Qmodule+50 kPa (Transitoire)	1.01	1.04	1.09	1.11	1.07	1.06	1.06	1.28	1.04	1.12	1.13	1.15	1.07	1.52	1.52	1.20	1.05	1.11
Q100 (crue)	1.23	1.30	1.23	1.35	1.10	1.21	1.32	1.37	1.36	1.20	1.33	1.05	1.22	1.92	2.11	1.40	1.13	1.30
Limite de surverse	1.57	1.65	1.53	1.51	1.10	1.06	1.04	1.81	1.77	1.53	1.60	1.34	1.64	2.20	2.80	1.69	1.00	1.16
Décru rapide (Q100-2m) condition défavorable	0.88	0.93	0.88	0.99	0.56	0.90	0.94	1.17	1.01	0.94	0.99	0.89	0.86	1.30	1.50	0.99	so	so
Décru rapide (Q100-2m) condition plus favorable	1.09	1.14	1.00	1.17	1.00	1.12	1.16	1.29	1.15	1.12	1.14	1.12	1.06	1.56	1.68	1.14	so	so
Moy. favorable / défavorable	0.99	1.04	0.94	1.08	0.78	1.01	1.05	1.23	1.08	1.03	1.07	1.01	0.96	1.43	1.59	1.07	so	so

7.3.3 Stabilité des berges et dimensionnement des enrochements

Pour chaque tronçon nécessitant une protection en enrochements, ceux-ci sont dimensionnés en utilisant la formule d'Isbach :

$$D_{50} \geq \frac{1}{k_{sl} \cdot k_t^2} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot \Delta}$$

Avec :

D₅₀ diamètre médian des bloc (m),

- V : La vitesse maximale considérée (m/s) pour chaque tronçon. Cette vitesse est celle issue du modèle 2D pour le débit de la crue centennale sur l'Arve. Deux vitesses ont été considérées, qu'on se situe en pied de berge ou sur le talus. Un coefficient de survitesse de 1.2 a été appliqué pour prendre en compte les éventuelles incertitudes liées à la modélisation hydraulique des écoulements,
- Δ : la masse volumique déjaugé des enrochements : la masse volumique apparente (densité de la matière de l'enrochement) est prise à 2,6 t/m³, ce qui donne une masse volumique déjaugé (Δ) de 1.6 t/m³,
- k_{t2} : le coefficient Isbach : en considérant que l'écoulement est faiblement turbulent, le coefficient Isbach k_{t2} est de 1.4,
- k_{sl} : Coefficient de Lane, $k_{sl} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \varphi}}$ qui prend en compte la pente du talus « surface » à protéger,
- α est l'angle du talus. Pour rappel, la pente du talus avec enrochement varie entre 2H/1V et 2.2H/1V, soit un angle entre 26,5° et 24,4° respectivement,
- φ est l'angle de frottement des matériaux, pour des enrochements issus de matériaux de carrière on prend habituellement 45°,
- g : l'accélération de la pesanteur (9.8 m/s²)

Nous pouvons retrouver les dimensions des enrochements par tronçon dans le

Tableau 30 - Dimensionnement des enrochements de protection et des épis pour les différents tronçons de l'Arve

Tronçon	Ouvrages	Repère/ Ponts	Vmax en pied [m/s]	Pente talus amont (H/V)	D_50 pente [m]	M_50 (Cube- sphère) [kg]	Vmax pied +6m [m/s]	D_50 pied [m]	M_50 (Cube- sphère) [kg]	M_50- Maxi [kg]	D_50- Maxi [m]	Classe d'enrochement (NF-EN 13383)	D50/ classe enroch	Épaisseur 2 à 3*D50
RG-T20	Confluence Borne		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T19	Merlon de la Prison		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T18	Merlon de la Prison	Pont de la Prison	4.5	2.2	0.8	1042.4	4.7	0.7	704.3	1042.4	0.8	1000/3000	0.99	1.97
RG-T17	Bois Jolivet Aval	Pont de la Prison	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T16	Bois Jolivet Aval		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T15	Bois Jolivet Amont		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T14	Bois Jolivet Amont		2.2	2.2	0.2	14.0	3.0	0.3	47.8	47.8	0.3	60/300	0.43	1.28
RG-T13	Bois Jolivet Amont		2.6	2.2	0.3	40.4	3.2	0.3	70.7	70.7	0.3	60/300	0.43	1.28
RG-T12	Bois Jolivet Amont		2.6	2.2	0.3	42.3	3.3	0.4	91.6	91.6	0.4	60/300	0.43	1.28
RG-T11	Bois Jolivet Amont	Pont de l'Europe	2.3	1.4	0.3	54.1	3.3	0.4	86.8	86.8	0.4	60/300	0.43	1.28
RG-T10	La Colonne	Pont de l'Europe	2.0	2.0	0.2	9.6	2.8	0.3	36.6	36.6	0.3	60/300	0.43	1.28
RG-T9	Saint Esprit		2.5	2.0	0.3	38.4	3.1	0.3	64.3	64.3	0.3	60/300	0.43	1.28
RG-T8	Saint Esprit		2.1	1.5	0.2	26.5	2.7	0.2	24.7	26.5	0.2	60/300	0.43	1.28
RG-T7	Saint Esprit	Pont SNCF	1.8	2.0	0.1	4.9	2.3	0.2	10.9	10.9	0.2	60/300	0.43	1.28
RG-T6	Bordet Pont ZI Aval	Pont SNCF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T5	Bordet Pont ZI Aval		2.4	2.0	0.2	30.9	2.9	0.3	38.1	38.1	0.3	60/300	0.43	1.28
RG-T4	Bordet Pont ZI Aval		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T3	Bordet Pont ZI / Bordet Aval Pont ZI	Pont ZI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T2	Bordet Pont ZI Amont	Pont ZI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RG-T1	Bordet Colas / ZAC des Bordets 1 / Bordet Amont Pont ZI		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7.3.4 Prédimensionnement des solutions de soutènement

7.3.4.1 Mur de soutènement

Certains tronçons nécessitent la mise en place de solution de soutènement. Ces derniers sont utilisés lorsque l'emprise disponible est insuffisante pour avoir un talus stable avec la pente suffisante.

Les murs de soutènement sont considérés de type T renversé. Le prédimensionnement est mené en fonction de la hauteur de soutènement H (mise hors gel de 80 cm comprise) selon la méthode indiquée ci-dessous :

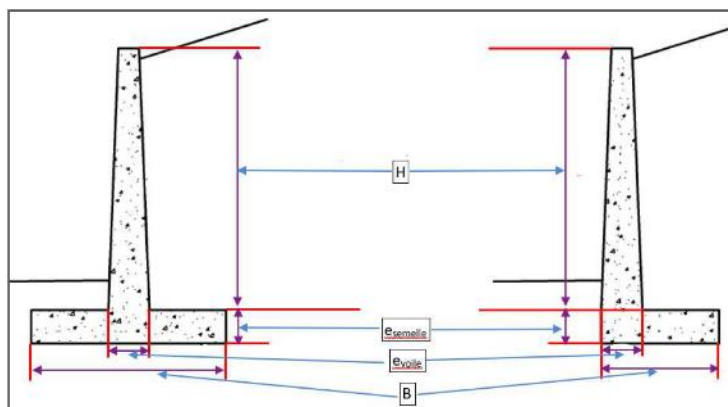


Figure 85 - Définition schématique des paramètres de prédimensionnement des murs de soutènement

- Épaisseur du voile : habituellement il est retenu $H/24$ en tête et $H/12$ au contact de la semelle, par simplification et par conservatisme il est retenu $e_{\text{voile}} = H/12$;
- Largeur de la semelle : $B = 0.4H$ à $0.6H$, en une première approche on prend $B = 0.6H$;
- Épaisseur de la semelle : $e_{\text{semelle}} = e_{\text{voile}}$.
- Pour le tronçon RD-T8 : le mur projeté est de type L. Le même prédimensionnement de l'épaisseur et de largeur de semelle a été adopté.

Les données relatives aux tronçons concernés ainsi que les résultats du prédimensionnement sont synthétisées dans le Tableau 31.

Tableau 31 - Synthèse du prédimensionnement des murs de soutènement sur les tronçons concernés

Rive	Localisation	Tronçon	Type	PM amont	PM aval	H_aval maxi	Linéaire d'application (m)	Argumentaire	B (m)	e calculée (m)	e arrondie (m)
Gauche	T02 – Saint-Esprit	RG-T8 (éventuellement ou mur enrochement 1/1)	Mur	27550	27360	3.3	190	Continuité amont belvédère	1.98	0.28	0.3
Gauche	T01 – La Colonne	RG-T10 (éventuellement ou mur enrochement 1/1)	Mur	27305	27220	1.8	65	Continuité aval belvédère	1.10	0.16	0.15
Gauche	T01 – Bois Jolivet Aval	RG-T16	Mur	26795	26730	3.8	200	Entrée des garages	2.30	0.31	0.3

7.3.4.2 Paroi berlinoise

Une paroi berlinoise est projetée au niveau du tronçon **RG-T10** (au droit de la propriété situé en partie dans la digue).



Figure 86 : Emprise de la paroi berlinoise (sur environ 20 ml)

À ce stade d'études (AVP), le prédimensionnement de la paroi est fait sur la base d'une mise en fiche de profilés métalliques équivalente à 2 fois la hauteur de soutènement (approche sécuritaire).

Dans notre cas À savoir pour une hauteur de soutènement de 2.5m, les profilés métalliques seront fichés sur deux fois la hauteur à soutenir, soit une hauteur totale de 7.5m. Le soutènement sera assuré par des parement en béton armé de 2.5m de hauteur.

Les caractéristiques de prédimensionnement retenues sont les suivantes :

- **Linéaire d'application** : 20 m,
- **Espacement des profilés métalliques** : 1.5 m,
- **Profondeur de fiche des profilés métalliques** : 7.5 m,
- **Hauteur des parement béton** : 2.5 m.

Le dimensionnement de cet ouvrage sera affiné au stade « Projet » via la G2PRO à mener sur ce secteur (niveau de sureté à assurer sur toute la hauteur de l'ouvrage). Il est en effet nécessaire d'avoir plus d'information sur l'environnement de la maison pour concevoir une solution fiable : type et localisation de fondations, présence de cave... Il est rappelé que le terrain naturel de la propriété est au-dessus de la cote Q100 + revanche.

NB : La G2PRO de chaque phase de travaux sera fourni au service instructeur de la DREAL pour confirmer/valider le dimensionnement des ouvrages.

7.3.5 Prise en compte des aspects hydrogéologiques

Le principe de cette méthodologie est de vérifier, avec une méthode simplifiée, la possibilité de saturer le corps de digue avec un talus aval lors de leur mise en charge en période de crue. Dans le cas échéant, la saturation pourrait amener à l'apparition d'écoulements d'infiltration se traduisant potentiellement par des résurgences en pied de digue. Bien que ces écoulements ne soient pas préjudiciables en soit, ils pourraient nécessiter de drainer le pied aval de digue si les vitesses et/ou les débits d'infiltration sont jugés importants. Dans le cas où il les calculs montrent que la digue se sature, on prévoit dans la conception des dispositifs pour recueillir et évacuer les eaux d'infiltration (contre-canaux, système de rejet...) La vérification se fait en supposant dans un premier temps que le corps de la digue est saturé. Ensuite, on calcule le temps de percolation nécessaire pour avoir cette saturation en fonction du chemin d'écoulement et de la perméabilité du sol de corps de digue. Ce temps de percolation est enfin comparé au limnigramme en crue.

Cette approche s'appuie donc sur deux lois :

- La loi de Kozeny pour déterminer la ligne de saturation ;
- La loi de Darcy pour déterminer la vitesse de percolation en milieu poreux.

Tableau 32 - Calcul des temps de percolation pour les profils considérés en fonction des coefficients de perméabilité retenus

Profils	PM	Cote TN (m)	Q100 (m)	Charge/ Q100 [H] (m)	Long hydr [l] (m)	Gradient i=h/l	Long chemin L (m)	$k=10^{-3}$	$k=10^{-4}$	$k=10^{-3}$	$k=10^{-4}$
								$V=k*i$ (m/s)	$V=k*i$ (m/s)	T_{perco} (L/v) (h)	T_{perco} (L/v) (h)
RG-T3	28725	447.66	448.61	0.95	9.11	0.10	9.2	1.04E-04	1.04E-05	24.40	243.98
RG-T4	28525	447.54	448.26	0.72	8.64	0.08	8.7	8.33E-05	8.33E-06	28.90	289.00
RG-T5-1	28125	446.2	447.76	1.56	10.29	0.15	10.4	1.52E-04	1.52E-05	19.07	190.69
RG-T5-2	27950	445.87	447.44	1.57	10.26	0.15	10.4	1.53E-04	1.53E-05	18.84	188.42
RG-T6	27570	445.74	446.87	1.12	9.46	0.12	9.5	1.18E-04	1.18E-05	22.35	223.50
RG-T11	27110	444.79	445.8	1.01	10.2	0.10	10.2	9.90E-05	9.90E-06	28.75	287.54
RD-T1	28825	448.15	448.87	0.72	8.64	0.08	8.7	8.33E-05	8.33E-06	28.90	289.00
RD-T5	26710	444.54	445.58	1.03	16.1	0.06	16.1	6.40E-05	6.40E-06	70.05	700.49

Tableau 33 - Temps de crue/décru pour les profils considérés déterminés à partir des limnigramme de crue

Profils	Temps Crue (h)	Temps décrue (h)	Temps (crue + décrue) (h)
RG-T3	5.53	7.17	12.70
RG-T4	5.13	5.17	10.30
RG-T5-1	7.13	14.67	21.80
RG-T5-2	6.73	13.47	20.20
RG-T6	5.33	7.17	12.50
RG-T11	4.93	6.07	11.00
RD-T1	5.13	5.17	10.30
RD-T5	5.13	6.17	11.30

L'analyse, détaillée dans la note de calcul de G2 AVP, a permis de montrer qu'un matériau de perméabilité 10^{-4} m/s suffit à couvrir l'ensemble des risques hydrogéologiques moyennant une réalisation soignée. Si cette perméabilité est respectée, il n'y aura pas de résurgence en pied aval suivant les hypothèses considérées au stade AVP.

7.3.6 Recommandations concernant l'érosion interne

Pour éviter le risque d'érosion interne les dispositions constructives et les recommandations présentées ci-dessous sont à appliquer sur tout le linéaire concerné en fonction de la nature des sols de fondation et de corps de digue.

- Érosion par suffusion : Les matériaux qui seront utilisés pour la reconstruction des digues/berge doivent respecter les critères des matériaux non suffusifs (Kenney et Lau, 1986 ; Wan et Fell, 2008, etc.),
- Érosion de contact : L'érosion de contact est un phénomène induit par le détachement de particules à l'interface entre deux milieux poreux de granulométries très différentes. Ce mécanisme est fortement lié à la discontinuité entre les deux milieux, en termes de granulométrie mais aussi de perméabilité. Pour se prémunir du risque d'érosion dans cette configuration, il faut s'assurer de la règle de filtre entre ces deux matériaux (Terzaghi, 1935...). Entre les enrochements et le terrain naturel, un géotextile résistant permettra d'éviter tout risque d'érosion de contact entre les diamètres importants des blocs et le sol sablo-limoneux des digues et berges.
- Érosion de conduit : Hormis pour quelques échantillons, les matériaux rencontrés sur site ne sont pas cohésifs et ne permettent pas la tenue d'un conduit traversant. Néanmoins, à la vue de l'hétérogénéité des matériaux rencontrés, il est pertinent de s'assurer sur les tronçons où nous tolérons le développement de végétation ligneuse, que les systèmes racinaires ne traversent pas toute la largeur de la digue par la mise en place d'écran empêchant le développement des systèmes racinaires, ces écrans sont calés 1 m sous le niveau de la digue, en considérant la hauteur de digue par rapport au côté val. Il sera utile dans ce cas de s'appuyer sur les inventaires naturalistes et sur les zones potentiellement à boiser après travaux pour identifier les zones à risque et pour se prémunir de ce risque. Des grillages anti-fouisseurs ou des matériaux drainants, peuvent être mis en œuvre sur les talus pour empêcher la formation de conduits par la faune sur les zones favorables aux fouisseurs (proximité de zones arborées denses).

Pour la localisation des zones à traiter se référer également aux inventaires naturalistes ou aux rex.

Concernant les pistes, hormis pour les tronçons au droit desquels une coupure hydraulique est mise en œuvre (palplanche ou mur béton), l'intégration d'une couche de grave sur la partie supérieure de l'ouvrage est de nature à augmenter fortement la perméabilité dans les 30 derniers centimètres (revanche). En conséquence, une étanchéité est prolongée jusqu'au niveau de Q100 + revanche via la mise en place d'une géomembrane. Les sujétions d'ancrage et de confinement de cette géomembrane nécessitent, au droit des secteurs concernés, de relever l'arase de la piste de 10 cm par rapport à l'arase usuelle de Q100 + revanche (cf. Figure 87 ci-après).

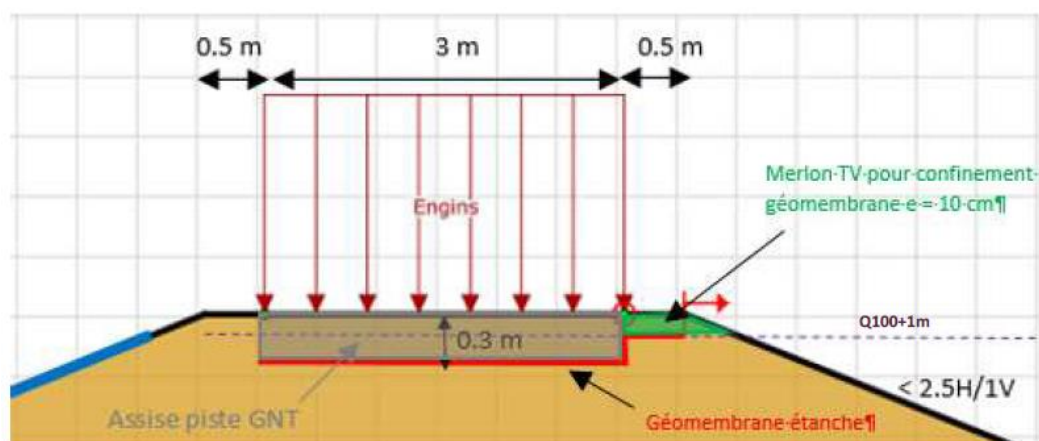


Figure 87 - dispositions constructives au droit des pistes d'exploitation

Concernant les cheminements piétons, leur structure est identique à celle des pistes d'exploitation :

- Erosion régressive : Les parades pour se prémunir de ce risque, s'il est avéré, sont soit d'adoucir le talus aval, soit de mettre en place un matériau filtrant/drainant en pied de digue résistant à l'érosion régressive. Aux vues des conclusions du 7.3.5, le corps de digue ne se sature pas, permettant ainsi de ne pas avoir de résurgences en pied de digue, ce qui rend le risque peu probable.

7.4 Arve RG (Avant-projet de confortement) – vérification de la tenue des ouvrages

NB :

- La description complète de l'AVP est dans la partie 5 du présent rapport, il est question dans cette partie des éléments de justification de la tenue mécanique des aménagements envisagés.
- Le découpage en tronçons décrits dans cette partie correspond à la Figure 50 à laquelle nous renvoyons (Vue en plan de la sectorisation des digues en tronçons homogènes).

Pour ne pas alourdir la lecture du dossier d'EDD, nous renvoyons au dossier G2 AVP pour tous les détails techniques sur les méthodes présentées synthétiquement et les résultats.

7.4.1 Principes généraux

Un avant-projet de confortement des digues de l'Arve a été proposé afin de diminuer les risques de rupture des ouvrages en cas de crue. Ce projet de confortement se décrit ainsi comme la **Reprise complète des tronçons d'endiguement** ; i.e. corps de digue et protection des talus. Les tronçons concernés sont décrits dans la Figure 88 :

RG	ARVE-RG-BONNE-26.24 : Bonneville Entre Arve et Borne	T02 – Bordet Colas	30160	A40	29650	-
		T01 – ZAC des Bordets 1	29650	-	29130	-
		T02 – Bordet Amont Pont ZI	29950	-	28890	Pont de la ZI
		T01 – Bordet Aval Pont ZI	28890	Pont de la ZI	27670	Pont SNCF
		T02 – Saint-Esprit	27670	Pont SNCF-	27310	-
		T01 – La Colonne	27310	-	27220	Pont de l'Europe
		T02 – Bois Jolivet Amont	27190	Pont de l'Europe	26790	Passerelle du Trésor public
		T01 – Bois Jolivet Aval	26790	Passerelle du Trésor public	26580	-
		T01 – Merlon de la Prison	26580	Pont de la prison	26190	-

Figure 88 - Ouvrages concernés par l'étude - Arve RG

PK Amont	PK Aval	Linéaire (m)	Ouvrage(s)	Tronçons	Description	Proposition groupement
30.000	29.210	790	T02 – Bordet Colas / T01 – ZAC des Bordets 1 / T02 – Bordet Amont Pont ZI	RG-T1	Double digue	- Dépose de Bordet T2 - Décaissement de tout ou partie de l'espace entre les deux digues (selon possibilité/besoin de réemploi) - Merlon des Bordets à reprendre
29.210	28.990	220	T02 – Bordet Amont Pont ZI / T01 – Bordet Aval Pont ZI	RG-T2	Transition	- Déport de la digue en retrait, maintien du talus amont actuel
28.990	28.625	365		RG-T3	Banc des Bordets	- Réfection de la digue sans protection contre l'érosion externe - Maintien des enrochements à l'amont de la pile du pont ZI
28.625	28.395	230		RG-T4		
28.395	27.715	680		RG-T5	Digue des Bordet, portion sans banc alluvial en pied + raccordements	- Réfection de la digue, protection contre l'érosion externe en technique mixte, - Épis en pied de berge
27.715	27.615	100		RG-T6	Amont/aval pont SNCF	- Réfection de la digue sans protection contre l'érosion externe (banc boisé en pied)
27.615	27.550	65		RG-T7	Amont esplanade	- Réfection de la digue, technique mixte
27.550	27.360	190		T02 – Saint-Esprit	RG-T8	Esplanade et perré
27.360	27.310	50	RG-T9		Belvédère	- Suppression de l'encorbellement - Habillage du mur existant (à définir), - Butée de pied technique mixte, - Cheminement en pied du mur, - Muret pour la revanche si nécessaire.
27.305	27.220	85	T01 – La Colonne	RG-T10	Murs au droit des maisons, amont pont de l'Europe	- De part et d'autre de la maison : Adoucissement du talus, technique mixte, Muret côté val, - Au droit de la maison : paroi berlinoise (habillage à définir),
27.170	27.070	100	T02 – Bois Jolivet Amont	RG-T11	Du pont de l'Europe jusqu'au 2nd seuil	- Reconstruction digue sur partie haute - Maintien de la protection existante du talus amont
27.070	26.990	80		RG-T12	du 2nd seuil à ? (milieu de	- Mur/merlon coté val - Reprise du talus amont en technique

					l'école) (digue étroite)	mixte - Épis en pied de berge
26.990	26.930	60		RG-T13	École partie centrale (Absence de levée de terre, pas de digue)	
26.930	26.900	30		RG-T14	École partie aval	
26.900	26.795	105		RG-T15	Amont passerelle	- Épaulement côté val - Reprise du talus amont en technique mixte - Épis en pied de berge
26.795	26.730	65	T01 – Bois Jolivet Aval	RG-T16	Passerelle à garages	- Reprise de digue partie haute, - Maintien de la risberme boisée - Restauration de la berge - Épis en pied de berge - Soutènement au droit de l'entrée des garages
26.730	26.595	135		RG-T17	Garages à Pont prison	- Reprise de digue partie haute, - Maintien de la risberme boisée - Restauration de la berge - Épis en pied de berge
26.595	26.420	175	T01 – Merlon de la Prison	RG-T18	Merlon prison	- Reprise digue par technique mixte, adoucissement du talus, Muret en crête
26.420	26.235	185		RG-T19	Zone du champ de foire	- Arase de la digue existante et adoucissement de la berge (sans protection en enrochements - Conservation du cordon boisé en pied de berge
26.235	26.130	105	-	RG-T20	Confluence du Borne	- Abaissement de la confluence du Borne

7.4.2 Objectif de protection

Il a été convenu avec le Maître d'Ouvrage de concevoir l'avant-projet avec le niveau de protection suivant :

Tableau 34 : Objectifs de protection du système d'endiguement

Cotes de référence	Arve
Crue de protection	Q ₁₀₀
Cote des crêtes de digue	Amont du pont de l'Europe : Q ₁₀₀ +0,8 m Aval du pont de l'Europe : Q ₁₀₀ +1,0 m

A noter que l'AVP exposé présente un objectif de protection et de sureté fixé. Des recherches d'optimisation, si nécessaires, seront apportées dans les phases suivantes du projet.

7.4.3 Méthode de vérification de la tenue des ouvrages

7.4.3.1 Arbres de défaillance

Le diagnostic technique approfondi vise à vérifier la tenue des ouvrages jusqu'au niveau de protection. Pour ce niveau de protection, la probabilité résiduelle de rupture acceptable est de 5%.

La probabilité de rupture pour la crue de projet correspondant à la crue centennale est déterminée pour différentes modalités de rupture définies par des scénarios de rupture détaillés en arbre de défaillance, chaque bifurcation correspondant à une étape de rupture de l'ouvrage.

Une probabilité est associée à chaque étape sur la base de l'analyse des connaissances disponibles, le retour d'expérience sur l'ouvrage, le projet prévu, et en intégrant une approche calculatoire.

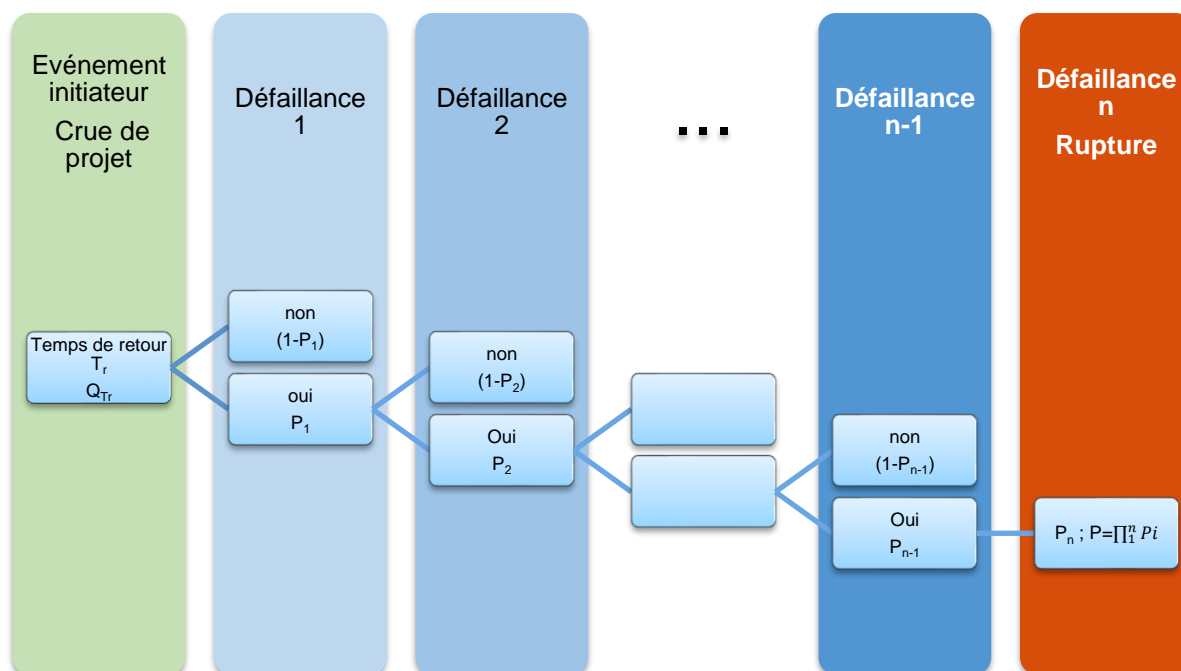


Figure 89 - Arbre type de probabilité

7.4.3.2 Mécanismes de rupture identifiés

Les quatre mécanismes de rupture principaux d'une digue sont l'objet du présent diagnostic approfondi :

- Rupture par surverse,
- Rupture par érosion externe côté cours d'eau,
- Rupture érosion interne du corps de la digue ou de la fondation, en partie courante ou au droit des franchissements,
- Rupture par instabilité.

Ces mécanismes de défaillances sont décrits au chapitre 6.3 de ce rapport.

7.4.3.3 Appréciation des probabilités de rupture

Les probabilités des différents phénomènes pouvant conduire à un accident (érosion interne, érosion externe, ...) sont rarement quantifiables de manière absolue.

Lorsqu'une quantification numérique de la probabilité d'une étape est envisageable, celle-ci est réalisée. En pratique, cela est rarement le cas (voire jamais) et il est nécessaire de faire appel à des approches expertes des probabilités.

Pour la détermination de ces dernières, nous avons retenu dans le cadre du présent diagnostic les valeurs proposées par Vick 2002 [3] et adaptées par l'United States Bureau of Reclamation (USBR).

L' USBR a adopté un système de qualification verbale pour la plupart des estimations de probabilité subjective, basé principalement sur des expériences rapportées par Reagan et al (1989) [4]. Celles-ci montrent que, dans des limites raisonnables, les gens sont assez bien calibrés pour des probabilités connues, à condition :

- D' utiliser des mots que la plupart des gens adopteraient pour leur propre cas,
- Que les probabilités soient plus probables que 1%.

Vick (2002) [3] a résumé ces résultats et a proposé une convention verbale de transformation numérique, indiqué dans le tableau ci-dessous. Les résultats des expériences réalisées par Reagan et al [4] figurent à côté de ces valeurs. Une des principales conclusions des expériences est que la capacité des gens à quantifier des probabilités ne se prolonge pas très loin à chaque extrémité de l'échelle de probabilité, même si des mots comme "presque impossible "ou "presque certain" sont utilisés. Cela est probablement dû au fait que l'expérience de la plupart des gens ne leur permet pas de conceptualiser des probabilités pour des valeurs extrêmes, et on ne dispose donc pas des termes qui décrivent adéquatement ces valeurs extrêmes.

Qualification verbale de l'évènement	Code couleur	Probabilité suggéré Vick (2002) [3]	Gamme de probabilités Reagan et al (1989) [4]
Très improbable En raison de conditions physiques connues ou des procédés qui peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance		0.01	0 - 0,05
Improbable Bien que la possibilité ne puisse être écartée		0.1	0,002 – 0,15
Neutre Avec aucune raison de croire qu'un résultat est plus ou moins probable que l'autre		0.5	0,45 - 0,55
Probable Mais sans être complètement certain		0.9	0,75 - 0,90
Très probable En raison de conditions physiques connues ou des procédés qui peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance		0.99	0,9 - 0,995

Tableau 35 : Probabilité conditionnelle proposée par Vick (2002)

Ces probabilités conditionnelles seront affectées directement à chaque élément de chaque scénario de rupture identifié.

7.4.4 Caractérisation des probabilités de rupture des digues

7.4.4.1 Calcul de sollicitations hydrauliques

L'analyse des modes de rupture des ouvrages est réalisée pour la crue de dimensionnement théorique des ouvrages à l'état projet, soit la crue de période de retour 100 ans l'Arve, avec une crue de 90 m³/s le Borne. Si le risque de rupture résiduel est supérieur à 5% pour la crue centennale, alors, il est cherché le niveau d'eau maximal pouvant garantir un risque de rupture inférieur à 5%.

La ligne d'eau du Borne est directement issue du modèle hydraulique réalisé par CNR et présenté dans cette étude de dangers. Les niveaux d'eau côté zone protégée ont été évalués par une modélisation des écoulements dans le corps des digues et de leur fondation dont les résultats sont décrits dans la présente étude.

7.4.4.2 Sensibilité au séisme

Selon les recommandations du groupe du travail barrage et séismes d'octobre 2014 [5], l'étude du cas d'une rupture sous séisme est recommandée compte tenue de la classe de la digue (classe B) et de la zone de sismicité (zone 4 : sismicité modérée, cf. §4.4.1).

7.5.2.3. Niveaux d'études recommandés

Les recommandations en matière d'études graduées sont les suivantes :

Zone de sismicité	Classe D	Classe C	Classe B	Classe A
1	α	α	α	α
2	α	α	α	α
3	α	α	α	β
4	α	α	β	β
5	α	β	β	β

Tableau 7-28 - Recommandations pour les études graduées - digues

α : vérification de la conformité aux règles du génie civil
 β : vérification de la stabilité par méthode pseudo-statique

Figure 90 - vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [5])

Il est également recommandé dans ce document pour un système d'endiguement de classe dans une zone de sismicité 4 de vérifier la sécurité structurale vis-à-vis de la liquéfaction :

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 91 - Recommandation de vérification de la sécurité structurale de la digue à la liquéfaction (recommandation du MEDDE, 2014 [5])

Les calculs sont menés selon les recommandations du MEDDE.

L'accélération de calcul est estimée à partir des facteurs suivants :

- Accélération maximale de référence au niveau d'un sol de classe A. Cette accélération est donnée en fonction de la zone de sismicité :

Zones de sismicité	a_{gr}
1 (Très faible)	0,4
2 (Faible)	0,7
3 (Modérée)	1,1
4 (Moyenne)	1,6
5 (Forte)	3

Figure 92 - accélération maximale de référence au niveau du sol en fonction de la zone de sismicité (Source : Recommandation du MEDDE, 2014 [5])

- Le coefficient d'importance γ_I . L'accélération horizontale de calcul au niveau d'un sol de type rocheux (classe A au sens de la norme NF EN 1998-1) a_g , est égale à a_{gr} multiplié par le coefficient d'importance γ_I soit $a_g = \gamma_I * a_{gr}$. En considérant une catégorie d'importance III, on a $\gamma_I = 1,2$;
- Le paramètre de sol S. La nature du sol par l'intermédiaire du paramètre de sol est prise en compte, en considérant les valeurs de S associées :

Classes de sol	S (pour les zones de sismicité 1 à 4)	S (pour la zone de sismicité 5)
A	1	1
B	1,35	1,2
C	1,5	1,15
D	1,6	1,35
E	1,8	1,4

Figure 93 - paramètre de sol en fonction de la classe de sol (Source : Recommandation du MEDDE, 2014 [5])

Le sol étant de classe C, on prendra $S = 1,5$;

- Le coefficient r fonction de la capacité de l'ouvrage à accepter des déplacements irréversibles post-séismes. Une valeur usuelle prise en compte pour ce paramètre pour une digue en remblai est de 2.

La vérification de la stabilité au glissement est effectuée selon la méthode pseudo-statique en tenant compte des coefficients d'accélération horizontale et verticale estimés selon les formules suivantes :

- $\sigma_h = \frac{1}{r} * \gamma_I * \frac{a_{gr}}{g} * S = 0,5 * 1,2 * \frac{1,6}{9,81} * 1,5 = 0,147$
- $\sigma_v = \pm 0,5 * \sigma_h = \pm 0,073$

Afin de vérifier la stabilité au séisme, ces coefficients seront appliqués dans le modèle de stabilité de la digue lors de la phase PRO.

Afin de se prémunir des venues d'eau à la suite de la survenue d'un séisme, le gestionnaire prévoit dans son organisation la réalisation de visites post-séisme des digues, afin de s'assurer du bon état des digues. En cas de désordres constatés causés par le séisme, celui-ci prévoira la réalisation de travaux, par le biais d'un accord-cadre signé avec une entreprise de travaux.

7.4.4.3 Modes de rupture considérés

Le schéma ci-dessous synthétise tous les modes de rupture considérés dans notre étude :

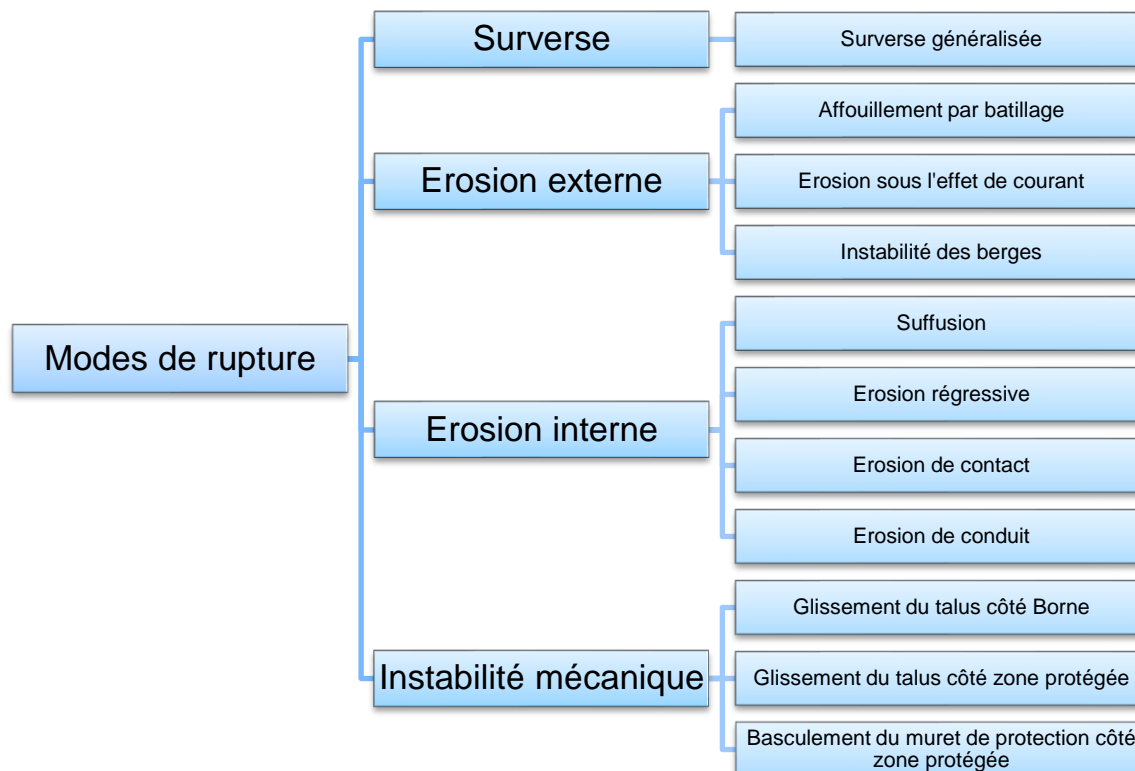


Figure 94 - Modes de rupture considérés

7.4.4.4 Rupture par surverse

7.4.4.4.1 Qualification des sollicitations

La rupture par déversement sur la crête de la digue constitue un des mécanismes les plus fréquents de ruine des digues.

Cette rupture se produit si la sollicitation (lame de surverse, durée de surverse et hauteur de chute) est suffisante.

La mise en vitesse de l'écoulement sur le parement aval dépend de la hauteur du parement aval, de sa pente et de son revêtement (rugosité).

La résistance à l'érosion de la digue en pied de parement aval dépend du revêtement du parement et de la nature du revêtement (cohésion, compacité).

Les conditions d'écoulement de surverse pouvant induire une érosion importante en fonction du type de remblai sont cependant mal connues d'un point de vue quantitatif et les références dans la littérature sont peu nombreuses.

On retiendra qu'en règles générales, l'érosion démarre dès le début de la surverse avec de faibles lames d'eau (inférieures à 10 cm) pour les ouvrages dont le pied aval est en remblai dont la qualité de mise en place a été médiocre. En revanche, un ouvrage

protégé (présence d'enrobé ou de béton côté zone protégée) peut supporter des lames d'eau plus importante (typiquement 10 à 30 cm) pendant quelques heures.

On estime que le risque de surverse devient nul dès lors que la revanche est supérieure à 50 cm.

En se basant sur les descriptions des ouvrages et de leur état, on peut par ailleurs analyser les critères suivants de résistance à la rupture :

- Nature du terrain côté zone protégée,
- Géométrie (largeur de la digue, pente des talus, hauteur du muret),

Dans le cas d'un mur de protection, la rupture par surverse est un mécanisme en deux étapes : d'abord l'érosion du pied aval par la surverse puis le basculement du mur de protection. D'autres critères sont donc à prendre en compte comme l'ancrage du mur et son profil.

La situation considérée étant une situation de projet, la cote de crête projetée de la digue correspond à la cote prévue dans l'AVP de la digue de $Z_{Q100} + 1$ m ou $Z_{Q100} + 0.8$ m

7.4.4.4.2 Arbre de défaillance

L'arbre de défaillance suivant est proposé pour la surverse.

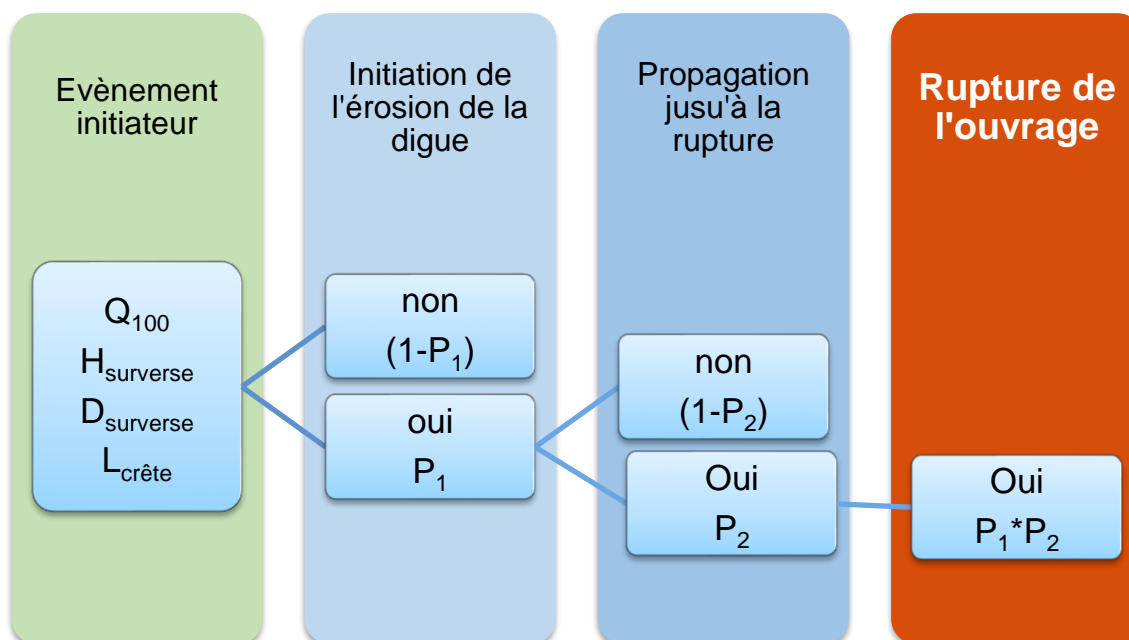


Figure 95 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par surverse

7.4.4.4.3 Evaluation des probabilités conditionnelles

Initiation de l'érosion de la digue : P_1

L'initiation dépend de la sollicitation (vitesse de l'écoulement sur le talus) et de la résistance du talus dicté par son revêtement et par la nature des matériaux.

Il est ici proposé d'appliquer la méthode CIRIA [6] :

- Appréciation du débit spécifique,

- Appréciation de la vitesse d'écoulement selon les recommandations du CIRIA en considérant la pente et la hauteur des talus ; cette vitesse va dépendre du débit spécifique et des caractéristiques du couvert herbacée (le coefficient de rugosité varie selon l'intensité du débit) ;
- Appréciation de l'initiation avec les abaques du CIRIA en considérant la vitesse et la durée des écoulements.

Calcul de la sollicitation :

Le débit de surverse est calculé à partir d'une loi hauteur-débit en assimilant la digue à un déversoir. La hauteur de surverse est calculée à partir de la ligne d'eau majorée (cf. §7.4.4.4.1).

L'équation générale est de la forme :

$$q = \mu * \sqrt{2 * g * H_{surverse}^3}$$

Avec :

q le débit d'écoulement par unité de longueur (m²/s)

μ coefficient de débit

H_{surverse} : charge sur la crête (m)

D'après nos connaissances pour ce type de situation et d'après la littérature, la valeur de μ pour un déversoir latéral est généralement comprise entre 0,15 et 0,30 (valeur à ne pas dépasser pour des digues : seuil épais et parallèle à l'écoulement). On retiendra ici la valeur conservative de 0,25.

La vitesse d'écoulement sur le talus aval est ensuite calculée d'après les recommandations du Guide Internationale sur les digues du Cerema [7], ces dernières sont rappelées ci-dessous :

Potentiel d'érosion du talus aval/côté terre de la digue

Le pied du talus de digue côté terre est le point de départ le plus fréquent d'une érosion. L'écoulement s'accélère pour atteindre un écoulement torrentiel et continue jusqu'au pied du talus de digue où un ressaut hydraulique se produit. Une érosion se développe à cause des fortes vitesses et de la turbulence au sein du ressaut. L'érosion se propage en amont jusqu'à atteindre la crête de la digue.

Dans des conditions d'écoulement typiques de déversement, le débit devient constant quand un équilibre s'établit entre la quantité de mouvement et les forces de frottement le long du talus. L'équation de Manning de la vitesse v_b en régime uniforme est défini comme suit :

$$v_b = \left(\frac{\sqrt{\sin \beta}}{n} \right)^{0.6} q_s^{0.4} \tag{8.34}$$

où :

β = l'angle de la pente côté terre

q_s = le débit critique en situation permanente (m³/s/ml)

n = le coefficient de Manning (-)

Hewlett *et al.* (1987) recommandent n = 0,03 pour les pentes de 1:10, diminuant linéairement jusqu'à n = 0,02 pour les pentes de 1:3 ou plus raides. Comme l'équation de Manning a été dérivée pour les pentes douces, cette équation n'est pas strictement valide pour les pentes raides où l'entraînement d'air devient significatif.

Figure 96 - Vitesse d'écoulement sur le talus d'une digue en surverse - Cerema [7]

La valeur retenue pour le coefficient de Manning est de 0,02.

Définition de la résistance :

La résistance d'un talus à la surverse se caractérise principalement par la nature du revêtement. Les tronçons étudiés ont tous des talus enherbés cependant le revêtement de la crête peut différer (herbe ou chemin stabilisé). Pour la description précise de chaque tronçon, se référer au §5.1.4.

Relation résistance/sollicitation :

Les vitesses limites de dimensionnement de protection anti-érosion en fonction du revêtement du talus et de la durée de surverse sont données ci-dessous. Les digues de Blagnac présentent une couverture herbeuse que l'on pourrait juger « moyenne », cf. courbe en pointillé jaune sur le graphique ci-dessous :

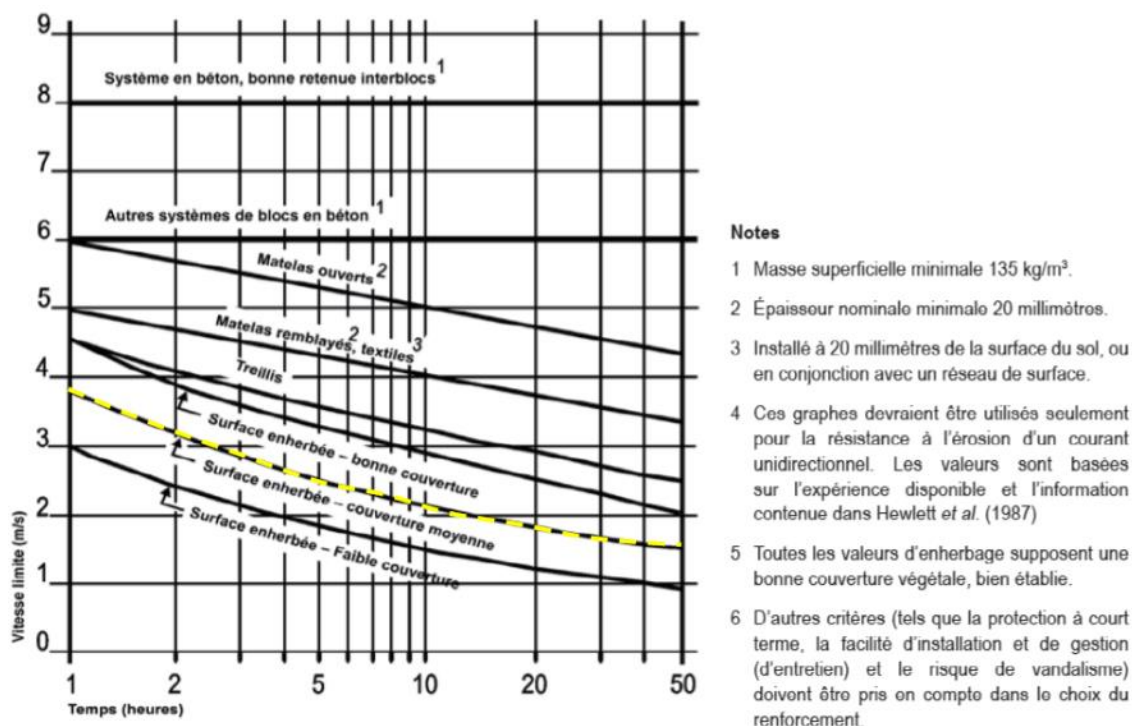


Figure 97 - valeurs limites de dimensionnement de la résistance à l'érosion pour des mesures anti-érosions sélectionnées (source : Hewlett et al. – 1987 [8])

Au vu de ces résultats, il est proposé de retenir la grille de probabilité suivante :

Comparaison sollicitation/résistance	Qualification verbale	Probabilité suggérée Vick (2002)
Point situé en dessous de la courbe « faible couverture »	Initiation de l'érosion du talus très improbable	0,01
Point situé entre les courbes « faible couverture » et « couverture moyenne »	Initiation de l'érosion du talus improbable	0,1
Point situé sur la courbe « couverture moyenne »	Initiation de l'érosion du talus incertaine	0,5
Point situé entre les courbes « couverture moyenne » et « bonne couverture »	Initiation de l'érosion du talus probable	0,9
Point situé au-dessus de la courbe « bonne couverture »	Initiation de l'érosion du talus très probable	0,99

Progression jusqu'à la rupture : P₂

L'analyse de la littérature indique deux mécanismes de formation de brèche par surverse :

- Remblai constitué de sols fin cohésifs ; le mécanisme est celui du « Head-Cut », ou formation progressive à partir du pied aval de marches avec alternance d'érosion par jet impactant et détachement de matériau par blocs ;
- Remblai constitué de sols granulaire à granulométrie fine (sableux) ; érosion répartie sur l'ensemble de l'ouvrage (crête et talus aval).

Pour les digues du Borne, le mécanisme principal concerné est donc le mécanisme 1 présenté ci-dessous.

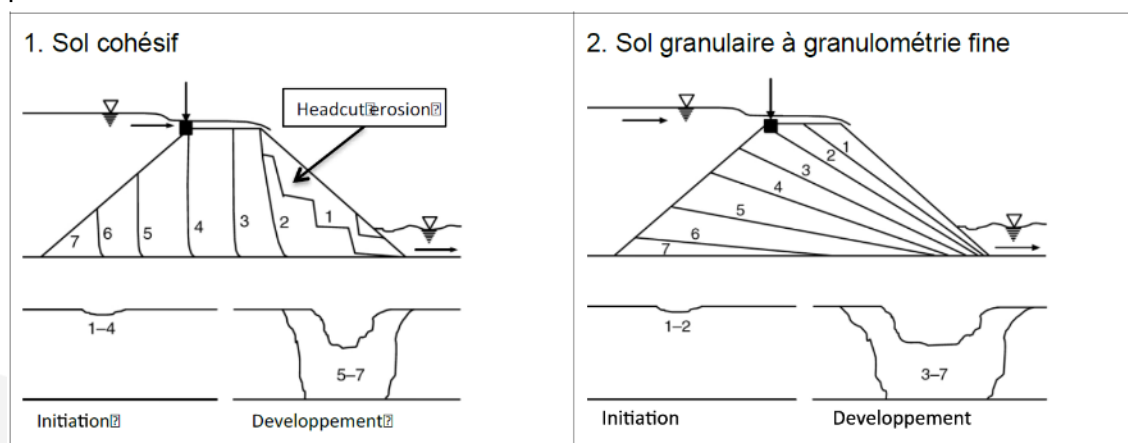


Figure 98 - mécanisme d'érosion par surverse en fonction des matériaux de la digue

Outre la nature des matériaux, la progression de l'érosion par surverse dépend de nombreux paramètres : géométrie de la digue, revêtement de la crête et du talus amont. Il est ici proposé d'adopter une grille de probabilité simplifiée suivante, indépendante de la hauteur de l'ouvrage mais fonction exclusivement de la largeur en crête de la digue.

Largeur en crête	Qualification verbale	Probabilité associé
20	Propagation jusqu'à la rupture très improbable	0,01
10	Probabilité jusqu'à la rupture improbable	0,1
5	Propagation jusqu'à la rupture incertaine (neutre)	0,5
2	Propagation jusqu'à la rupture probable	0,9
1	Propagation jusqu'à la rupture très probable	0,99

Tableau 36 - grille de probabilités conditionnelles pour la progression de l'érosion par surverse jusqu'à la rupture

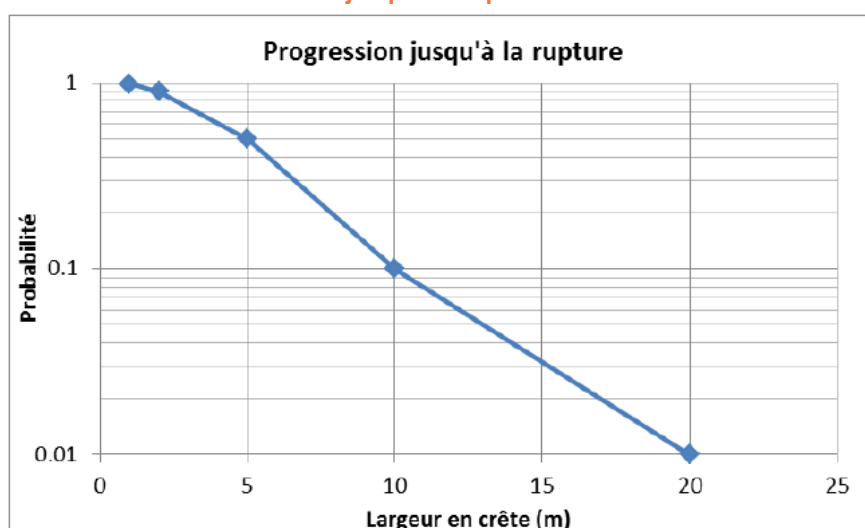


Figure 99 - Largeur en crête et probabilité conditionnelle associée

7.4.4.4 Analyse par tronçon

La cote de submersion projetée, définie lors de l'AVP, correspond à la cote de $Z_{Q_{100}}+0,8$ m (au minimum). Pour une crue de projet Q_{100} il apparaît ainsi qu'aucune zone de submersion n'est présente sur le linéaire en rive gauche de l'Arve.

Les profils en longs des lignes d'eau sont présentés ci-après.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

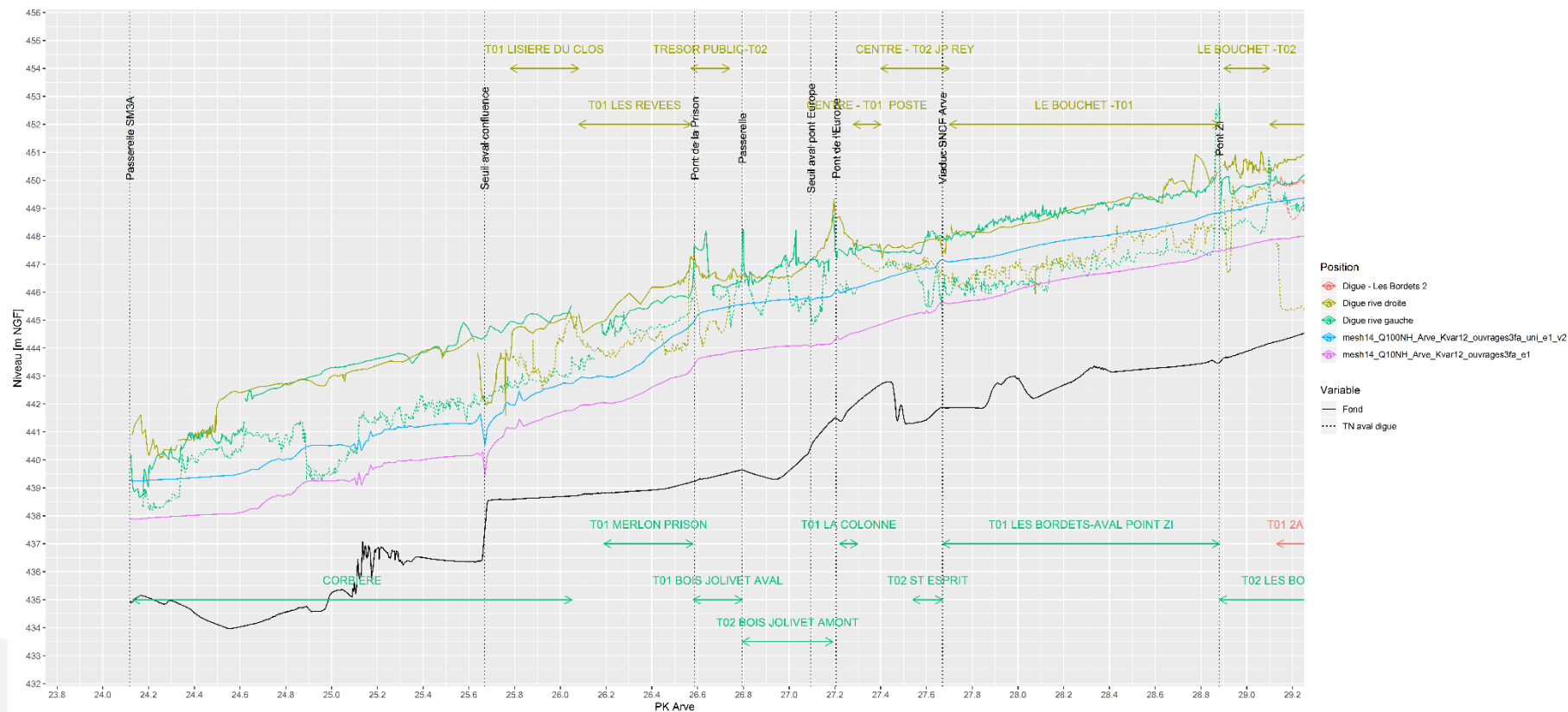


Figure 101 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

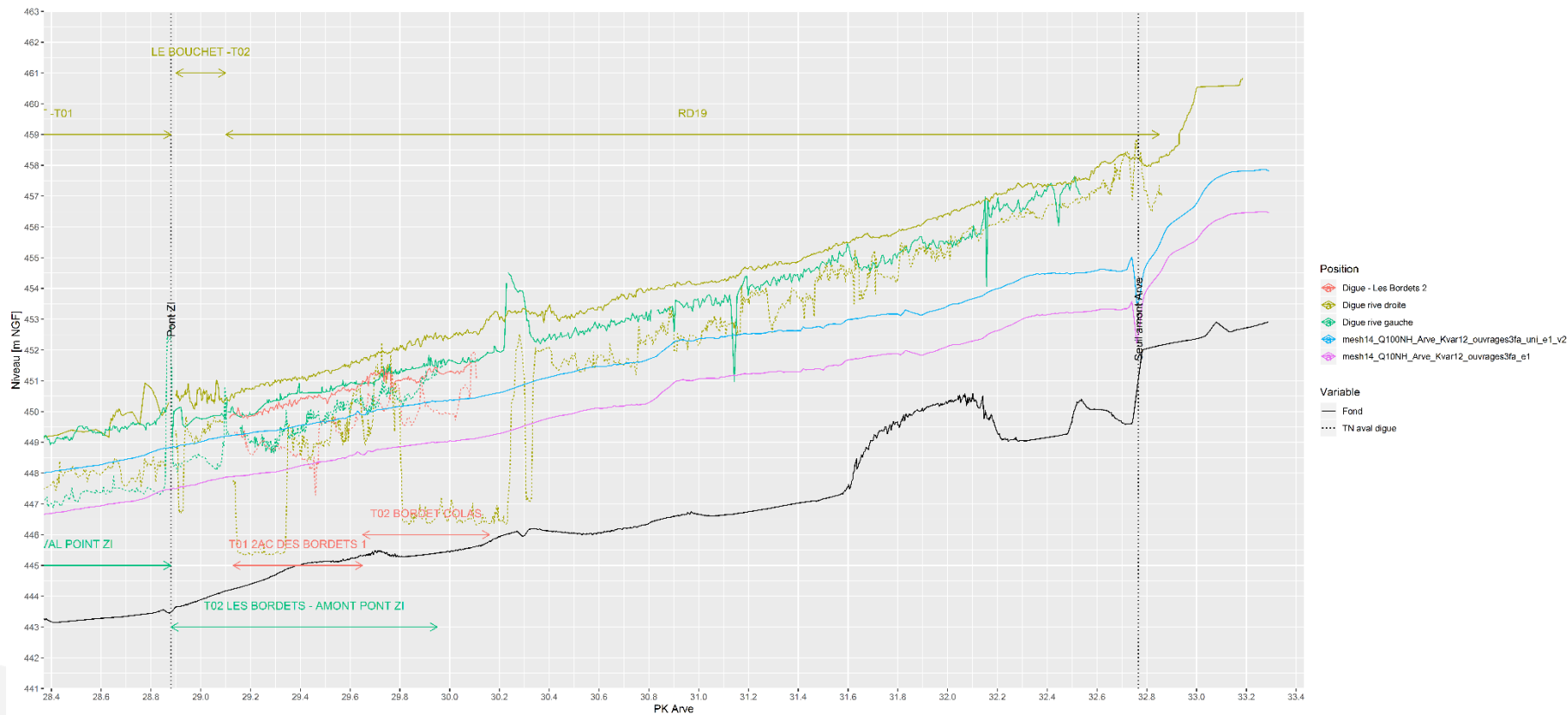


Figure 102 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel

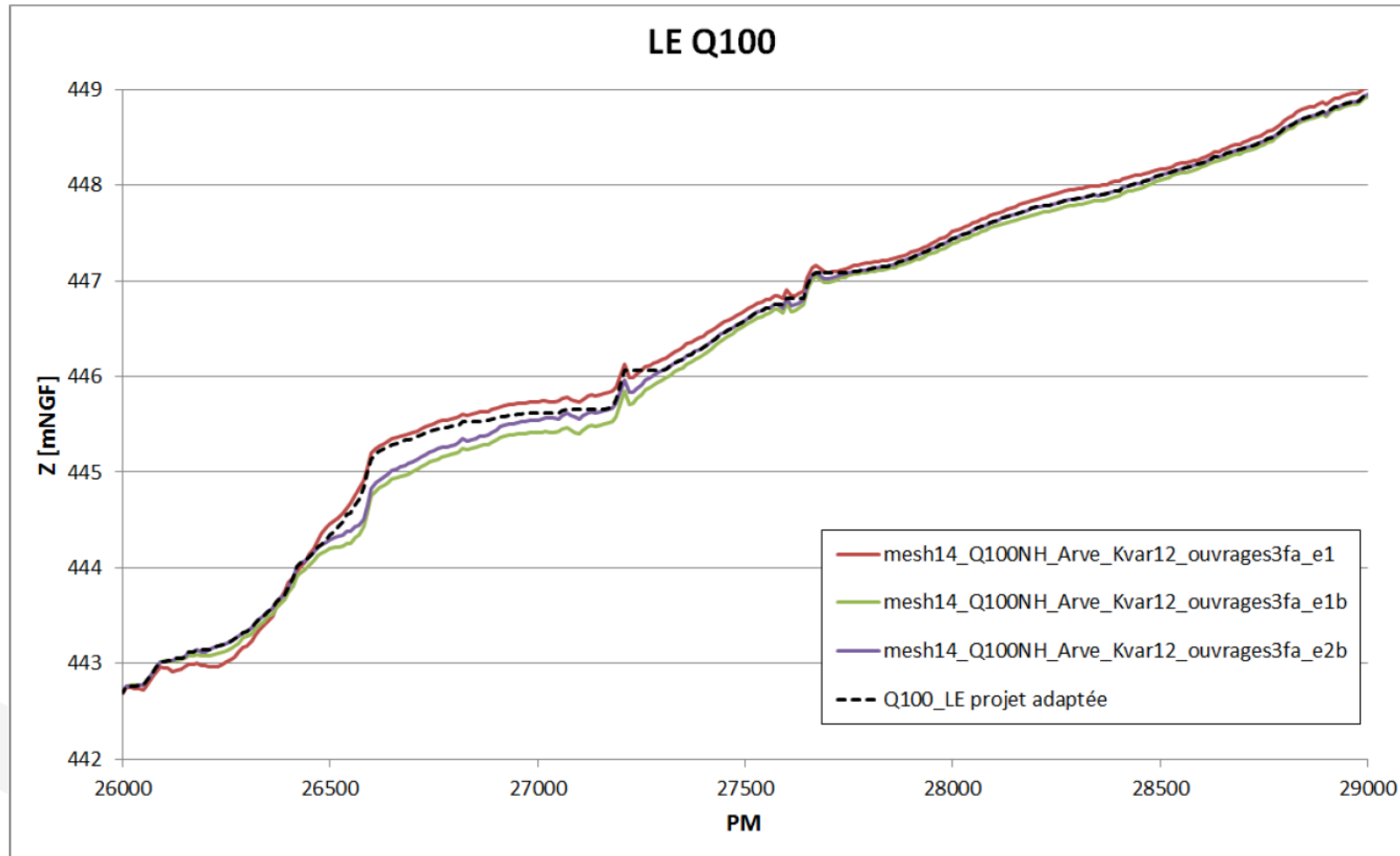


Figure 103 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue)

On obtient donc dans les probabilités suivantes :

Tableau 37 - Probabilité de rupture à la surverse

Tronçon	Occurrence de crue	Revanche – état final	P ₁ Final	P ₁ xP ₂
RG-T1	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T2	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T3	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T4	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T5	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T6	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T7	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T8	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T9	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T10	Q ₁₀₀	0,8	0	0
RG-T11	Q ₁₀₀	1	0	0
RG-T12	Q ₁₀₀	1	0	0
RG-T13	Q ₁₀₀	1	0	0
RG-T14	Q ₁₀₀	1	0	0
RG-T15	Q ₁₀₀	1	0	0
RG-T16	Q ₁₀₀	1	0	0
RG-T17	Q ₁₀₀	1	0	0
RG-T18	Q ₁₀₀	1	0	0

Au regard du risque de surverse, le niveau de protection apparent du système d'endiguement considéré est défini par l'AVP de confortement des digues, et est pris comme $Z_{Q_{100}+0,8}$ m ou $Z_{Q_{100}+1}$ m. Il apparaît ainsi que l'évaluation de la probabilité P2 n'est pas nécessaire pour évaluer la probabilité de rupture par surverse.

7.4.4.5 Rupture par instabilité du talus

7.4.4.5.1 Arbre de défaillance pour l'instabilité au glissement

L'arbre de défaillance suivant est proposé pour l'instabilité au glissement d'une digue en remblai. Il s'agit ici d'évaluer si une instabilité au glissement du talus côté zone protégée peut conduire à une ruine complète de la digue.

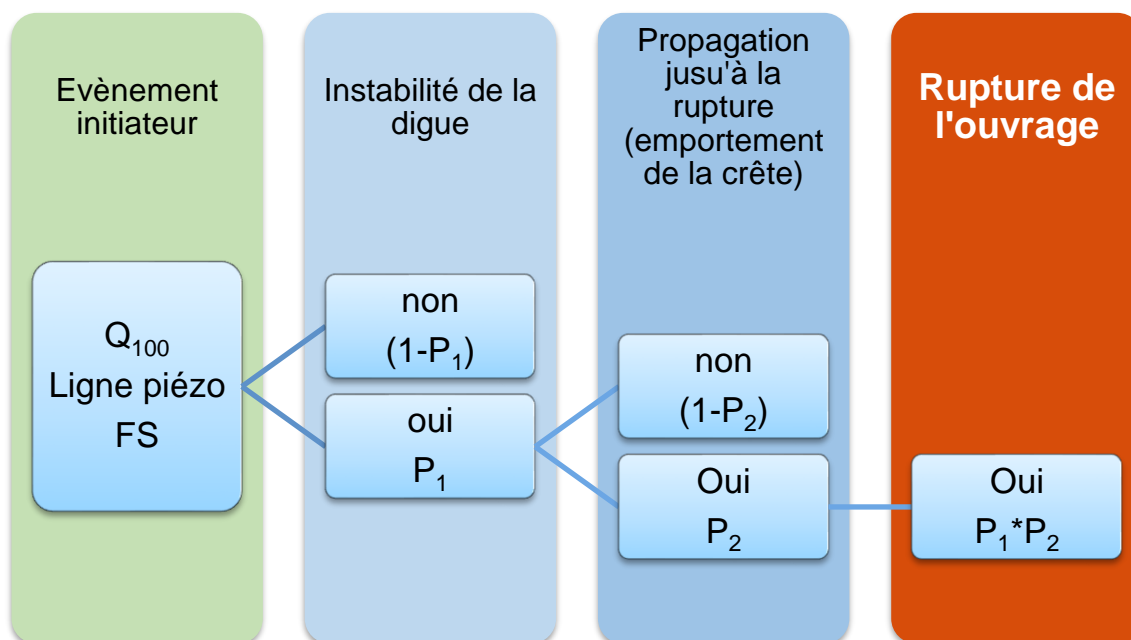


Figure 104 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai)

L'arbre de défaillance suivant est proposé pour l'instabilité au glissement d'une digue en remblai disposant d'un muret en pied de digue. Il s'agit ici de voir si le glissement du talus peut entraîner la rupture du mur en pied de digue et conduire ainsi à la ruine complète de l'ouvrage.

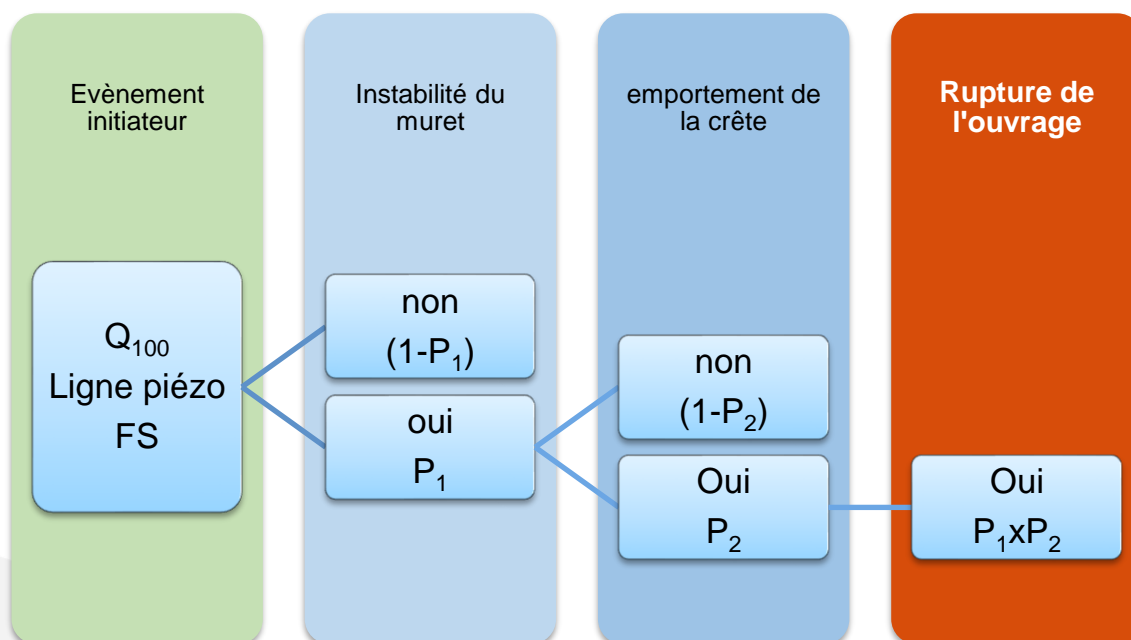


Figure 105 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (mur faisant office de digue)

7.4.4.5.2 Evaluation des probabilités conditionnelles

Talus à considérer

Les instabilités à considérer sur les talus sont :

- Glissement du talus côté zone protégée : le cas le plus critique est atteint lorsque la ligne piézométrique est la plus haute, au voisinage du pic de la crue,
- Glissement du talus côté fleuve : le cas le plus critique est à la décrue lorsque la ligne piézométrique dans le corps de l'ouvrage est la plus haute et alors que :
 - Le niveau d'eau amont n'exerce plus une poussée stabilisante,
 - La cohésion des matériaux est réduite par la saturation,
 - Le poids des terres est augmenté par la saturation,
 - De l'eau est éventuellement piégée coté zone protégée par suite d'une surverse en une défaillance des dispositifs de ressuyage.

Le premier type de glissement est celui qui est potentiellement plus grave en cas de formation de brèche, le niveau d'eau côté fleuve étant plus haut. C'est donc celui qu'on considèrera principalement ici. Nous ne considèrerons pas la stabilité du talus côté Borne à la décrue puisque ce scénario ne peut conduire à des venues d'eau dangereuses en zone protégée.

Caractéristiques mécaniques des matériaux et modélisation géotechnique

La stabilité est fonction de la géométrie du talus, de la largeur de franc-bord, de la géométrie de la berge, des caractéristiques géotechniques des matériaux de la digue et de la fondation, ainsi que des sollicitations hydrauliques.

L'analyse géotechnique est donnée dans le rapport de G2-AVP qui est fourni en annexe 2.5 de la présente étude de dangers. Les calculs de stabilités ont été réalisés à l'aide du logiciel Talren, un logiciel de calcul de stabilité des ouvrages géotechniques.

Probabilité de glissement : P_1

La détermination de la probabilité de glissement consiste à la relier à un facteur de sécurité de stabilité.

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

Figure 106 - Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source: CFBR, 2015 [9])

Les facteurs de sécurité obtenus par l'analyse sans coefficients partiels peuvent être comparés aux facteurs de sécurité ci-dessous, obtenus par multiplication des coefficients partiels et de modèle préconisé par le CFBR. Une probabilité conditionnelle est ensuite affectée à chaque facteur de sécurité afin d'obtenir une probabilité totale de 10^{-4} pour chaque situation.

Situation	Facteur de sécurité	Probabilité de la situation	Probabilité associée au facteur de sécurité
Normale	$F_S=1,50$ (1,25x1,20)	1	10^{-4}
Rare de crue	$F_S=1,44$ (1,20x1,20)	10^{-1}	10^{-3}
Exceptionnelle de crue	$F_S=1,32$ (1,2x1,10)	10^{-2}	10^{-2}
Extrême de crue	$F_S=1,10$ (1,1x1,00)	10^{-3}	10^{-1}

Tableau 38 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après le CFBR (pour $F_S > 1,10$)

Pour les facteurs de sécurité inférieurs, ces probabilités conditionnelles peuvent être étendues par la grille de Vick :

Bilan de l'analyse du phénomène	Facteur de sécurité	Probabilité suggérée	Probabilité associée au facteur de sécurité
Aucune raison de croire qu'un résultat est plus probable qu'un autre	$F_S=1$	0,50	Neutre
Une certaine confiance dans la probabilité d'occurrence mais la probabilité inverse ne peut être écartée	$F_S=0,9$	0,90	Probable
Les conditions physiques connues et/ou les procédés peuvent être décrits et peuvent qualifier l'occurrence avec une entière confiance	$F_S=0,8$	0,99	Très probable

Tableau 39 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après Vick (Pour $F_S < 1,10$)

Vis-à-vis du risque d'instabilité au glissement, il est proposé de retenir la grille de probabilité suivante : en fonction du coefficient de sécurité au glissement calculé :

Facteur de sécurité au glissement	Probabilité de glissement
$F_S=1,5$	10^{-4}
$F_S=1,44$	10^{-3}
$F_S=1,32$	10^{-2}
$F_S=1,1$	10^{-1}
$F_S=1$	0,5
$F_S=0,9$	0,9
$F_S<0,9$	0,99

Tableau 40 - probabilités conditionnelles pour l'instabilité des talus au glissement

Du glissement à la rupture (P2)

Le glissement de talus affecte un volume limité de remblais. La poursuite du phénomène dépend de la largeur L_e de digue emportée par le glissement par rapport à la largeur totale L de la crête. Pour conduire à la rupture, l'entaille dans le talus doit être suffisante pour :

- Soit induire immédiatement la ruine de l'ouvrage en englobant une largeur « suffisante » de crête ;
- Soit réduire significativement sa largeur pour accélérer d'autres mécanismes (notamment par augmentation des gradients hydrauliques).

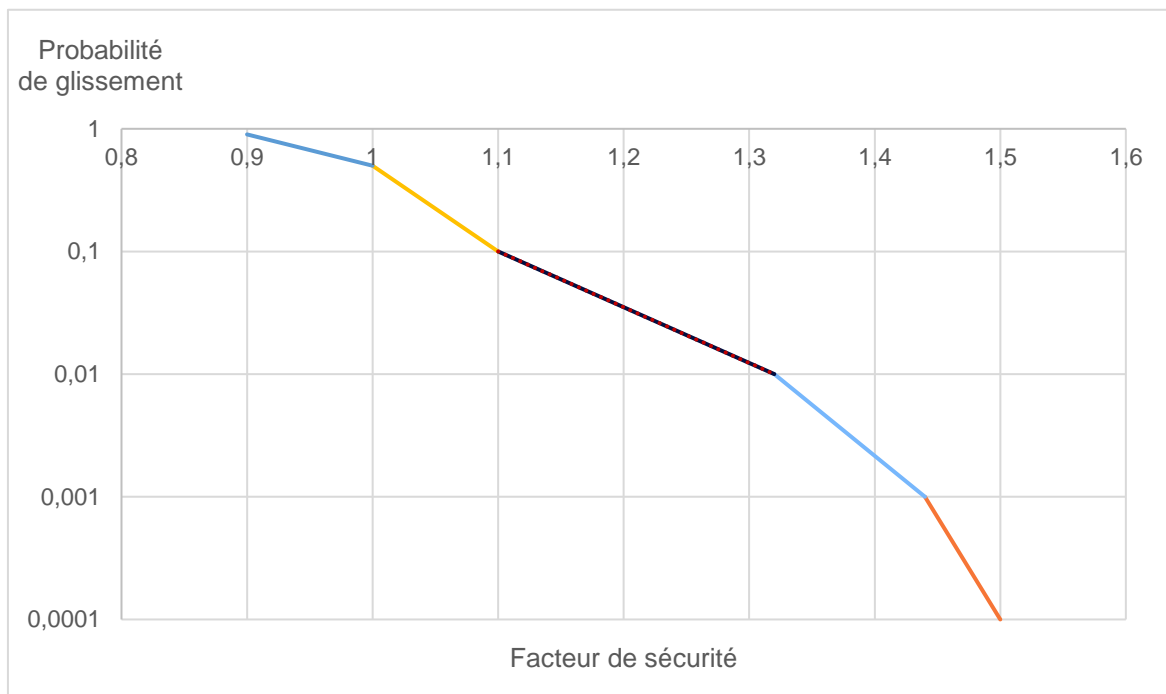
EDF estime qu'au-delà Dun tiers de largeur L de crête emportée par glissement, la rupture est très probable ($P=0,99$). Pour des cercles moins impactant, un nouvel état d'équilibre est atteint et peut perdurer sans rupture.

La grille suivante est proposée.

Longueur de crête emportée L_e	Probabilité de rupture
$L_e \leq 0,05*L$	10^{-2}
$0,05*L < L_e \leq 0,10*L$	10^{-1}
$0,10*L < L_e \leq 0,20*L$	0,5
$0,20*L < L_e \leq 0,30*L$	0,9
$L_e > 0,30*L$	0,99

Tableau 41 - Probabilités conditionnelles pour la propagation du glissement jusqu'à la rupture

Afin de représenter les valeurs de facteurs de sécurité intermédiaire, il est proposé d'effectuer une interpolation linéaire entre ces valeurs. Cela nous donne ainsi les valeurs ci-dessous :



7.4.4.5.3 Analyse par tronçon

Situation finale

Les modèles de stabilité réalisés sur le logiciel Talren dans le cadre de la G2-AVP donnent les facteurs de sécurité que l'on retrouve dans le Tableau 29. En considérant le coefficient de modèle, et en conservant de manière sécuritaire les coefficients partiels sur la cohésion et l'angle de frottement, on obtient les facteurs de sécurité corrigés suivants :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE



Données G2 AVP	Talus amont															Talus aval		
	Niveaux Arves/ surcharges	RD-T2	RD-T2	RD-T6	RD-T7	RG-T4	RG-T5	RG-T5	RG-T9	RG-T10	RG-T11	RG-T14	RG-T15	RG-T15	RG-T17	RG-T17	RG-T18	RG-T5
PK	28.725	28.725	26.6	26.51	28.525	28.125	28.125	27.305	27.26	27.11	26.91	26.825	26.825	26.825	26.825	26.51	28.125	28.125
Q_module	1.164	1.212	1.248	1.26	1.284	1.188	1.212	1.464	1.332	1.32	1.272	1.404	1.308	1.86	1.92	1.272	1.416	1.62
Qmodule+10 kPa RN	1.164	1.212	1.224	1.26	1.248	1.176	1.2	1.464	1.272	1.284	1.272	1.356	1.26	1.8	1.848	1.272	1.368	1.548
Qmodule+30 kPa Transitoire	1.272	1.32	1.344	1.392	1.344	1.32	1.332	1.608	1.332	1.404	1.404	1.452	1.356	1.932	1.956	1.44	1.392	1.5
Qmodule+50kPa Transitoire	1.212	1.248	1.308	1.332	1.284	1.272	1.272	1.536	1.248	1.344	1.356	1.38	1.284	1.824	1.824	1.44	1.26	1.332
Q100 Crue	1.476	1.56	1.476	1.62	1.32	1.464	1.584	1.644	1.632	1.44	1.596	1.26	1.464	2.304	2.532	1.68	1.356	1.56
Limite de surverse	1.884	1.98	1.836	1.812	1.32	1.272	1.248	2.172	2.124	1.836	1.92	1.608	1.968	2.64	3.36	2.028	1.2	1.392
Décru rapide Q100-2m condition défavorable	1.056	1.116	1.056	1.188	0.672	1.08	1.128	1.404	1.212	1.128	1.188	1.068	1.032	1.56	1.8	1.188	-	-
Décru rapide Q100-2m condition plus favorable	1.308	1.368	1.2	1.404	1.2	1.344	1.392	1.548	1.38	1.344	1.368	1.344	1.272	1.872	2.016	1.368	-	-
Moy favorable/ défavorable	1.188	1.248	1.128	1.296	0.936	1.212	1.26	1.476	1.296	1.236	1.284	1.212	1.152	1.716	1.908	1.284	-	-

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE



Caractéristiques		Berge $\varphi' = 36^\circ$ Corps de digue : $\varphi' = 33^\circ$ et $c' = 3$ kPa				Berge $\varphi' = 35^\circ$ Corps de digue : $\varphi' = 33^\circ$ et $c' = 3$ kPa					Berge et corps de digue : $\varphi' = 32^\circ$ et $c' = 1$ kPa		Berge et corps de digue : $\varphi' = 33^\circ$ et $c' = 3$ kPa		Berge $\varphi' = 35^\circ$ Corps de digue : $\varphi' = 33^\circ$ et $c' = 3$ kPa
------------------	--	---	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	---

On constate que pour la crue associée au niveau de protection (Q100), l'ensemble des facteurs de sécurité est supérieur à 1,32, ce qui correspond dans le Tableau 40 à une probabilité inférieure ou égale à 1%.

On constate également que pour une ligne d'eau en limite de surverse, l'ensemble des facteurs de sécurité est supérieur à 1,2, ce qui correspond dans le Tableau 40 à une probabilité inférieure ou égale à 5%.

L'évaluation de l'instabilité à la décrue présente des facteurs de sécurité plus faible, cependant un glissement de digue à la suite d'une décrue n'entraîne pas de venue d'eau dans la zone protégée.

Les murs sur les tronçons RG-T12 et RG-T18 ne soutiennent pas de terre en amont ou en aval. Leur stabilité est donc assurée, à condition de la stabilité des parement amont au droit de ces murs :

- Pour le tronçon RG-T12, on évalue le basculement potentiel du mur de protection côté amont, qui survient à la suite du glissement du parement amont, qui survient lorsque le niveau d'eau côté fleuve est de Z_{Q100} . Le facteur de sécurité est égal à celui du tronçon RG-T14, soit 1,33.
- Pour le tronçon RG-T18, on évalue le basculement potentiel du mur de protection côté amont, qui survient à la suite du glissement du parement amont, qui survient lorsque le niveau d'eau côté fleuve est de Z_{Q100} . Le facteur de sécurité est égal à 1,40.

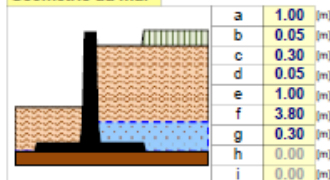
Dans le cadre du tronçon RG-T16 (mur de soutènement) on évalue ci-dessous le basculement potentiel du mur de protection côté aval qui survient lorsque le niveau d'eau coté fleuve est à la cote de Z_{Q100} .

La stabilité du mur est principalement fonction de sa géométrie, ainsi que des caractéristiques mécaniques des matériaux de la digue et des sollicitations hydrauliques. Celles-ci ont été évaluées conformément aux normes d'application nationales de l'Eurocode 7 : NF P 94-281 – Murs de soutènement, et NF P 94-261 – Fondations superficielles.

Titre	Calcul stabilité mur aval Profil RG-T16	Date	5/23/2023
Commentaire		Auteur	RWS
		Affaire N°	20CRA102

HYPOTHESES (MUR BA)	K_a	$[G_{0,1}]$	$[G_{0,2}]$	[DYN]	K'_p	[STA]	[DYN]	EXT	INT
	(Ecran II)	0.27	0.27	0.27	0.41	0.41	0.00	0.00	Bilan

Géométrie du mur



Caractéristiques des matériaux

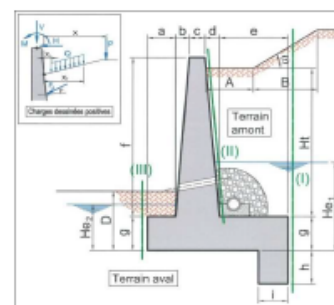
Masses volumiques	ρ_M / ρ_S	2.50	2.40	(T/m^3)
Enrobages	E_M / E_S	0.0	0.0	(cm)
Classes de résistance	f_{td} / f_{te}	25	500	(MPa)
Fissuration armatures				

Hypothèses de calcul

Règlement de calcul	Eurocodes 2&7
Calcul poussée / butée	Caquot - Kérisel
Répartition contraintes	Méthode de Krey
Minoration charge inclinée	Sans objet
Taux sécurité Glissement (S_G)	1.00 1.00
ELUF / ELUA Basculement (S_R)	1.00 1.00

Description du terrain

Hauteur du terrain	H_1	3.30	(m)
Talus incliné	ω	0	(°)
Plateau horizontal	A	5.00	(m)
Replat sur talus	B	0.00	(m)
Masse volumique	γ_1	1.90	(T/m^3)
Angle talus naturel	φ_1	33	(°)
Frottement sol/mur	α	11	(°)
Contrainte ELS	$\sigma_{EL,S}$	1.00	(bar)
Frottement sol/sol	φ_2	32	(°)
Part mobilisée	K'_p / K_p	0	(%)
Fiche du mur	D	1.50	(m)
Arase active	z_i	0.00	(m)
Masse volumique	ρ_2	1.90	(T/m^3)
Angle talus naturel	φ_2	33	(°)
Niveau amont	H_{a1}	1.00	(m)
Niveau aval	H_{a2}	0.00	(m)



Charges

Sur remblai	R1 [Q]	1.00	1.00	4.00
R2 [Q]	0.00	0.00	0.00	
P1 [Q]	0.00	0.00	0.00	
En tête de mur	T1 [Q]	0.00	0.00	0.00
T2 [G _u]	0.00	0.00	0.00	

Séisme (EC8)

Zone de sismicité	Zone	4
Catégorie d'importance	Classe	III
Classe de sol	τ	A

STABILITE EXTERNE

Actions	STA	DYN+
[G ₀]	V 13.76	13.76
[G ₁]	V 0.62	0.00
[Q]	V 0.19	0.00
[E]	V -1.20	-1.20

Glissement (statique)

[EQU] $\frac{1}{1.35} \frac{[G_0] + 1.35[G_1] + 1.35[G_2] + 1.35[E]}{V.tg\phi}$

OK 1.19 > 1

Glissement (sismique)

[STRA] $\frac{[G_0] + [G_1] + [G_2] + [E]}{V.tg\phi}$

OK 1.11 > 1

Basculement (statique)

[EQU] $\frac{1}{1.35} \frac{[G_0] + 1.35[G_1] + 1.35[G_2] + 1.35[E]}{M_{st}}$

OK 1.93 > 1

Basculement (sismique)

[STRA] $\frac{[G_0] + [G_1] + [G_2] + [E]}{M_{st}}$

OK 1.40 > 1

CONTRAINTE - SURFACE COMPRIMEE

Actions	STA	DYN+
[G ₀]	M -2.81	-2.81
[G ₁]	M 3.18	9.87
[Q]	M 1.52	3.01
[E]	M 0.65	0.69

Contrainte (statique)

[STRF] $1.35[G_0]$

OK 0.97 < 1.5

Contrainte (sismique)

[STRA] $[G_0] + [G_1] + [G_2] + [E]$

OK 1.43 < 2

Surface comprimée (ELS)

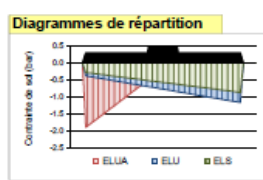
[ELS] $[G_0] + [G_1] + [G_2] + [E]$

OK 100.0 > 15

Surface comprimée (ELU)

[STRA] $[G_0] + [G_1] + [G_2] + [E]$

OK 54.8 > 15



FERRAILLAGE

Actions	STA	DYN+
[G ₀]	M 0.00	0.00
[G ₁]	M 3.32	3.32
[Q]	M 2.98	7.72
[E]	M 0.06	0.07

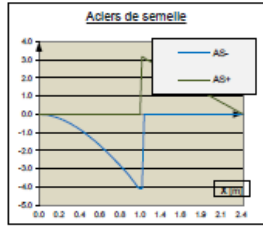
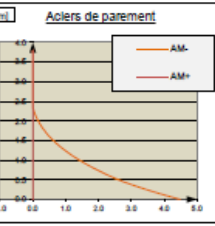
Contraintes béton (MPa)

OK $\sigma_{B,M}$ 3.34 < 15

$\sigma_{B,S}$ 3.05 < 15

Armatures (cm²/ml)

Parement	Fondation
A _{M+}	A _{S+}
A _{M-}	A _{S-}
4.48	0.00
0.00	3.17
3.17	4.11



On considère que l'instabilité des murs entraîne un emportement important de la crête, et donc une rupture de l'ouvrage certaine. On considère donc que la probabilité P₂ est égale à 1. On évalue donc la stabilité au glissement du tronçon RG-T16 comme la stabilité au basculement du mur. Le coefficient de sécurité au basculement du mur est donc de 1,93.

La largeur et les pentes faibles en amont des tronçons RG-T1 et T2 permettent de justifier un non-glissement de la digue.

Les tronçons RG-T19 et RG-T20 sont à la cote du TN aval. Ces deux tronçons ne font pas partie du SE.

Synthèse – Situation finale

Sur la base de l'ensemble de ces critères le tableau ci-après détaille la valeur des probabilités de rupture par instabilité des rehausses (mur en pied aval) pour la crue centennale Q100.

Tronçon	Facteur de sécurité	P1 (%)	P1 x P2(%)
RG-T1	-	0 %	~0 %
RG-T2	-	0 %	~0 %
RG-T3	1,32	1 %	~0 %
RG-T4	1,32	1 %	<1 %
RG-T5	1,464	0,04 %	~0 %
RG-T6	1,464	0,04 %	<1%
RG-T7	1,464	0,04 %	~0 %
RG-T8	1,644	0 %	~0 %
RG-T9	1,644	0 %	~0 %
RG-T10	1,632	0 %	~0 %
RG-T11	1,44	0,1 %	<0,1 %
RG-T12	1,596	0 %	~0 %
RG-T13	1,596	0 %	~0 %
RG-T14	1,596	0 %	~0 %
RG-T15	1,26	3,12 %	<3,12 %
RG-T16	1,93	0 %	~0 %
RG-T17	2,304	0 %	~0 %
RG-T18	1,68	0 %	~0 %

7.4.4.6 Rupture par érosion interne

L'érosion interne est un ensemble de phénomènes complexes ayant comme dénominateur commun le départ de particules entraînées par l'eau circulant dans le milieu. Elle se décompose en une succession de différentes phases pouvant s'interrompre à n'importe quel moment, ce qui aura pour effet de stopper le processus d'érosion. On distingue :

- L'initiation du mécanisme,
- Sa continuation, s'il existe un exutoire non filtré,
- Sa progression lorsque le phénomène s'auto-entretient ou s'auto-accélère sans trouver de configuration stabilisée,
- La rupture de l'ouvrage par développement d'une brèche.

L'érosion interne est souvent caractérisée par le phénomène se trouvant à l'origine de l'initiation. Il en existe quatre :

- L'écoulement concentré, au niveau d'une fissure ou d'une couche de matériaux plus perméables,
- L'érosion régressive : départ de particules au niveau de l'exutoire d'écoulements et en l'absence de filtres,
- La suffusion : le matériau est mal calibré et les particules fines migrent à travers le squelette formé des particules grossières,

- L'érosion de contact : il s'agit d'un problème aux interfaces où les matériaux fins composant une couche sont entraînés au travers de la couche plus grossière. Elle se développe également en présence d'ouvrages traversants

7.4.4.6.1 Suffusion

La suffusion est une instabilité interne d'un sol liée à l'entraînement des particules fines libres à travers les particules grossières d'un sol à granulométrie discontinue et/ou très étalée.

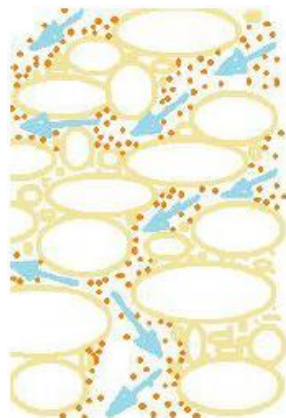


Figure 107 - schéma du phénomène de suffusion

La suffusion n'est pas un mode de rupture : aucune digue n'a rompu par suffusion. Il s'agit d'un mécanisme lent d'instabilité interne d'un sol liée à l'entraînement des particules fines libres à travers les particules grossières d'un sol à granulométrie discontinue. Elle n'apparaît que dans les sols où les fines ne comblent pas les vides des particules granulaires. Toutefois, la suffusion est un phénomène aggravant de l'érosion de contact ou de l'érosion régressive.

D'après le bulletin n°164 du CIGB, sont considérés en pratique comme **non suffusifs** les sols possédants :

- Soit un indice de plasticité supérieur à 7,
- Soit un pourcentage d'argile (passant à 2 μm) supérieur à 10%,
- Soit un pourcentage de fines (passant à 80 μm) supérieur à 40%.

Les sols ne remplissant pas ces critères granulométriques sont considérés comme potentiellement suffusifs.

Le risque d'initiation de la suffusion dans un sol peut être appréhendé plus spécifiquement à partir de critères granulométriques et différents critères :

- **Les critères de stabilité du sol** : critère d'auto-filtration de Terzaghi, critères de Kenney & Lau. Ces critères décrètent la stabilité d'un milieu, par conséquent, et compte tenu de leur caractère conservatif, il est assuré que la stabilité d'un sol vérifiant un de ces critères sera effective. En revanche, si ces critères ne sont pas vérifiés, l'instabilité n'est pas acquise.
- **Les critères d'instabilité** : il s'agit des critères de Burenkova et de Wan & Fell (qui donne une probabilité d'instabilité du sol)

A l'état projet, les matériaux prévus ne présenteront pas de risques de suffusion. Comme mentionné dans le rapport de G2 AVP, dont les conclusions sont reprises au chapitre 7.3.6 de la présente étude, les matériaux choisis lors de la phase PRO respecteront les

critères de Kenney et Lau, et de Wan et Fell. Les travaux privilégieront le réemploi de matériau en place, dont le **potentiel criblage permettra de respecter les critères granulométriques ci-dessus.**

En état intermédiaire, l'EDD CNR établissait la sensibilité à la suffusion de l'ensemble des tronçons de digue en Arve Rive gauche :

Tableau 42 - Synthèse de l'analyse à l'érosion interne de l'EDD CNR 2019

Digue	Suffusion	Contact	Conduit	Erosion régressive		Claquage Hydraulique	Conclusion
				Surface	Conduit		
Bordets T01 et T02	Instable (corps et fondation)	Stable	Potentiellement instable	Stable	Instable localement	Stable	Instable Conduit Suffusion
Bordets2 T01 et T02					Instable localement		
Place T01							
Place T02							
Bois Jolivet A							
Merlon Prison					Stable		
Dessy							
Vorzier T03							
Vorzier T02	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé
Vorzier T01							
Ouches							
Bois Jolivet B	Instable (corps et fondation)	Stable	Potentiellement instable	Stable	Stable	Stable	Instable Conduit Suffusion
Queue du Borne							

En état intermédiaire (avant travaux), les tronçons RG-T1 à RG-T6 sont donc sensibles à la suffusion, ce qui confirme la brèche étudiée dans le chapitre 5.3 de cette présente EDD. Des mesures de gestion de la situation particulière en travaux ont été recommandées par le bureau d'étude agréé au chapitre 9.BIS.

7.4.4.6.2 Erosion de contact

L'érosion de contact est un phénomène induit par le détachement de particules à l'interface entre deux milieux poreux de granulométries très différentes. Ce mécanisme est fortement lié à la discontinuité entre les deux milieux, en termes de granulométrie mais aussi de perméabilité. Elle renvoie ainsi à un problème aux interfaces où les matériaux fins composant une couche sont entraînés au travers de la couche plus grossière. Elle se développe également en présence d'ouvrages traversants.

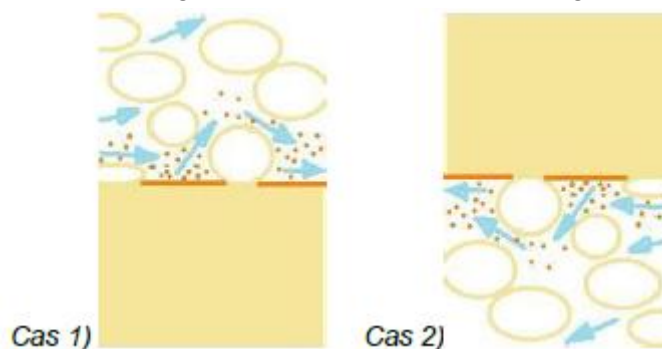


Figure 108 - Schéma du phénomène d'érosion de contact

Cette discontinuité va permettre de remplir les deux conditions nécessaires à l'érosion :

- La condition hydraulique : l'interface possède une perméabilité importante et va être le siège de vitesses d'écoulement élevées, suffisantes pour détacher et entraîner les particules,
- La condition géométrique : les tailles des pores et des constriction du matériau grossier sont assez grandes par rapport à la taille des particules du sol fin transportées pour permettre leur passage sans piégeage.

L'érosion de contact, observée sous les digues alluviales, peut durer des années ou des dizaines d'années sans que des désordres majeurs n'apparaissent.

Cela provient pour partie de la faible vitesse moyenne de migration des particules fines à travers les pores plus grossiers. Cela provient également des effets d'auto-cicatrisation par tassement et effondrement des cavités et colmatage amont par les crues.

L'érosion de contact, tout comme la suffusion, constitue principalement un phénomène d'initiation de l'érosion interne pouvant conduire à une érosion régressive et/ou une érosion de conduit. Ce risque sera considéré comme facteur aggravant dans l'analyse de ces deux phénomènes.

7.4.4.6.3 Erosion de conduit

Phénomène

L'érosion de conduit correspond au détachement de particules de sol à partir d'un chemin préexistant dans le remblai ou la fondation (ouvrages traversant, fissures...) :

Deux conditions sont nécessaires à une rupture par érosion de conduit :

- L'érosion par écoulement concentré ne peut initier son propre conduit, un défaut préexistant au sein de l'ouvrage est un préambule de base à ce phénomène. Il n'est pas forcément débouchant sur les talus amont et aval mais la mise en charge de l'ouvrage peut conduire à une rupture du bouchon ou un déboufrage mettant en eau le conduit. L'initiation requiert ainsi la présence d'un conduit qui peut être :
 - Une interface entre deux couches de matériaux moins bien compactés,
 - Une fissure liée à un tassement différentiel, à la dessiccation, ...
 - Une racine d'arbre,
 - Un terrier d'animal fouisseur.
- Le trou doit « tenir », c'est-à-dire que l'érosion par écoulements concentrés se développe au sein de matériaux cohésifs ou fins (cohésion par capillarité).

L'arbre de défaillance suivant se dessine alors :

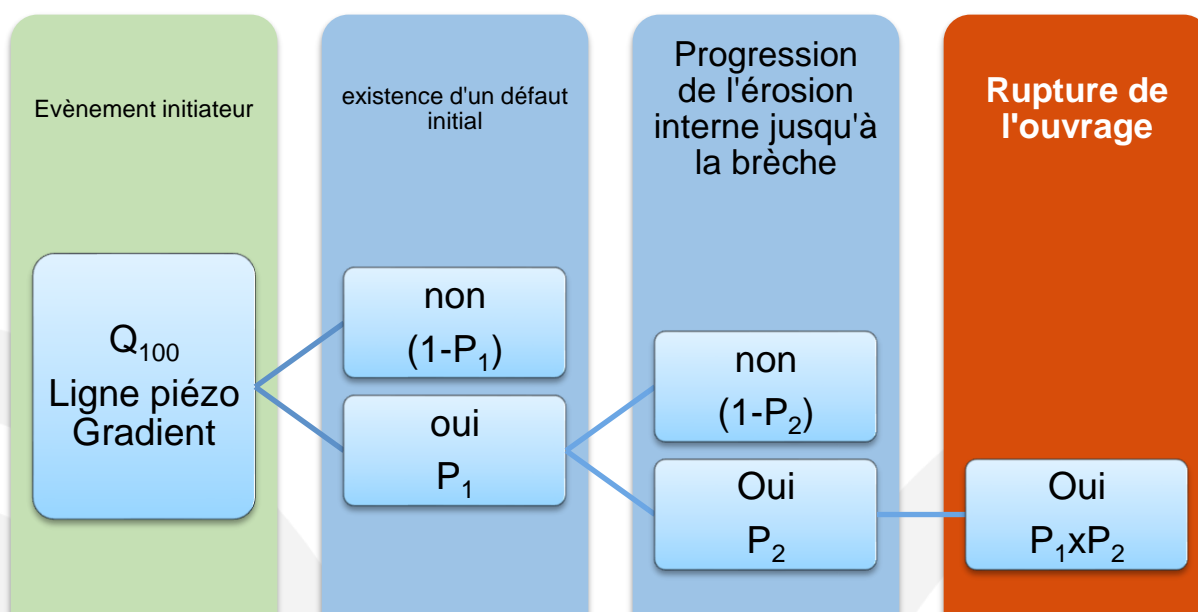


Figure 109 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit

Existence d'un défaut initial (P1)

Au regard du rapport de G2 AVP présenté en annexe de ce rapport, et des observations réalisées lors des visites de terrains, il convient d'affecter à chaque tronçon homogène une probabilité de rencontrer à la fois des matériaux cohésifs dans le corps de digue et des défauts préexistants.

Cette probabilité pourra être estimée à dire d'experts en se basant sur les conventions verbales de Vick [3].

Les observations de terrain serviront également à fixer un ordre de grandeur du diamètre des défauts préexistants. Il est proposé d'adopter les dimensions suivantes en tant qu'ordres de grandeur :

- Diamètre d'un terrier de fouisseur : 8 cm,
- Fissure le long d'un ouvrage traversant : 3 cm,
- Diamètre d'une cavité créée par une racine : 5 cm.

La localisation et la profondeur du défaut au sein de la digue est également un paramètre essentiel. Le défaut initial ne traverse pas forcément l'ouvrage de l'amont vers l'aval mais peut devenir traversant à la faveur d'un claquage hydraulique du bouchon aval. La charge hydraulique amont intervient alors.

Pour les tronçons RG-T1 à RG-T6 en état actuel, la présence de végétation ligneuse peut favoriser le risque d'érosion de conduit par le développement de système racinaires. D'où la réalisation d'un scénario de défaillance sur ce secteur en situation intermédiaire, présenté dans le chapitre 5.3.

Lors de la réalisation des travaux de confortement du système d'endiguement en rive gauche de l'Arve, les réseaux traversants seront enlevés du corps de digue, ou à défaut de pouvoir l'être, seront équipés de clapets anti-retours, et d'écran anti-renard, afin d'empêcher le développement d'érosion de conduit.

	Types de matériaux du corps de digue	Présence d'une coupure étanche	Présence d'arbres	Présence de fousseurs	Présence d'une interface entre couches	Présence d'un ouvrage traversant le remblai	Probabilité de présence d'un conduit (Vick, 2002)
RG-T1	Actuel : sables fins gris noir à galets	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T2	Actuel : sables fins gris noir à galets	Oui	Oui	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T3	Actuel : sables fins gris noir à galets	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T4	Actuel : sables fins gris noir à galets	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T5	Actuel : sables fins gris noir à galets	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T6	Actuel : sables fins gris noir à galets	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T7	-	Non	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01

	Types de matériaux du corps de digue	Présence d'une coupure étanche	Présence d'arbres	Présence de fousseurs	Présence d'une interface entre couches	Présence d'un ouvrage traversant le remblai	Probabilité de présence d'un conduit (Vick, 2002)
RG-T8	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T9	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T10	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T11	-	Non	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T12	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T13	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T14	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01

	Types de matériaux du corps de digue	Présence d'une coupure étanche	Présence d'arbres	Présence de fousseurs	Présence d'une interface entre couches	Présence d'un ouvrage traversant le remblai	Probabilité de présence d'un conduit (Vick, 2002)
RG-T15	-	Non	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T16	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T17	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01
RG-T18	-	Oui	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01

Figure 110 - Synthèse des facteurs aggravants vis à vis de l'érosion de conduit

Progression de l'érosion jusqu'à la brèche (P2)

Sur les tronçons RG-T8, RG-T9, RG-T12, RG-T13, RG-T14, RG-T16, RG-T17 et RG-T18, la mise en place d'un muret étanche sur le parement amont permet d'empêcher la formation de débouché de conduit aval, et ainsi limiter la formation de conduits entre le parement amont et le parement aval. La progression de l'érosion jusqu'à la brèche est donc considérée comme **très improbable (P=0,01)** sur ces tronçons.

Sur le tronçon RG-T10, la paroi berlinoise ne constitue pas une paroi étanche aux écoulements en fondation. Cependant, la présence du mur des habitations en aval ne permet pas la formation de conduits entre l'amont et l'aval. La progression de l'érosion jusqu'à la brèche est donc considérée comme **très improbable (P=0,01)** sur ce tronçon. De plus, au droit de ce tronçon, la ligne Q100 + revanche est en dessous du terrain naturel.

Pour les tronçons RG-T1 à RG-T7, RG-T11, RG-T15 le risque de progression de l'érosion jusqu'à la brèche est plus important car le développement de conduits est possible entre l'amont et l'aval. La progression est donc jugée comme **probable (P=0,9)**.

Synthèse

Sur la base de l'ensemble de ces critères, le tableau ci-après détaille la valeur des probabilités de rupture par érosion de conduit pour la crue de projet Q₁₀₀

Tronçon	P1	P2	P1xP2 (%) Final
RG-T1	0,01	0,9	0,9 %
RG-T2	0,01	0,9	0,9 %
RG-T3	0,01	0,9	0,9 %
RG-T4	0,01	0,9	0,9 %
RG-T5	0,01	0,9	0,9 %
RG-T6	0,01	0,9	0,9 %
RG-T7	0,01	0,9	0,9%
RG-T8	0,01	0,01	0,01%
RG-T9	0,01	0,01	0,01%
RG-T10	0,01	0,01	0,01%
RG-T11	0,01	0,9	0,9%
RG-T12	0,01	0,01	0,01%
RG-T13	0,01	0,01	0,01%
RG-T14	0,01	0,01	0,01%
RG-T15	0,01	0,9	0,9%
RG-T16	0,01	0,01	0,01%
RG-T17	0,01	0,01	0,01%
RG-T18	0,01	0,01	0,01%
RG-T19	-	-	-
RG-T20	-	-	-

Figure 111 - Probabilités de défaillance par érosion de conduit des tronçons

7.4.4.6.4 Erosion régressive

Arbre de défaillance

L'érosion interne régressive est un mécanisme d'entraînement des particules du sol vers un débouché aval, formant un conduit qui progresse vers l'amont (départ de particules sous l'effet d'un gradient hydraulique).

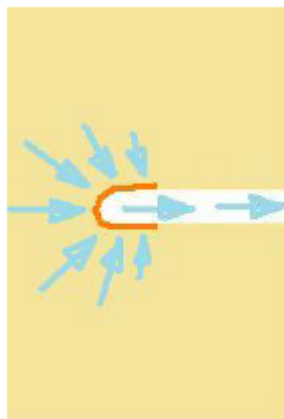


Figure 112 - Schéma du phénomène d'érosion régressive

L'érosion régressive ne peut pas affecter les sols cohésifs. Dans les sols non cohésifs, et si les écoulements débouchent en surface, le phénomène d'initiation s'amorce. Cependant, même dans les sols non-cohésifs, même si l'initiation est certaine, la progression ne l'est pas : le sol mis en bouillasse n'est pas nécessairement évacué, le conduit peut se stabiliser, ou le gradient ne se maintient pas sur toute la longueur du conduit.

Ce mécanisme concerne donc principalement les sols pulvérulents à l'interface avec des parois cohérentes (couche sous-jacente cohérente ou bien ouvrage traversant).

L'étude de danger rédigée par CNR met en évidence que les digues existantes ne présentent pas de risque à l'érosion régressive (cf. chapitre 7.1.3.7 de l'EDD CNR, 2019), par la nature des matériaux constituant les digues, et/ou par l'absence de débouché en aval.

De plus, les profils présentés en annexe de la G2 AVP, réalisée par CNR en décembre 2022 et présentée en annexe de la présente étude, mettent en évidence l'absence de débouché de la ligne d'eau sur le parement aval dans les modèles Talren, notamment dans les cas d'analyse à la limite de la surverse.

On peut donc considérer que l'initiation de l'érosion régressive sur l'ensemble des tronçons est nulle (P=0), pour les crues à la Q100+revanche ainsi qu'à la Q400.

7.4.4.7 Rupture par érosion externe

7.4.4.7.1 Mécanisme d'érosion externe

Les différents mécanismes d'érosion externe sont présentés ci-dessous

Affouillement par battillage

L'analyse des vents à la commune de Bonneville montre que les vents sont passablement forts (entre 7 et 8m/s au maximum). Cependant les effets des vents principaux observés restent limités au vu de la configuration de l'Arve au droit de la digue étudiée. L'orientation principalement Sud-Est/Nord-Ouest et Est/Ouest de l'Arve ne permet pas un Fetch suffisant vis-à-vis des vents importants, provenant principalement du Sud, et du Sud-Est.

⇒ **Mode de rupture ne concernant pas la digue en RG de l'Arve.**

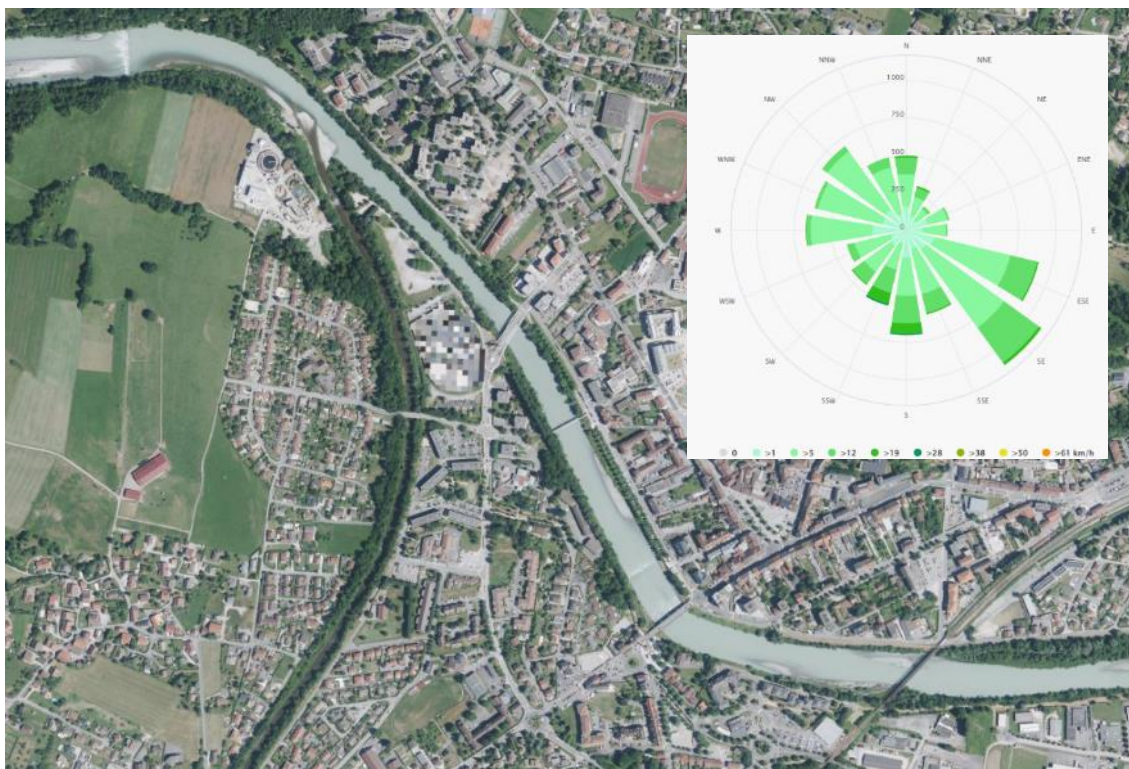


Figure 113 - Rose des vents à Bonneville (Source : Meteoblue)

Erosion sous l'effet du courant

L'érosion sous l'effet du courant concerne l'érosion du talus côté Arve de la digue, ou le sapement de la digue par érosion de la risberme sur les tronçons concernés.

Le Tableau 30 met en évidence les vitesses maximales en pied de digue de l'Arve en rive gauche (Ces valeurs sont issues de la note de calcul hydraulique rédigée par CNR en 2021).

On constate que pour chacun des tronçons les vitesses évoluent entre 1,8 et 4,5 m/s.

Instabilité des berges

Le dernier mécanisme d'érosion externe concernerait une instabilité au glissement de la berge qui engendrerait un sapement du pied du talus côté Arve des digues et conduirait à une brèche.

Au pic de la crue, le poids de l'eau exerce un rôle stabilisateur sur les talus côté amont. L'instabilité des berges est donc la plus critique à la décrue lorsque le talus est encore saturé et la ligne d'eau de l'Arve redescend. Cette situation est cependant favorable d'un point de vue mode de défaillance puisqu'elle ne peut pas conduire à des venues d'eau dangereuses en zone protégée.

Le scénario envisageable serait l'occurrence de deux crues de projet successives : la première crue engendrerait une instabilité de la berge et une déstabilisation du talus côté Borne. Ce scénario est considéré comme pratiquement impossible, et ne sera donc pas considéré.

7.4.4.7.2 Arbres de défaillance

L'arbre de défaillance suivant est proposé pour le mode de défaillance « érosion externe par écoulement tangentiel ». On rappelle qu'on entend ici par érosion externe, indifféremment l'érosion du talus côté Arve de la digue ou bien le sapement de la digue par érosion de la risberme.

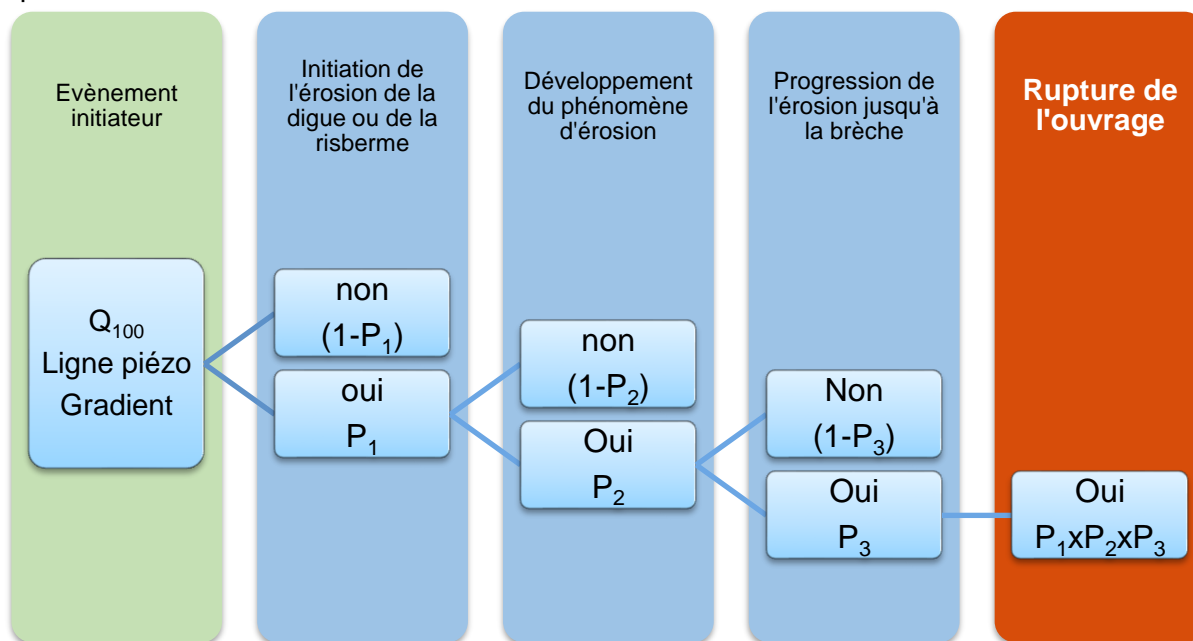


Figure 114 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe

7.4.4.7.3 Evaluation des probabilités conditionnelles

Initiation de l'érosion externe (P1)

L'appréciation de la probabilité d'initiation relève d'une comparaison entre :

- La sollicitation : Vitesse d'écoulement, force tractrice ;
- La résistance : Protection de talus et de la berge, présence de végétation, etc.

L'initiation de l'érosion externe (P1) correspond aux premiers départs de matériaux sous la force de l'écoulement.

Définition de la sollicitation

La contrainte tractrice d'un écoulement sur un talus de pente d'angle β avec l'horizontale s'écrit :

$$\tau_b = \sqrt{1 - \frac{\sin(\beta)^2}{\sin(\varphi)^2}} * \tau_0$$

Avec :

- φ Angle de frottement du sol (°) ;
- $\tau_0 = \gamma_w * R_h * i$ la contrainte tractrice sur fond plat où :
 - γ_w Le poids volumique de l'eau ;
 - R_h Rayon hydraulique ;
 - i La pente du cours d'eau.

Définition de la résistance

La résistance d'un talus ou d'une berge se caractérise principalement par la nature du sol (fonction du D_{50} et de la cohésion) mais également du revêtement de ce dernier.

Les tronçons étudiés, présentent tous un talus enherbés côté cours d'eau. Le tableau ci-après, issu du Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales (B. Lachat), donne les valeurs de résistance à l'arrachement de différents matériaux et techniques de confortement de berge.

Matériaux et techniques	τ (N/m ²)
Sable fin ($\leq 0,2$ mm)	2
Petit gravier (< 2 cm)	12
Gazon quelconque, longtemps immergé	15-18
Gazon préfabriqué	25-30
Gazon quelconque, peu immergé	25-50
Petits galets	40-60
Fascine de roseaux	50
Saules, 1-2 ans	50-70
Gazon jeune, bonne qualité	60-80
Saules, > 2 ans	100-140
Herbacées sur *géotextile tissé	120
Pavé-gazon	160
Tressage de saule, pieux battus	180
Enrochement	200
Pieux dans enrochement en vrac	250
Fascine de saule (pieux battus)	250
Couche de branches à rejet	300
Boutures interstitielles	350
Saules, 20 ans	800

Figure 115 - Valeurs de résistance à la contrainte d'arrachement de différents matériaux et techniques en cours d'eau (Source : B. Lachat)

On retrouve également des valeurs de résistance dans le guide Génie'Alp en 2013 relatif au génie végétal en rivière de montagne.

Tab. 1 - Contraintes tractrices calculées pour des crues données pour diverses techniques de génie végétal.

Technique	Contrainte tractrice [N/m ²]		
	À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
Enherbement	4 ⁽³⁾ -20 ⁽³⁾	25-30 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾ -100 ⁽²⁾
Boutures	10 ⁽³⁾	60 ⁽³⁾ -150 ⁽¹⁾	60 ⁽³⁾ -165 ⁽¹⁾
Boudin d'hélophytes	10 ⁽³⁾ -30 ⁽²⁾	20-30 ⁽³⁾	50 ⁽³⁾ -60 ⁽¹⁾
Clayonnages	10 ^(2,3)	10-15 ⁽³⁾	10 ⁽³⁾ -120 ⁽¹⁾
Fascinés	20 ⁽³⁾ -60 ⁽²⁾	50 ⁽³⁾ -60 ⁽³⁾	80 ⁽²⁾ -250 ⁽⁴⁾
Saules		50-70 ⁽⁴⁾	100-140 ⁽⁴⁾ 800 (20 ans) ⁽⁴⁾
Plantation d'arbre	20 ⁽²⁾		120 ⁽²⁾
Lit de plants et plançons	20 ^(2,3)	120 ⁽³⁾	140 ^(2,3)
Couche de branches à rejet	50 ^(2,3) -150 ⁽³⁾	150 ⁽³⁾ -300 ⁽³⁾	300 ^(2,3) -450 ⁽³⁾
Caissons végétalisés	500 ⁽³⁾	600 ⁽³⁾	600 ⁽³⁾
Enrochements	Végétalisés	100 ⁽³⁾ -200 ⁽²⁾	100 ⁽³⁾ -300 ⁽³⁾
	Nus	250 ⁽²⁾	250 ⁽²⁾

1 : Faber 2004 ; 2 : Schiechl et Stern 1996 ; 3 : Venti et al. 2003 ; 4 : Lachat 1994.

Figure 116 – Contraintes tractrices limites en fonction du matériau- Guide Génie'Alp 2013

Sur l'ensemble des digues en partie haute il est prévu la mise en place de lits de plants et plançons. Les valeurs de résistance conservées correspondent aux résistances à 1 ou 2 ans après dans le tableau extrait du guide Génie'Alp, à savoir **120Pa**.

Les matériaux des digues projetées, sur les tronçons où des épis en enrochements ont été prévus, ont été dimensionnés dans le rapport de G2 AVP, sur la base des vitesses maximale en crue de projet sur chaque tronçon homogène, afin de se prémunir du phénomène d'érosion externe.

Pour les tronçons disposant d'enrochements en pied de berge en RG de l'Arve, les dimensions des enrochements des épis et des pieds de digue ont été dimensionnés par la formule d'Isbach, pour la vitesse maximale sur l'ensemble des tronçons. Ainsi les tronçons présentant des vitesses maximales inférieure auront des enrochements dimensionnés de manière sécuritaire. On retrouve le dimensionnement de ces enrochements au 7.3.2 du présent rapport, notamment au Tableau 30.

On retrouve pour les différents tronçons les données de vitesses maximales en pied de berge et de blocométrie suivantes pour les épis et pour les bèches de stabilisation en état projet :

Tronçons	$V_{max,Q100}$ (m/s)	Type d'enrochements (kg)
RG-T1	-	-
RG-T2	-	-
RG-T3	-	-
RG-T4	-	-
RG-T5	2,4	60/300
RG-T6	-	-
RG-T7	1,8	60/300
RG-T8	2,1	60/300
RG-T9	2,5	60/300
RG-T10	2,0	60/300
RG-T11	2,3	60/300
RG-T12	2,6	60/300
RG-T13	2,6	60/300
RG-T14	2,2	60/300
RG-T15	-	
RG-T16	-	
RG-T17	-	
RG-T18	4,5	300/1000

A noter que la présence de végétation est ici considérée comme un facteur influant sur la propagation de l'érosion et non un facteur d'initiation.

Les enrochements ont été dimensionnés afin de résister aux vitesses dans la modélisation. De plus, ces derniers ne sont présents qu'en pied de berge, et non sur les parements amont des digues. Le calcul de résistance et de comparaison avec la sollicitation de l'écoulement est réalisé sur les parements amont des digues à l'état projet, et sur les zones le plus fragiles à l'état actuel.

Afin de vérifier de la résistance, et d'établir la probabilité de d'initiation de l'érosion, nous comparons les valeurs de contrainte effective et admissible en se basant sur la grille de probabilité suivante :

Tableau 43 - Grille de probabilité pour l'initiation de l'érosion externe

Ratio $\tau_{\max}/\tau_{\text{admissible}}$	Probabilité de rupture
0	0
0,6	0,01
0,8	0,1
1,2	0,5
1,4	0,9

Les valeurs de contraintes maximales en berge sont déterminées sur chaque tronçon en prenant la valeur maximale de contrainte sur l'ensemble du tronçon.

Des interpolations ont été faites entre les valeurs de ce tableau pour éviter les effets de seuil. Le tableau suivant récapitule les données obtenues pour l'analyse de chacun des tronçons :

Tronçons	T _{max} en berge	T _{admissible}	Rapport	P1 final
RG-T1	51.00	62.61	0.81	0.11
RG-T2	41.11	62.61	0.66	0.04
RG-T3	49.32	119.43	0.41	0.01
RG-T4	49.17	62.61	0.79	0.09
RG-T5	45.81	62.61	0.73	0.07
RG-T6	53.00	62.61	0.85	0.15
RG-T7	45.44	62.61	0.73	0.07
RG-T8	48.42	62.61	0.77	0.09
RG-T9	52.52	97.45	0.54	0.01
RG-T10	56.44	62.61	0.90	0.20
RG-T11	52.14	62.61	0.83	0.13
RG-T12	46.17	78.58	0.59	0.01
RG-T13	40.29	78.58	0.51	0.01
RG-T14	40.50	78.58	0.52	0.01
RG-T15	42.41	44.72	0.95	0.25
RG-T16	42.25	44.72	0.94	0.24
RG-T17	54.36	44.72	1.22	0.53
RG-T18	73.55	78.58	0.94	0.24

(*) Les situations intermédiaires sont présentées à titre indicatif.

Développement du phénomène d'érosion (P2)

L'analyse du développement du phénomène de l'érosion externe sera effectuée en étudiant à la fois les facteurs favorables (qui contribuent à la diminution du risque) et défavorables (qui contribuent à l'augmentation du risque) mais aussi aux retours d'expériences connus.

- **Géométrie de la digue** : La géométrie de la digue est un critère important quant à la progression de l'érosion externe. Une digue suffisamment volumineuse (largeur de crête importante et talus peu raides) n'aura que peu de chance de propager l'érosion externe ;
- **Protection anti-érosion** : La présence d'une protection anti-érosion (type gabions, enrochements ou fascines végétales) réduit le risque d'érosion externe ;
- **Franc-bord de berge** : Le franc-bord peut contribuer à protéger le pied de la digue de l'affouillement, sous réserve qu'il ne soit pas remobilisé lors de la crue. On observe que les forces tractrices en présence sont susceptibles de remobiliser des sédiments fins enherbés, voire des sédiments moyens à grossiers. La question est alors de savoir la largeur d'érosion éventuelle lors

d'une crue. La présence d'un franc bord est donc considérée comme un facteur plutôt favorable, sans être une protection en tant que telle.

- **Ouvrages singuliers** : Des ouvrages singuliers, sur le talus de digue ou en berge, peuvent créer des perturbations augmentant localement le champ de vitesse. C'est un facteur défavorable.
- **Végétation côté Borne** : La présence de végétation en pied de parement amont ou sur la berge peut accélérer le processus d'érosion externe localement, notamment la présence de tronc/arbre isolé de diamètre important. On distingue cependant :
 - Les aspects favorables : augmentation de la résistance liée à l'enracinement, réduction des vitesses par effet de peigne ...
 - Les aspects défavorables : source de perturbations locales, encoches d'érosion en cas d'arrachement du fait de la pression dynamique, du vent...

La présence ou non d'arbres penchés en direction de la rivière est à considérer en notant que d'après nos observations de terrain, il n'y a généralement pas de gros arbres penchés sur le talus de la digue côté Borne mais de tels individus sont observables sur la risberme et la berge. La description des tronçons est donnée au chapitre 5.2 présent rapport.

- **Durée de la crue** : Une crue longue sollicitera d'avantage les talus des digues par rapport à une crue courte, favorisant la propagation de l'érosion externe.

L'analyse des tronçons est présentée dans le tableau ci-après.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
 Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE



Tronçon	Géométrie de la digue	Protection anti-érosion	Franc-bord de berge	Ouvrages singuliers	Végétation côté amont	Durée moyenne de mise en charge du talus	Probabilité de développement de l'érosion externe (Vick)
RG-T1	Largeur crête : 4 m Pente talus amont : 2H/1V <i>Neutre</i>	Non <i>Neutre</i>	Oui : environ 20m <i>Très favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Très improbable 0,01
RG-T2	Largeur crête : 4 m Pente talus amont : 2,0H/1V Largeur de digue >15m <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Oui <i>Défavorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T3	Largeur crête : 4 m Pente talus amont : entre 2,0H/1V et 3,7H/1V <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T4	Largeur crête : 4 m Pente talus amont : entre 2,0H/1V et 3,7H/1V <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T5	Largeur crête : 3 m Pente talus amont : 2H/1V <i>Neutre</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T6	Largeur crête : 4 m Pente talus amont : entre 2,0H/1V et 3,7H/1V <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T7	Largeur crête : 4 m Pente talus amont : 2H/1V <i>Neutre</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T8	Crête formée par un muret Pente talus amont : 3H/2V <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1

Tronçon	Géométrie de la digue	Protection anti-érosion	Franc-bord de berge	Ouvrages singuliers	Végétation côté amont	Durée moyenne de mise en charge du talus	Probabilité de développement de l'érosion externe (Vick)
RG-T9	Largeur crête : 2 m+mur Pente talus amont : entre 2H/1V et 4,3H1/V <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T10	Largeur crête : 2 m+mur Pente talus amont : 2H/1V <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T11	Largeur crête : 4 m Pente talus amont : 2H/1V <i>Neutre</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Oui ouvrage de rejet pluvial <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Neutre 0,5
RG-T12	Largeur crête : 2 m + muret Pente talus amont : 2,2H/1V <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T13	Largeur crête : 2 m + muret Pente talus amont : 2,2H/1V <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T14	Largeur crête : 2 m + muret Pente talus amont : 2,2H/1V <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T15	Largeur crête : 7,5 m Pente talus amont : conservation des pentes naturelles, largeur >4m <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T16	Largeur crête : 3 m+muret Pente talus amont : 2H/1V Risberme <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Oui : environ 4m <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1

Tronçon	Géométrie de la digue	Protection anti-érosion	Franc-bord de berge	Ouvrages singuliers	Végétation côté amont	Durée moyenne de mise en charge du talus	Probabilité de développement de l'érosion externe (Vick)
RG-T17	Largeur crête : 7,5 m Pente talus amont : conservation des pentes naturelles, largeur >4m <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1
RG-T18	Crête : mur digue Pente talus amont : 2,2H/1V <i>Favorable</i>	Non <i>Neutre</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	~1 jour <i>Favorable</i>	Improbable 0,1

Figure 117 - Synthèse des facteurs aggravant vis-à-vis de l'érosion externe

Progression jusqu'à la brèche (P3)

Une rupture par érosion externe/affouillement ne conduit pas forcément à une venue d'eau dangereuse.

Le confortement par l'aval par la mise en place du muret béton des tronçons RG-T8, RG-T12 à T14, RG-T16 et RG-T18, la présence d'un mur en aval des tronçon RG-T9 et RG-T10 ainsi que l'arasement de la berge et l'adoucissement des pentes de berges sur les tronçons RG-T19 et T20, et dans un cas plus général le bon respect des règles de l'art pour la réalisation des digues permet de considérer la probabilité de progression de l'érosion externe jusqu'à la brèche comme **improbable (P=0,1)**.

7.4.4.7.4 Analyse par tronçon

Sur la base des analyses réalisées ci-dessus, on retrouve les probabilités conditionnelles à l'érosion externe suivantes :

Tronçon	P1	P2	P3	P1xP2 xP3 (%) Final
RG-T1	0.11	0,01	0,9	0.11%
RG-T2	0.04	0,1	0,1	0.04%
RG-T3	0.01	0,1	0,1	0.01%
RG-T4	0.09	0,1	0,1	0.09%
RG-T5	0.07	0,1	0,1	0.07%
RG-T6	0.15	0,1	0,1	0.15%
RG-T7	0.07	0,1	0,1	0.07%
RG-T8	0.09	0,1	0,1	0.09%
RG-T9	0.01	0,1	0,1	0.00%
RG-T10	0.20	0,1	0,1	0.00%
RG-T11	0.13	0,5	0,1	0.65%
RG-T12	0.01	0,1	0,1	0.01%
RG-T13	0.01	0,1	0,1	0.01%
RG-T14	0.01	0,1	0,1	0.01%
RG-T15	0.25	0,1	0,1	0.25%
RG-T16	0.24	0,1	0,1	0.24%
RG-T17	0.53	0,1	0,1	0.53%
RG-T18	0.24	0,1	0,1	0.24%

Figure 118 - Probabilités de défaillance par érosion externe des tronçons

7.4.4.8 Synthèse des probabilités de rupture et définition du niveau de protection

7.4.4.8.1 Crue centennale

Les probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale Q_{100} sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 44 - Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale Q_{100}

Tronçon	Rupture par surverse	Rupture par glissement de talus	Rupture par instabilité du muret	Rupture par érosion de conduit	Rupture par érosion régressive	Rupture par érosion externe
RG-T1	0 %	~0 %	-	0,9 %	0 %	0.11%
RG-T2	0 %	~0 %	-	0,9 %	0 %	0.04%
RG-T3	0 %	~0 %	-	0,9 %	0 %	0.01%
RG-T4	0 %	<1 %	-	0,9 %	0 %	0.09%
RG-T5	0 %	~0 %	-	0,9 %	0 %	0.07%
RG-T6	0 %	<1 %	-	0,9 %	0 %	0.15%
RG-T7	0 %	~0 %	-	0,9 %	0 %	0.07%
RG-T8	0 %	~0 %	*	0,9 %	0 %	0.09%
RG-T9	0 %	~0 %	*	0,9 %	0 %	0.00%
RG-T10	0 %	~0 %	*	0,9 %	0 %	0.00%
RG-T11	0 %	0,1 %	-	0,9%	0 %	0.65%
RG-T12	0 %	0 %	*	0,01%	0 %	0.01%
RG-T13	0 %	0 %	*	0,01%	0 %	0.01%
RG-T14	0 %	0 %	*	0,01%	0 %	0.01%
RG-T15	0 %	3,12 %	-	0,9%	0 %	0.25%
RG-T16	0 %	0 %	0 %	0,01%	0 %	0.24%
RG-T17	0 %	0 %	-	0,01%	0 %	0.53%
RG-T18	0 %	0 %	*	0,01%	0 %	

* Le dimensionnement et la justification de la stabilité des murs sera effectuée lors de la phase PRO.

7.4.4.8.2 Niveau de sûreté

Le tableau ci-dessous synthétise pour chacun des tronçons, à l'état final des travaux, et pour chacun des modes de rupture, la ligne d'eau correspondant à la cote maximale d'une crue, permettant de respecter une probabilité de rupture inférieure à 5%.

Tronçon	Rupture par surverse	Rupture par glissement de talus	Rupture par instabilité du muret	Rupture par érosion de conduit	Rupture par érosion régressive	Rupture par érosion externe
RG-T1	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T2	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T3	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T4	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T5	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T6	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T7	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T8	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T9	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T10	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m		sans-objet	Z _{Q100} +0,8m	Z _{Q100} +0,8m
RG-T11	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m		sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m
RG-T12	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m		sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m
RG-T13	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m		sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m
RG-T14	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m		sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m
RG-T15	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m		sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m
RG-T16	Z _{Q100} +1,0 m	-	Z _{Q100} +1,0 m	sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m
RG-T17	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m		sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m
RG-T18	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m		sans-objet	Z _{Q100} +1,0 m	Z _{Q100} +1,0 m

Le niveau de sureté assuré par les digues en rive gauche de l'Arve à l'état final correspond à Z_{Q100}+0,8m.

7.4.4.8.1 Niveau de protection

Les niveaux de protection du système d'endiguement correspondent au niveau sur lesquels le SM3A s'engage au terme de la sécurité. Dans le cas du système d'endiguement Borne RD/Arve RG à la suite des travaux, ces niveaux de protection correspondent à la cote maximale atteinte par une crue de temps de retour 100 ans aux points de référence, à savoir :

- **Sur l'Arve :**
 - **Au pont de la ZI : 448,76 m NGF ;**
 - **Au pont de l'Europe : 445,65 m NGF.**
- **Sur le Borne :**
 - **Au pont Royal : 451,97 m NGF ;**
 - **A l'amont de la confluence Arve/Borne : 443,06 m NGF.**

7.4.4.8.2 Niveau de danger

Le niveau de danger est le niveau à partir duquel la probabilité de rupture d'un ouvrage est importante. Cette notion se rapproche du « risque de rupture d'au moins un ouvrage supérieur à 50% » qui est introduit dans l'arrêté du 7 avril 2017, et qui est défini dans le chapitre 8 comme le scénario 3.

L'obtention de ce niveau de danger est faite en appliquant la même méthodologie que celle du niveau de protection en cherchant toutefois à obtenir une probabilité de l'ordre de 50%. On considère ici la crue de temps de retour 400 ans, **initiatrice d'une rupture par surverse des digues en remblais.**

Tronçon	Rupture par surverse	Rupture par glissement de talus	Rupture par instabilité du muret	Rupture par érosion de conduit	Rupture par érosion régressive	Rupture par érosion externe
RG-T1	6%	0 %		sans-objet	0 %	0,23%
RG-T2	6%	0 %		sans-objet	0 %	0,07%
RG-T3	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,01%
RG-T4	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,17%
RG-T5	55%	0 %		sans-objet	0 %	0,10%
RG-T6	1%	0 %		sans-objet	0 %	0,18%
RG-T7	6%	0 %		sans-objet	0 %	0,08%
RG-T8	0%	0 %	*	sans-objet	0 %	0,12%
RG-T9	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,00%
RG-T10	1%	0 %	*	sans-objet	0 %	0,00%
RG-T11	1%	0 %		sans-objet	0 %	0,40%
RG-T12	1%	0 %	*	sans-objet	0 %	0,04%
RG-T13	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,01%
RG-T14	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,01%
RG-T15	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,38%
RG-T16	0%	0 %	*	sans-objet	0 %	0,39%
RG-T17	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,93%
RG-T18	0%	0 %		sans-objet	0 %	0,40%

* Le dimensionnement et la justification de la stabilité des murs et palplanches sera effectuée lors de la phase PRO.

On obtient ainsi la définition des niveaux pour lesquels la probabilité de rupture est au moins égale à 50% :

Tronçon	Rupture par surverse	Rupture par glissement de talus	Rupture par instabilité du muret	Rupture par érosion de conduit	Rupture par érosion régressive	Rupture par érosion externe
RG-T1	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T2	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T3	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T4	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T5	Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T6	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T7	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T8	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀	*	sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T9	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T10	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀	*	sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T11	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T12	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀	*	sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T13	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T14	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T15	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T16	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀	*	sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T17	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀
RG-T18	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀		sans-objet	>Q ₄₀₀	>Q ₄₀₀

Le niveau de sureté étant égal au niveau de protection apparent (crête de la digue), il est justifié de considérer que le niveau de danger correspond à la cote de crête ZQ100+0,8m. Cette cote correspond à une Q400 de l'Arve.

Le niveau de danger du système d'endiguement Arve rive gauche correspond à un niveau altimétrique de :

- Sur l'Arve :
 - Au pont de la ZI : 449,40 m NGF ;
 - Au pont de l'Europe : 446,24 m NGF.
- Sur le Borne :
 - Au pont Royal : 452,19 m NGF ;
 - A l'amont de la confluence Arve/Borne : 443,52 m NGF.

A noter que la rupture de la digue a une probabilité d'environ 50% de se produire pour une crue de temps de retour 400 ans par surverse sur le tronçon RG-T5.

Le scénario 3 est modélisé par une brèche à la surverse sur le tronçon emmenant le plus de venues d'eau en aval de la digue. Celui-ci est donc modélisé sur le tronçon RG-T05.

7.5 Conclusions

L'ensemble des profils types présentés et dimensionnés dans les paragraphes précédents sont réalisables et valables moyennant :

- Une mise en œuvre soignée et dans les règles de l'art ;
- La vérification de la stabilité des murs en T inversé en crête lors de la G2 PRO et la G3 des entreprises des travaux ;
- La vérification de la stabilité des digues au séisme et la sensibilité à la liquéfaction dans la G2 PRO et la G3 des entreprises des travaux.

Le tableau suivant permet de synthétiser les niveaux de protection et de danger du système d'endiguement après travaux.

Tableau 45 : Niveaux de danger et de protection du système d'endiguement

Digue	Lieu de référence	Niveau de protection au point de référence (NGF) et occurrence associée S1		Niveau de danger et occurrence équivalente S3 (50%)	
		Niveau	Crue	Niveau	Crue
BORNE-RD état projet	Borne - Pont Royal	451.97 mNGF	Q100 Borne (178.4 m ³ /s) + Q Arve (691.0 m ³ /s)	452.19 mNGF	Q300 Borne (212.9 m ³ /s) + Q Arve (767.0 m ³ /s)
	Amont Confluence Arve + Borne	443.06 mNGF		443.52 mNGF	
ARVE RG état projeté	Pt de la ZI	448.76 mNGF	Q100 Arve (1081.0 m ³ /s) + Q Borne (90.0 m ³ /s) + Q Bronze (13.0 m ³ /s)	449.40 mNGF	Q400 Arve (1415.2 m ³ /s) + Q Borne (113.5 m ³ /s) + Bronze (13.0 m ³ /s)
	Pt de l'Europe	445,65 mNGF		446.24 mNGF	

7.6 Moyens mis en œuvre pour assurer l'entretien, la surveillance et les réparations courantes des ouvrages

Les ouvrages doivent faire l'objet d'un entretien et d'une surveillance courante. Les points importants à entretenir sont entre autres :

- L'entretien de la végétation par fauchage et neutralisation des espèces ligneuses envahissant les talus et les crêtes d'ouvrages. Le planning d'entretien doit intégrer les contraintes écologiques de site ;
- Les visites techniques approfondies.

L'ensemble des mesures mises en œuvre pour l'entretien des digues est présenté dans le chapitre 9.

8. ÉTUDE DES RISQUES DE VENUES D'EAU DANS ET EN DEHORS DE LA ZONE PROTÉGÉE

8.1 Généralités

8.1.1 Les scénarios découlant de l'analyse des modes de défaillance

Le rôle des ouvrages d'endiguement considérés dans le cadre de la présente étude de dangers est la protection des zones à enjeux en aval des ouvrages. Les potentiels de dangers à considérer résultent donc de la submersion plus ou moins brutale de la zone protégée.

L'objectif est d'identifier tous les scénarios de défaillance susceptibles d'être, directement ou par effet domino, à l'origine d'une arrivée d'eau accidentelle dans une zone normalement protégée par les digues, ou bien une aggravation sensible du risque par rapport à l'état actuel.

Les scénarios étudiés dans le cadre de cette étude de dangers sont les suivants (Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 et précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions) :

- **Le scénario 1** est celui du fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau des écoulements, sous l'effet de la crue ou d'une submersion marine, correspond au niveau de protection. Conformément à l'article 11 du présent arrêté, on admettra que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus ou, s'il n'est pas possible de préciser quantitativement le risque résiduel de rupture, que ce risque est limité au sens de l'annexe 3. 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 supérieur à 50 %.

L'analyse des modes de défaillances (détaillée au chapitre 6 et 7 du document B) permet d'identifier les scénarios de défaillance émergents, et retenus pour l'analyse des conséquences (modélisation hydraulique).

Cette analyse fait ressortir 2 accidents potentiels :

- Rupture par surverse ou par brèche pour des crues supérieures au débit de débordement de l'ouvrage.
- Inondation de la zone protégée par remontée d'eau dans le réseau « Bois Jolivet » à la suite d'un dysfonctionnement du clapet anti-retour à mettre en place après les travaux.

Rappel : les scénarios de fonctionnement nominal et de défaillances structurales des digues en rive droite du Borne sont donnés dans l'étude de dangers déposée dans le cadre du dossier réglementaire « Borne ».

8.1.2 Cartographie des venues d'eau

Une cartographie des zones mises en eau a été réalisée pour les scénarios modélisés. La dangerosité des venues d'eau, autour et dans la zone protégée, est appréciée au regard des critères de vitesses d'écoulement et de hauteurs d'inondation. L'arrêté du 30 septembre 2019 précise que « sont réputées dangereuses les venues d'eau telles que la hauteur d'eau atteint au moins 1 m ou le courant au moins 0.5 m/s ». On distingue donc :

- Bleu clair : **venues d'eau peu dangereuses** – Hauteur d'eau < 1m **et** Vitesse d'écoulement < 0,5m/s
- Bleu foncé : **venues d'eau dangereuses** – 1m < Hauteur d'eau < 2m **ou** 0.5m/s < Vitesse d'écoulement < 1m/s
- Rouge : **venues d'eau particulièrement dangereuses** : Hauteur d'eau >2m **ou** Vitesse d'écoulement > 1m/s

NB : remarques importantes pour la lecture des cartes :

Les cartes représentent les enveloppes d'extension maximale de la zone inondée pour chaque scénario simulé (cas le plus défavorable).

8.2 Scénario 1 : Fonctionnement nominal

Ce scénario correspond au fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau des écoulements correspond au niveau de protection (Q100) :

- **Sur l'Arve :**
 - **Au pont de la ZI : 448,76 m NGF ;**
 - **Au pont de l'Europe : 445,65 m NGF.**
- **Sur le Borne :**
 - **Au pont Royal : 451,97 m NGF ;**
 - **A l'amont de la confluence Arve/Borne : 443,06 m NGF.**

Aucune venue d'eau ne survient dans la zone protégée.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

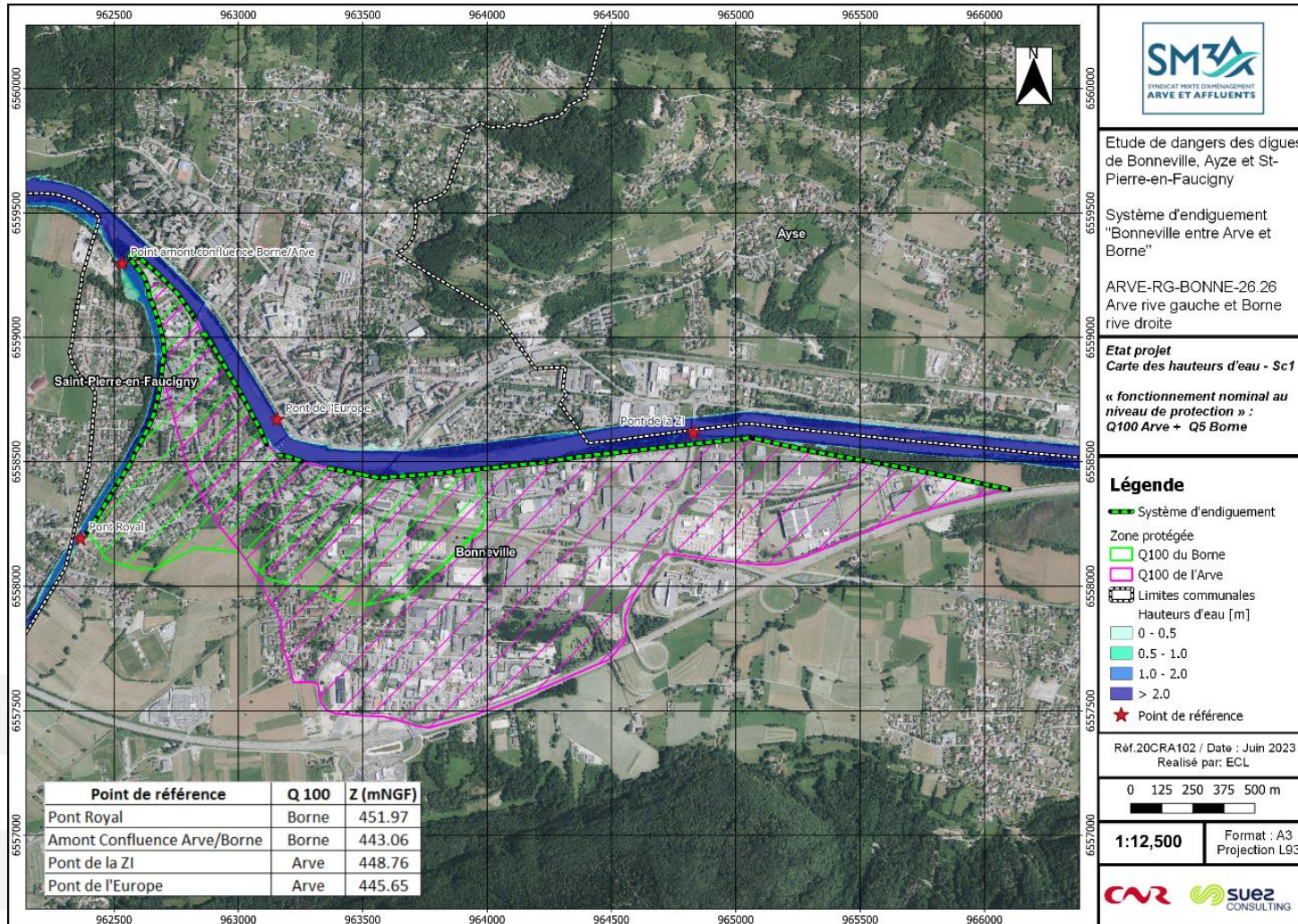


Figure 119 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
 Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

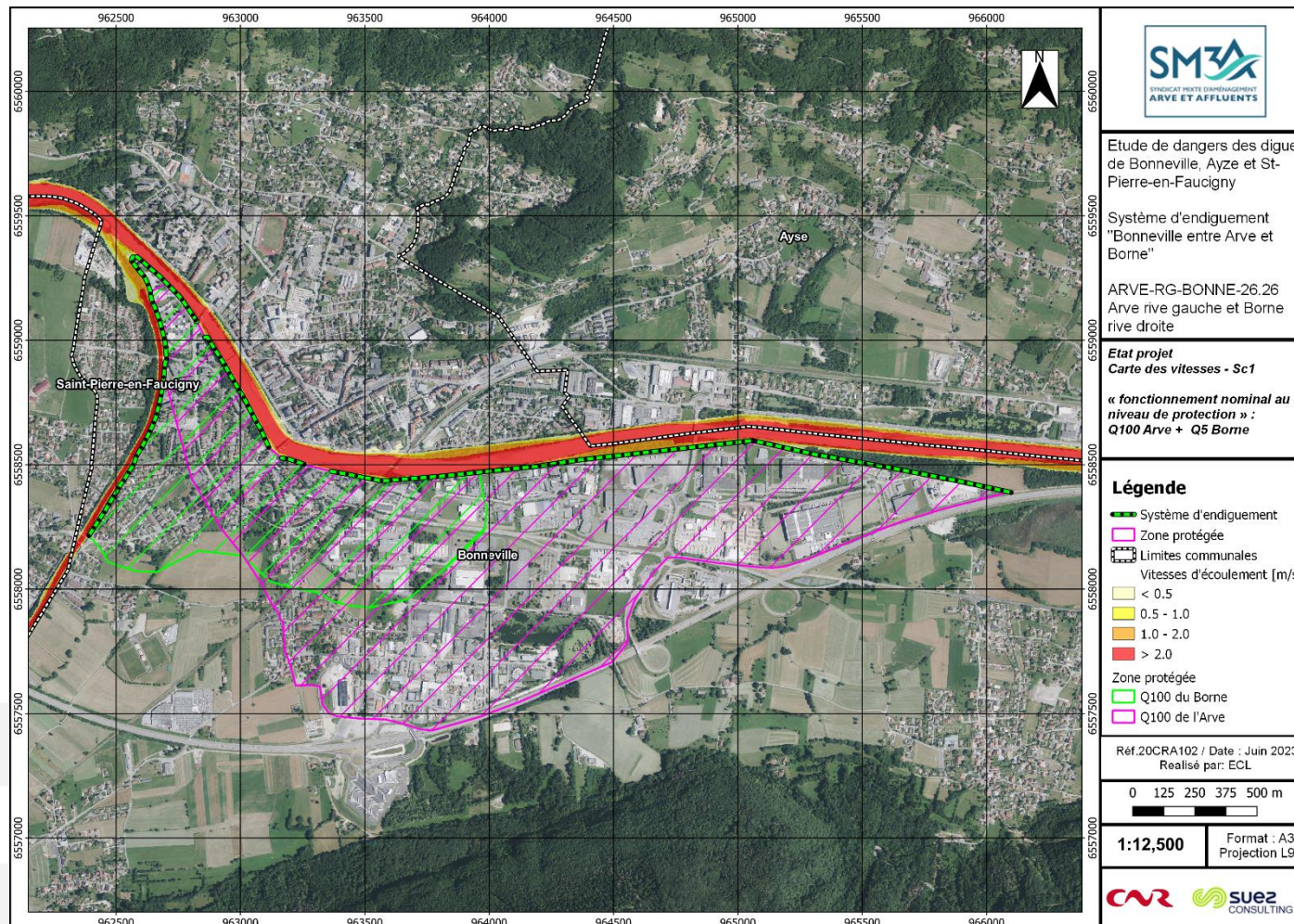


Figure 120 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

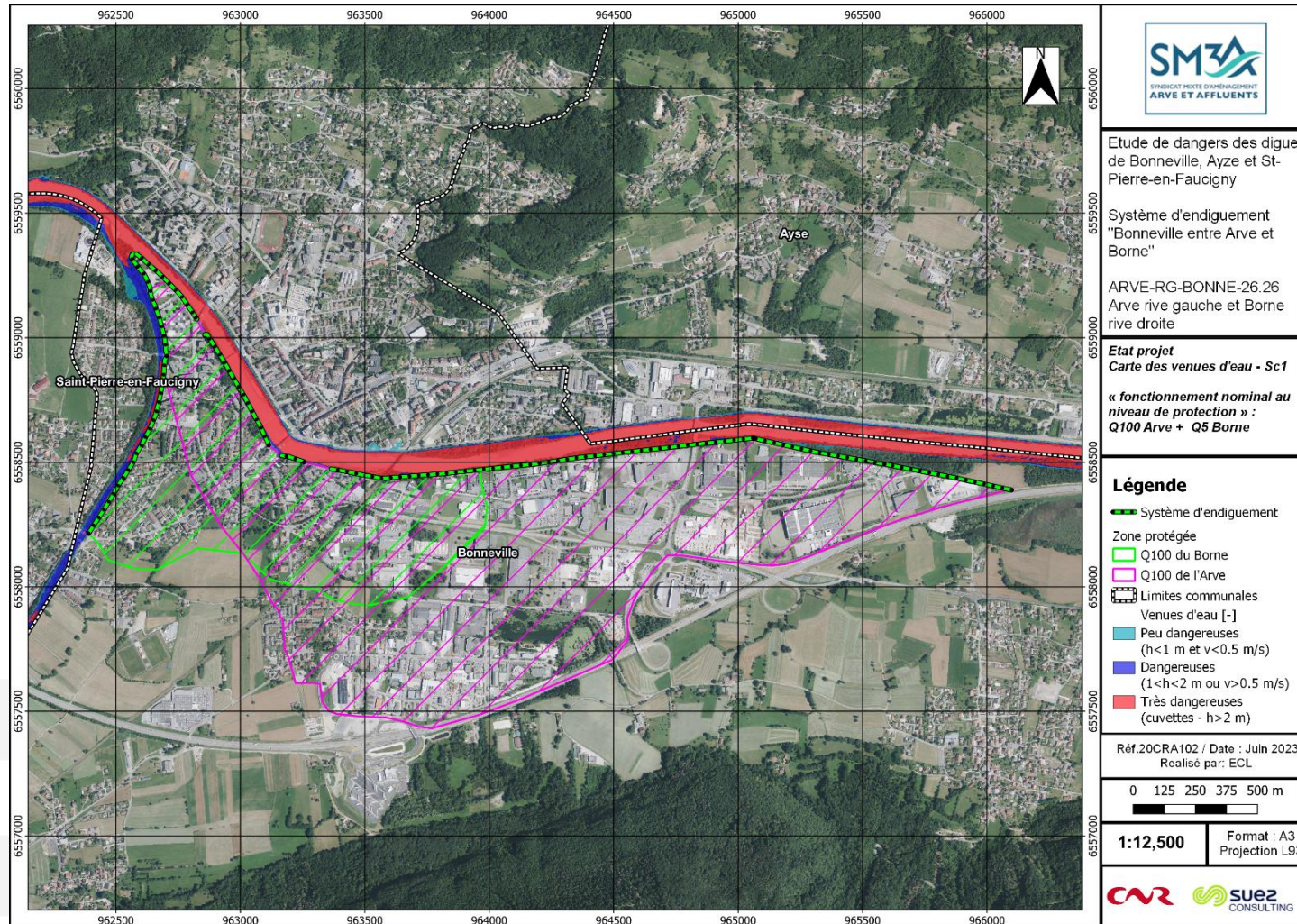


Figure 121 : Cartographie des venues d'eau du scénario 1

8.3 Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle

Une simulation a été réalisée à la suite du repérage et du diagnostic des réseaux traversant les digues :

- Clapet anti-retour du réseau « Bois Jolivet » qui reste en position ouverte pendant la crue centennale de l'Arve.

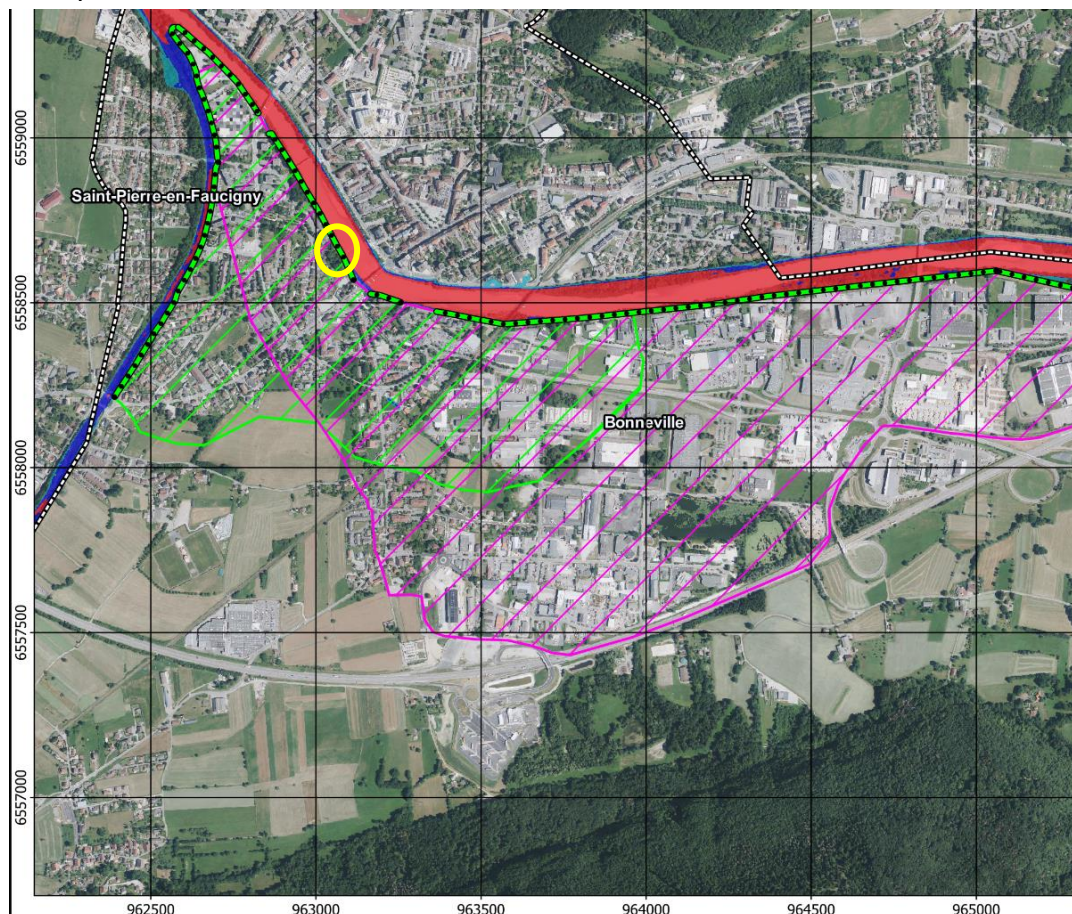


Figure 122 : Localisation du clapet anti-retour du réseau « bois Jolivet » - en jaune

Les cartographies de ce scénario sont données ci-après. Les cartographies montrent l'absence de venues d'eau dangereuses dans la zone protégée.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

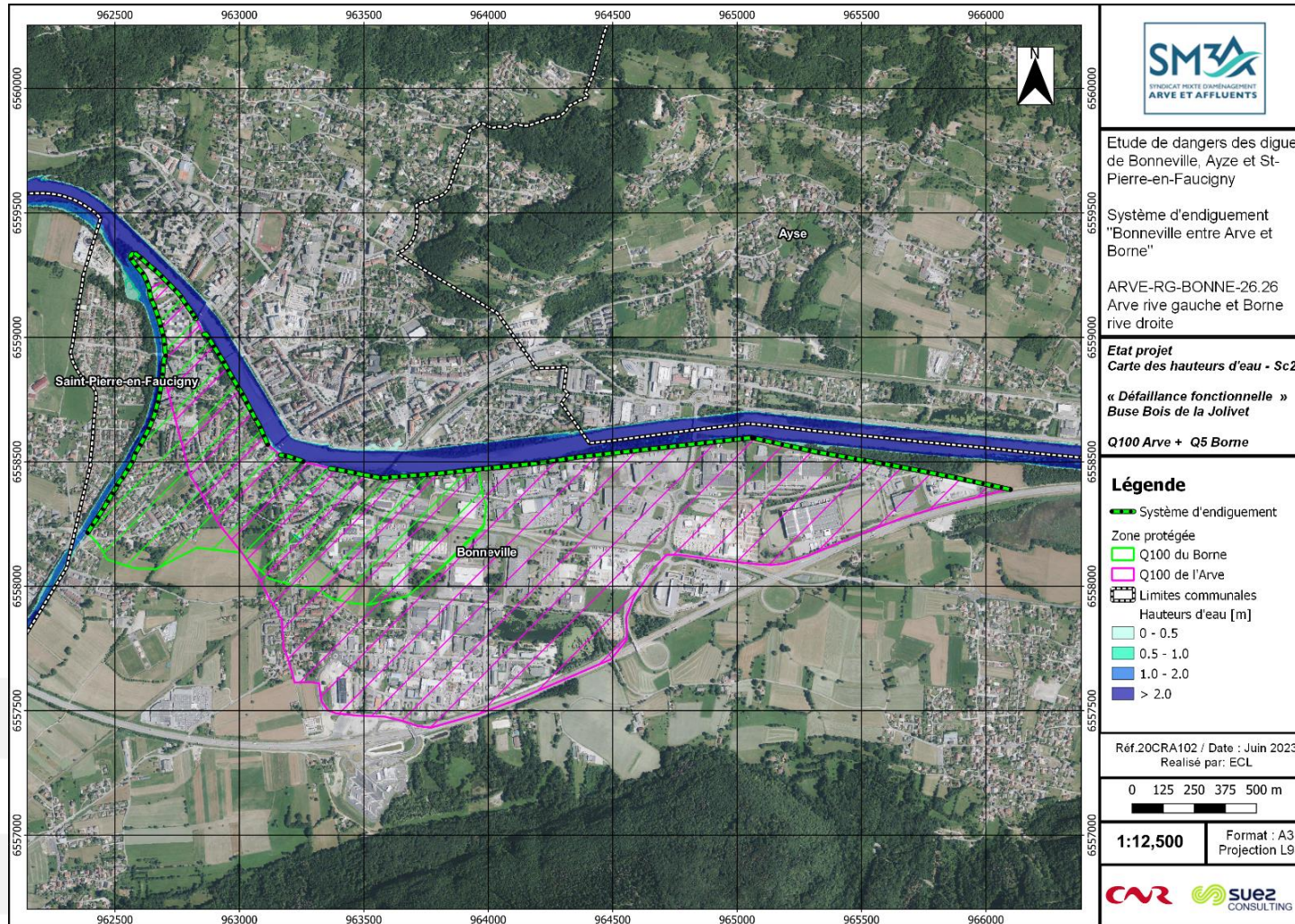


Figure 123 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
 Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

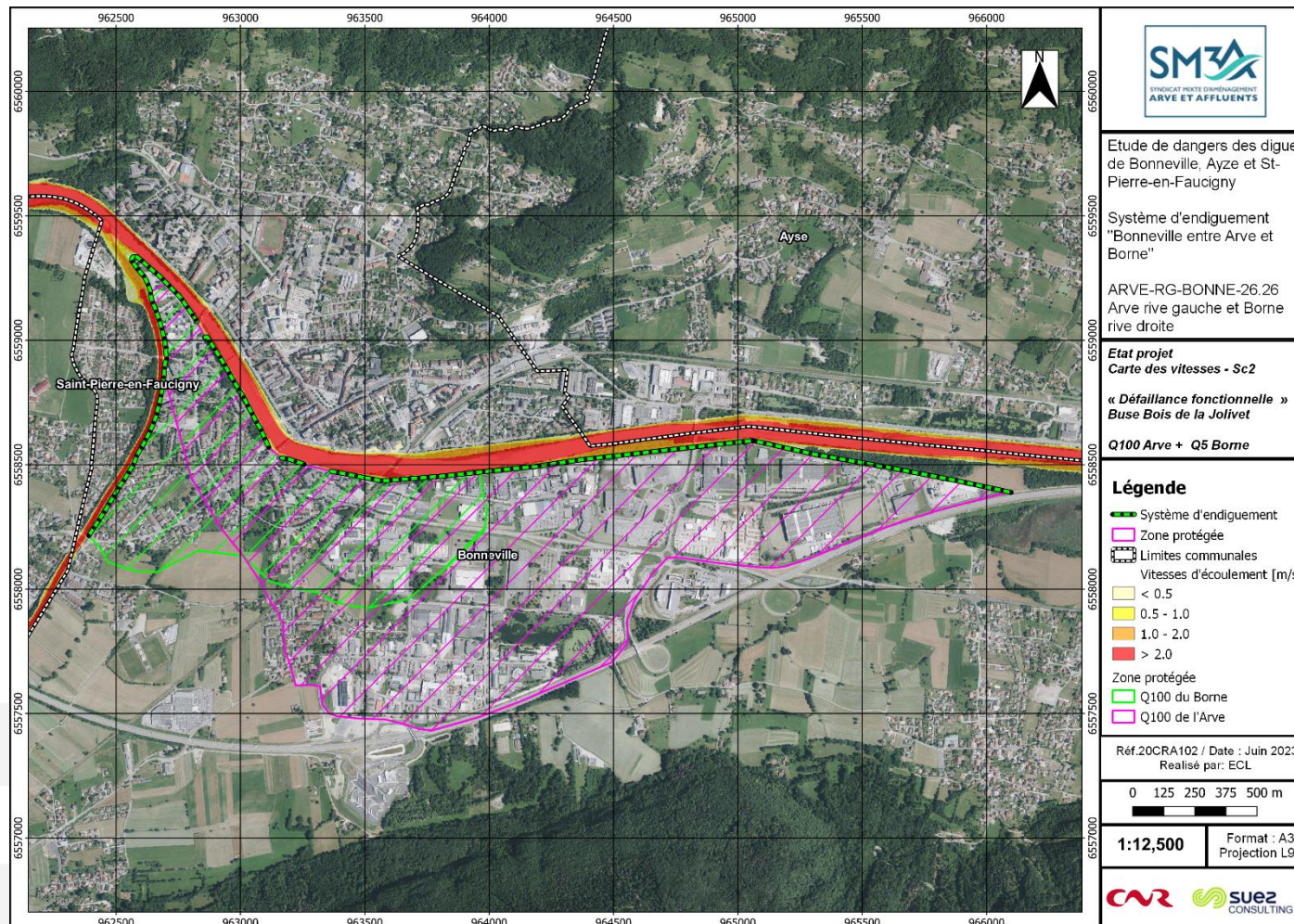


Figure 124 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
 Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

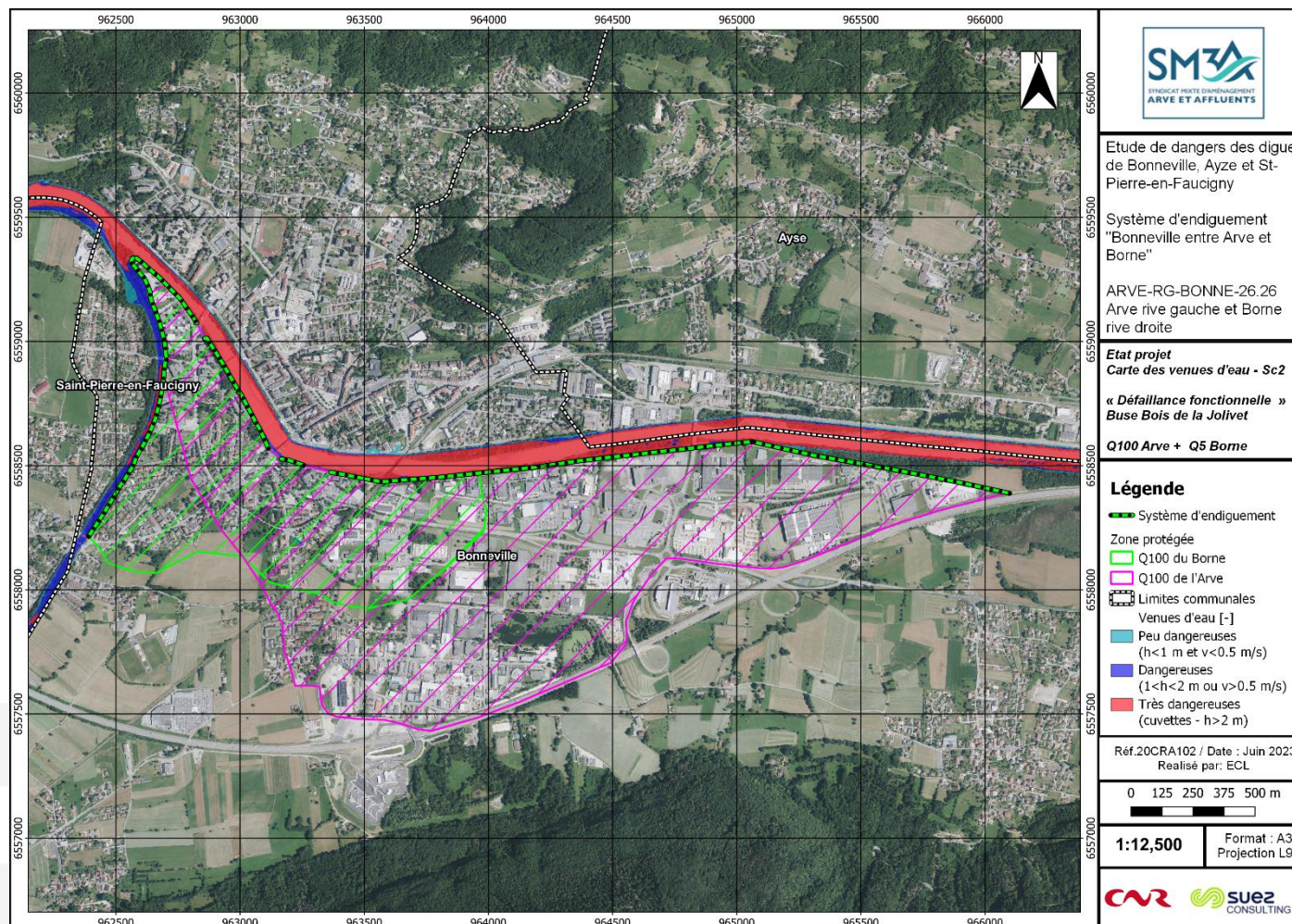


Figure 125 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2

8.4 Scénario 3 : Défaillance structurelle

Le choix de la localisation des ruptures modélisées tient compte en outre des enjeux situés derrière les tronçons de digue considérés, de l'étude historique sur les incidents et accidents survenus sur la digue.

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement : pour que le scénario de défaillance structurelle 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 **supérieure à 50 %**.

Conformément au §7, l'occurrence de la crue modélisée pour le scénario de défaillance structurelle est une Q400. Cette occurrence peut générer un risque de rupture **supérieure à 50 % (analyse des modes de défaillance)**.

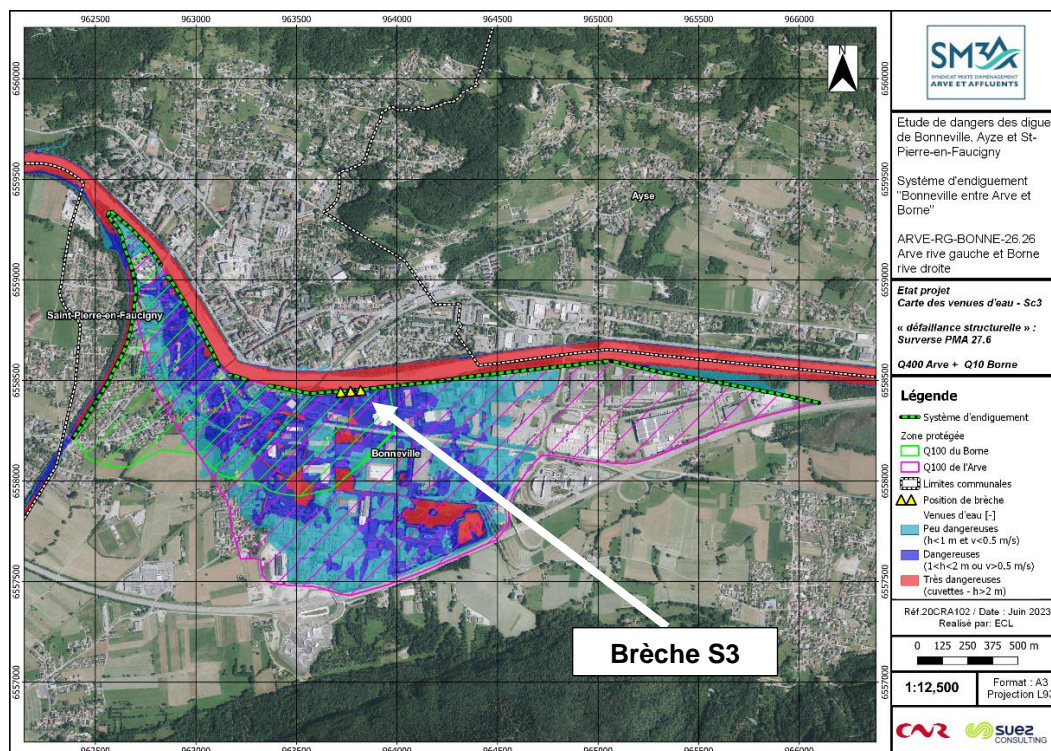
Un scénario de défaillance structurelle est représenté par une ouverture de brèche(s) dans le corps de la digue entre le côté eau et le côté zone protégée.

La modélisation d'une rupture est donc définie par plusieurs paramètres :

- Une probabilité de rupture ;
- Un nombre de brèches ;
- Une largeur de brèches ;
- Un instant de rupture ;
- Une cote finale de la brèche ;
- Une durée de formation de la brèche.

Le nombre de brèches est difficile à estimer. Cependant, les informations sur le contexte physique et l'historique peuvent nous renseigner sur les scénarios raisonnables.

Le scénario 3 représentant une brèche sur l'Arve rive gauche est bien représentatif d'une atteinte à la fois des zones habitées et de la zone industrielle. Elle est localisée sur la digue des Bordets (RGT5) → secteur dont la mise en charge des digues est la plus importante.



La modélisation des brèches est basée sur les hypothèses suivantes :

- Amorce de la brèche :
 - Lorsque le débit de pointe atteint le point considéré pour les ruptures par brèches,
 - Lorsque le début de la submersion apparaît pour les ruptures par surverse ;
- Abaissement de la crête jusqu'à l'atteinte du terrain naturel aval ;
- Largeur de la brèche : de 100 m ;
- Temps d'effacement complet : 1h. Ces hypothèses rentrent dans l'ordre de grandeur des brèches communément modélisées pour d'autres EDD, à savoir entre 100 et 200 mm/min.

Ces hypothèses permettent de représenter une certaine dynamique de rupture, sachant que d'autres dynamiques de ruptures peuvent être susceptibles de se produire.

La localisation des brèches répond à l'objectif de maximiser les conséquences en jouant sur les deux critères suivants :

- Hauteur maximale de la digue au-dessus du terrain naturel (TN). Cette configuration est susceptible de maximiser le débit déversé ;
- Zone habitée en aval.

Pour le scénario de défaillance structurelle, on retrouve la cinétique de brèche suivante :

T=0 h : Début de la brèche

Initiation de la brèche suite à une crue de temps de retour 400 ans de l'Arve

T=1 h : Venues d'eau dans la zone protégée

La brèche s'ouvre complètement. Les eaux s'écoulent dans la zone protégée le long du système d'endiguement jusqu'au pont de l'Europe.

Celles-ci s'écoulent rapidement vers le centre de la zone protégée et surversent sur la D1205 et le ruisseau de la Bézière.

Les eaux remontent également dans la zone d'activité des Bordets.

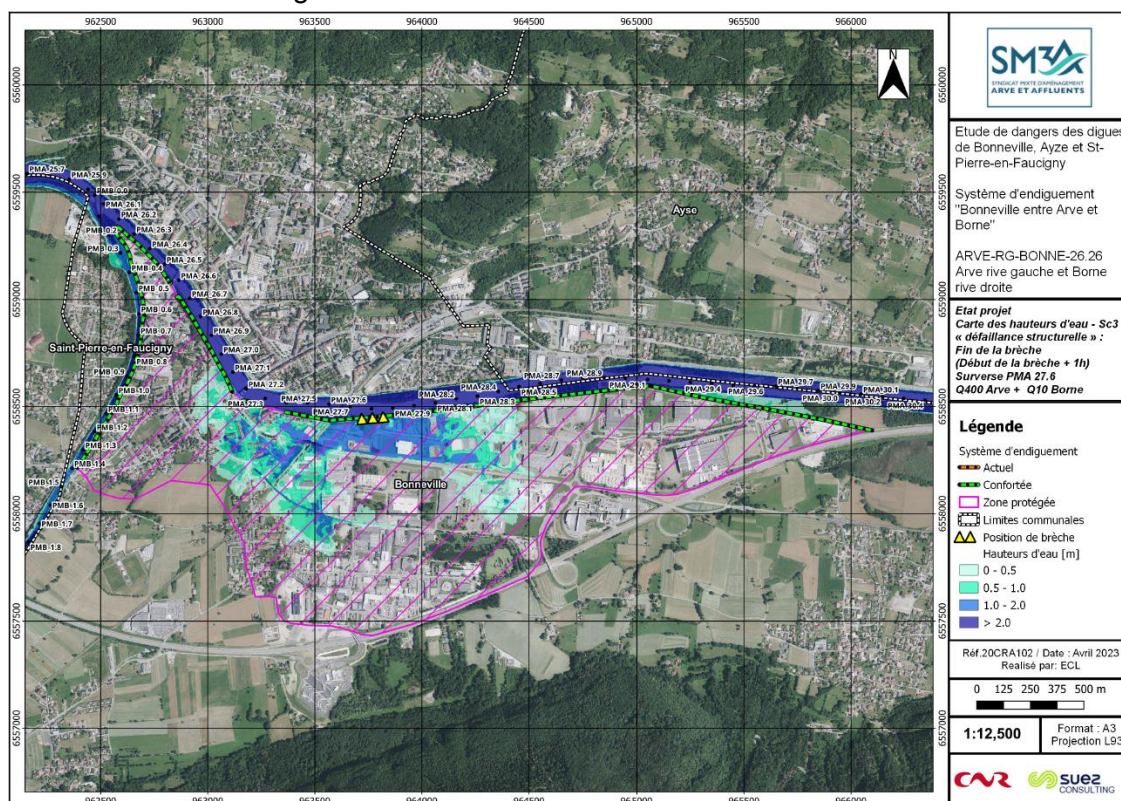


Figure 127 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 1h après la rupture

T=2 h : Venues d'eau dans la zone protégée

Les eaux provenant de la Brèche s'écoulent jusqu'au point le plus en aval du système d'endiguement, et s'étendent jusqu'à la partie sud de la zone protégée.

Celles-ci ne remontent cependant pas beaucoup plus en amont le long de la digue.

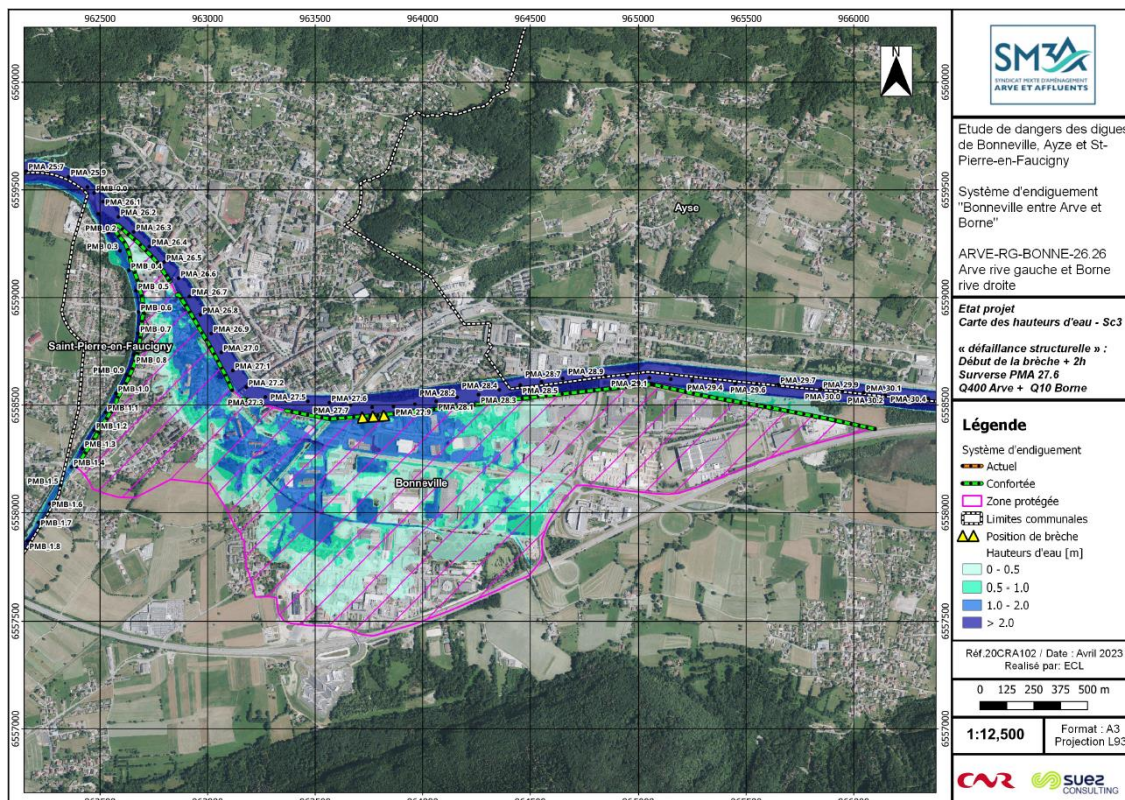


Figure 128 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 2h après la rupture

T=3h : Etalement des eaux

Les eaux s'étendent sur la partie sud et ouest de la zone protégée.

La majorité de la zone protégée est touchée, et on observe des venues d'eau dangereuses et très dangereuses.

La partie est de la zone d'activité longeant les Bordets reste cependant à l'abris des remontées des eaux, tout comme les enjeux proches de la partie amont des digues du borne rive droite.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne" - ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

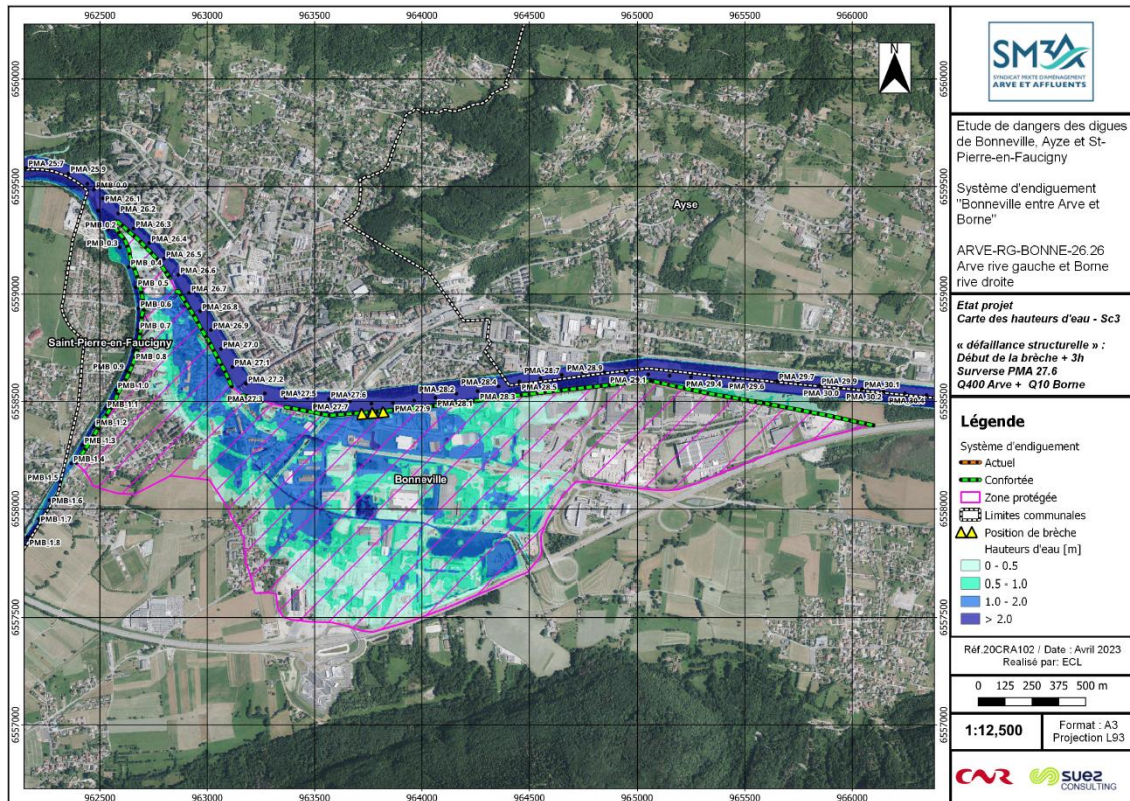


Figure 129 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 3h après la rupture

Les cartographies (débordements maximum) du scénario 3 sont données ci-après.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

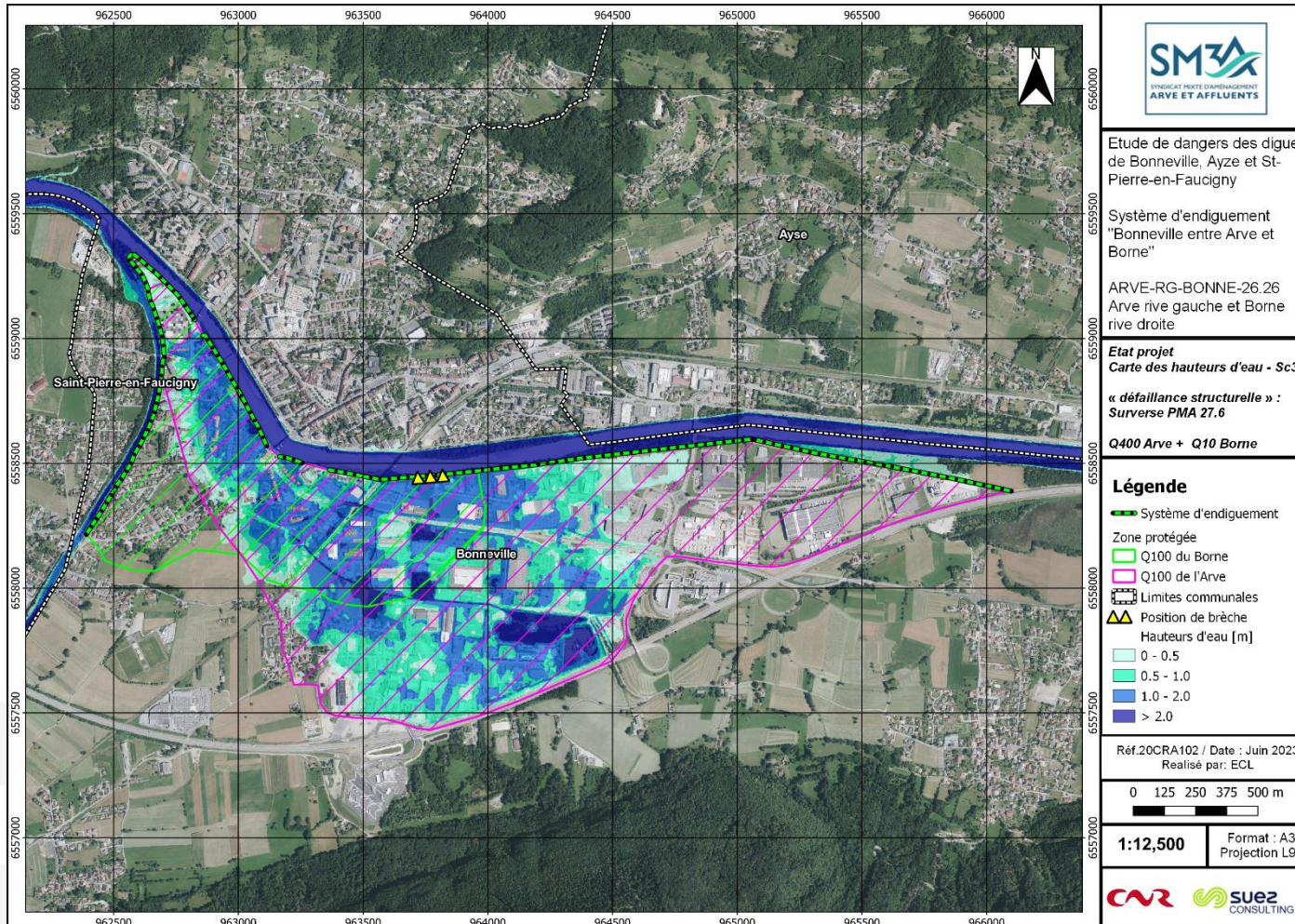


Figure 130 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

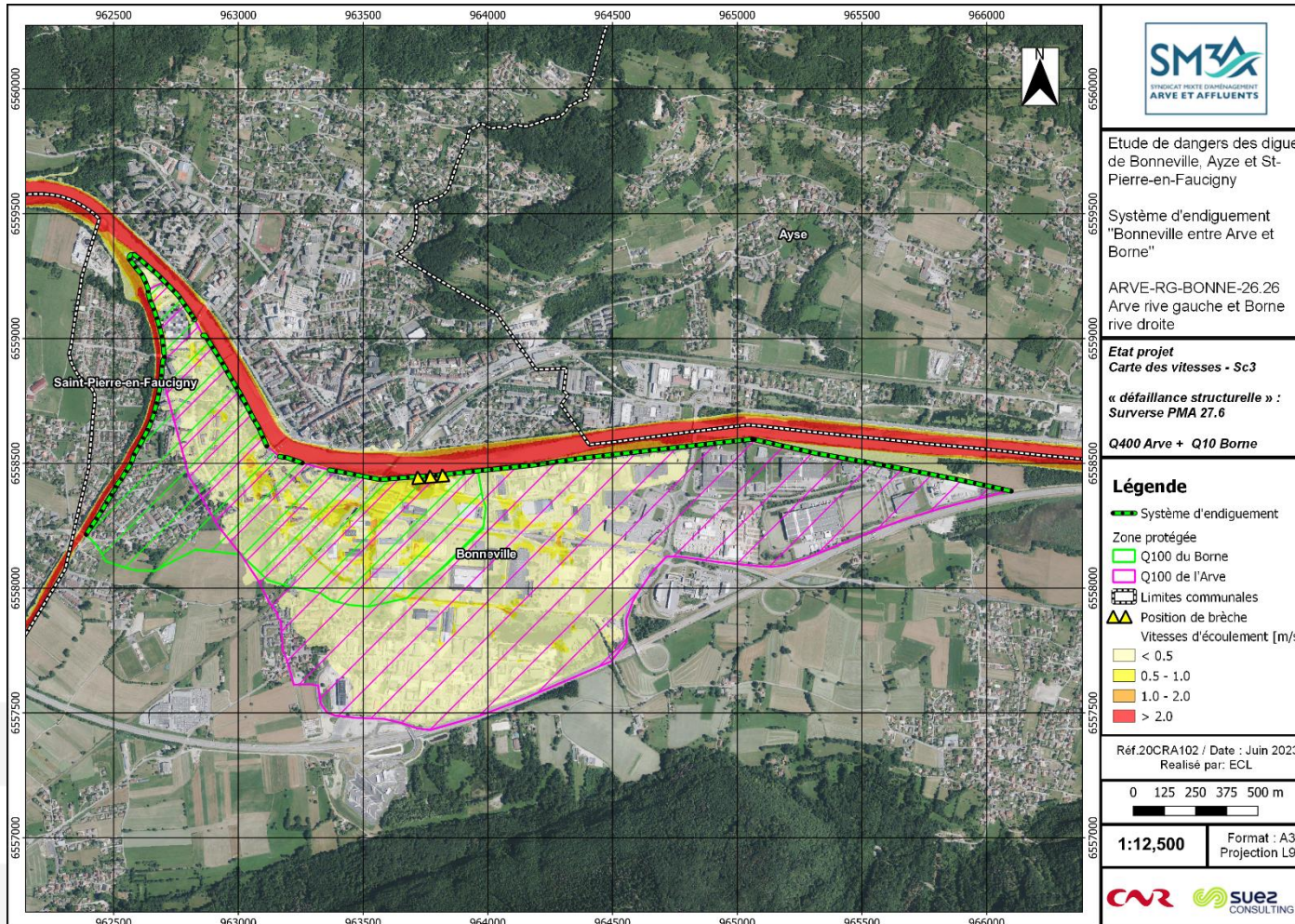


Figure 131 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

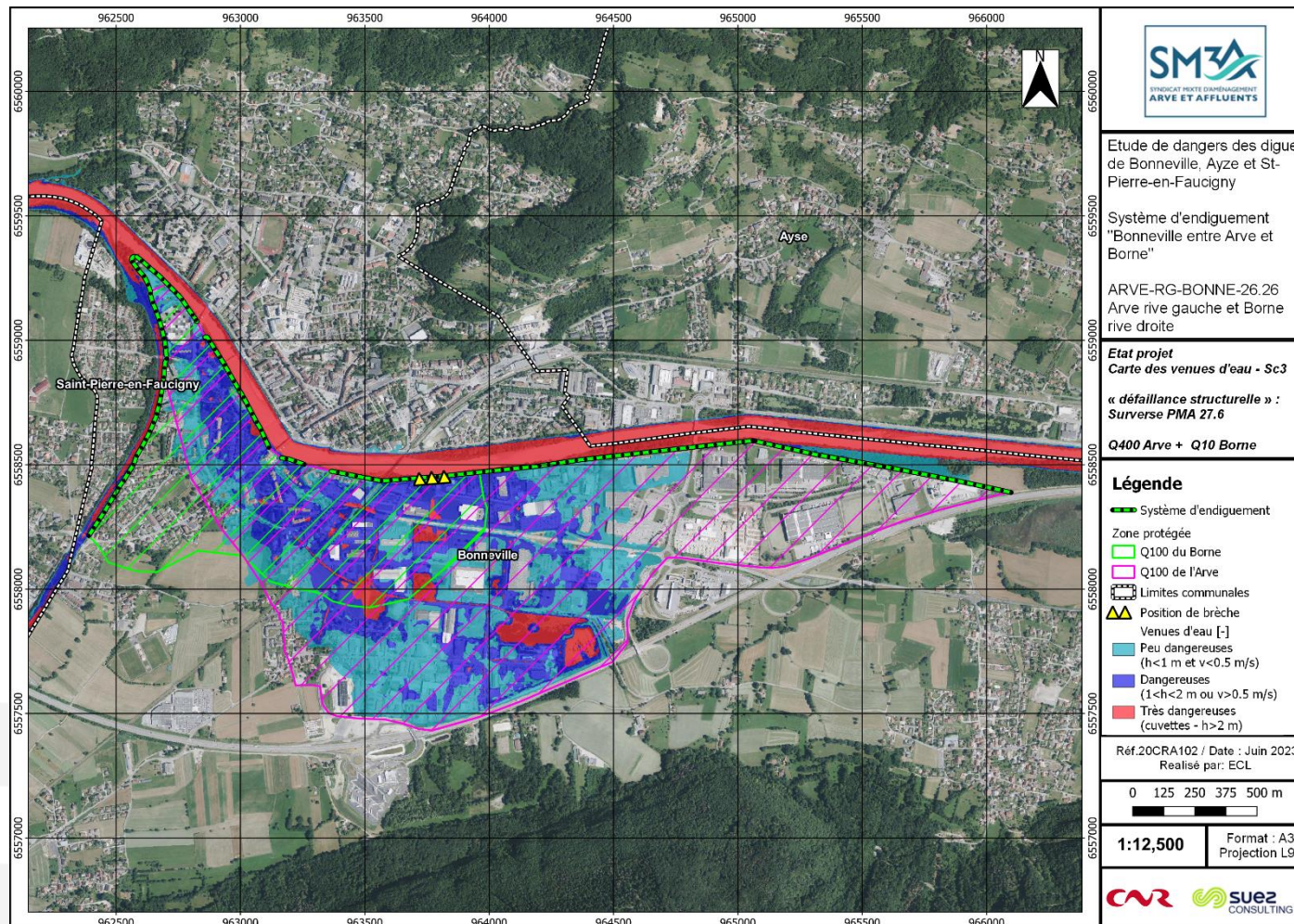


Figure 132 : Cartographie des venues d'eau du scénario 3

9. PRESENTATION ET ANALYSE DE L'ORGANISATION MISE EN PLACE PAR LE GESTIONNAIRE POUR L'EXERCICE DE SES MISSIONS

Le SM3A est organisé de manière structurée pour répondre en cas de crise, notamment en cas de crue, pour surveiller voire intervenir en cas de désordres. Etant donné l'étendue du périmètre, le SM3A se focalise sur une centaine de points sur l'ensemble de son Bassin versant et priorise les systèmes d'endiguement en fonction des évènements rencontrés.

Les niveaux de veille, alerte et post-crue sont bien décrits dans les consignes de surveillances générales. Les PCS des communes intègrent aussi l'aspect gestion de crue. Des réunions entre PCS et Communes sont nécessaires pour uniformiser les actions en crue.

Pour ce qui est de l'endiguement en lui-même :

- 2 échelles existantes serviront comme lieux de références pour les digues de l'Arve rive gauche ;
- 2 échelles seront mises en place sur le Borne (à noter qu'une des deux échelles est déjà présente au niveau du pont Royal).

Le SM3A, gestionnaire du système d'endiguement, a édité à l'échelle du bassin versant de l'Arve un document intitulé : « Consignes générales de surveillance et d'exploitation - Ouvrages classés ou à classer constitutifs de systèmes d'endiguement », novembre 2017.

Ce document, qui a été transmis au préfet, précise l'organisation du gestionnaire pour assurer l'exploitation, l'entretien et la surveillance des ouvrages, conformément à l'Article R.214.122 I-2 du Code de l'Environnement. Cette organisation est définie à l'échelle du bassin versant de l'Arve, de façon globale, et non individuelle à l'échelle d'un ouvrage ou d'un système d'endiguement.

Des consignes spécifiques au Système d'Endiguement de la présente étude seront mises en place en complément.

Les éléments repris ci-après présentent donc l'organisation mise en place par le gestionnaire sur l'ensemble de son parc d'ouvrages, à l'échelle du bassin versant, et donc a fortiori sur le système d'endiguement Bonneville entre Arve et Borne.

9.1 Organisation du gestionnaire

Le SM3A est organisé autour 3 pôles techniques que sont : « Prévention des inondations », « Milieux » et « Entretien et surveillance des cours d'eau ». Les pôles techniques s'appuient sur 1 pôle administratif.

9.1.1 Pôles et services chargés de la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement

9.1.1.1 Personnels

Au sein du pôle « prévention des inondations » qui assure la mise en œuvre du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) et de la Stratégie Locales de gestion des Risques Inondations (SLGRI) du bassin versant de l'Arve, le service «

systèmes d'endiguement », a la charge de la gestion du parc des ouvrages classés en système d'endiguement du SM3A.

Ce service composé d'un référent, de deux techniciens, et d'un agent de surveillance. Le service est sous l'autorité directe du responsable de pôle « Prévention des inondations », membre de l'équipe de direction.

Le pôle « prévention des inondations » comporte également des compétences internes en hydraulique, géomorphologie et spécificités des territoires de montagnes.

Le service « systèmes d'endiguement » s'appuie également sur les ressources du pôle « Entretien et surveillance des cours d'eau ». Ce pôle opérationnel composé d'un responsable et de 5 techniciens ont reçu pour mission première, de mettre en œuvre la compétence Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI), tant sur le volet GEMA que sur le volet PI. Ils assurent une surveillance des cours d'eau, entreprennent des travaux, dans le cadre de déclaration d'intérêt général ou d'intervention d'urgence, de gestion des boisements de berges et d'embâcles, de curage des atterrissements... et assurent par la même occasion une surveillance visuelle des ouvrages classés sur les linéaires entretenus. Ils sont en mesure de détecter les éventuels désordres sur les ouvrages de protection, de faire remonter l'information et d'intervenir en cas de besoin pour faire cesser ou limiter les conséquences des désordres.

Ils constituent également les premiers moyens humains de terrain en cas de crise.

Ainsi, les deux pôles « prévention des inondations » et « entretien et surveillance des cours d'eau » sont organisés pour assurer une surveillance et une gestion adaptées des ouvrages classés en systèmes d'endiguements sous responsabilité du SM3A.

La répartition des périmètres d'intervention des techniciens « ouvrages » et des techniciens de rivières est définie géographiquement et s'accompagne de référents techniques dans les domaines spécifiques que sont : l'hydraulique, le boisement, la géomorphologie...

L'agent de surveillance assure pour sa part, les visites annuelles de surveillance sur chaque ouvrage et complète les équipes en cas de crise.

9.1.1.2 Moyens matériels

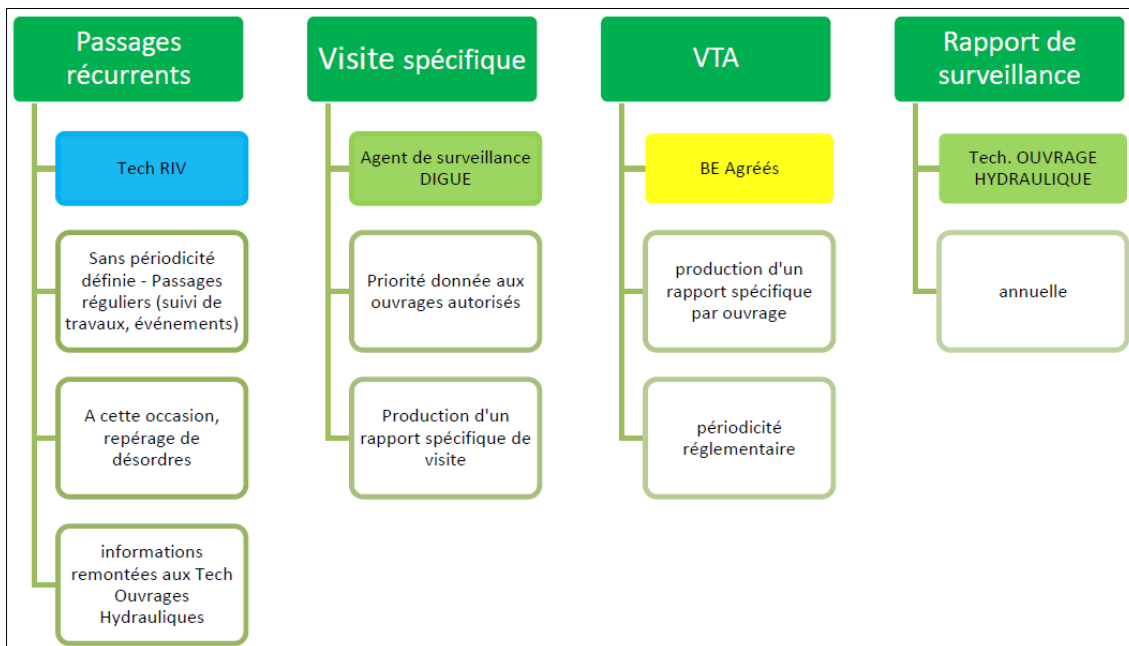
Un certain nombre de véhicules sont disponibles pour réaliser les visites et autres interventions sur le terrain. Le détail de ces véhicules et du matériel nécessaire pour le suivi sur le terrain sont précisés dans la consigne générale de surveillance (réf. [DA12]).

Ces moyens comprennent notamment :

- Les Equipements individuels de formation ;
- Les véhicules dédiés aux interventions sur les systèmes d'endiguements ;
- Les kits inondations (phares, cartes, chasuble fluo, casque de chantier, etc.) ;
- Un logiciel permettant notamment de saisie des désordres (SIRS digue) et une tablette.

9.1.2 Organisation des missions de surveillance générale

Une organisation spécifique entre les deux pôles a été mise en place pour assurer la surveillance générale :



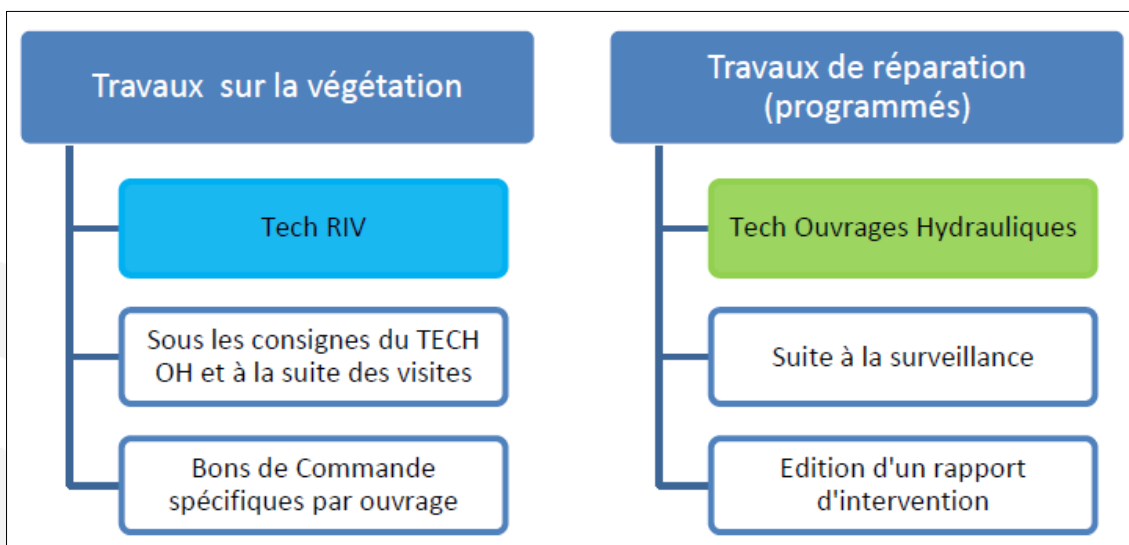
Pour faciliter les échanges entre Pôle « prévention des inondations » et « entretien et surveillance des cours d'eau », une réunion annuelle est organisée en février ou mars. A cette occasion, sont données les consignes d'entretien de la végétation sur les ouvrages classés. De même, des réunions bimensuelles sont planifiées entre pôles sur des thématiques communes : gestion de crise, hydrologie...

Le pôle « milieux » contribue également aux passages récurrents à l'occasion des inventaires faune/flore.

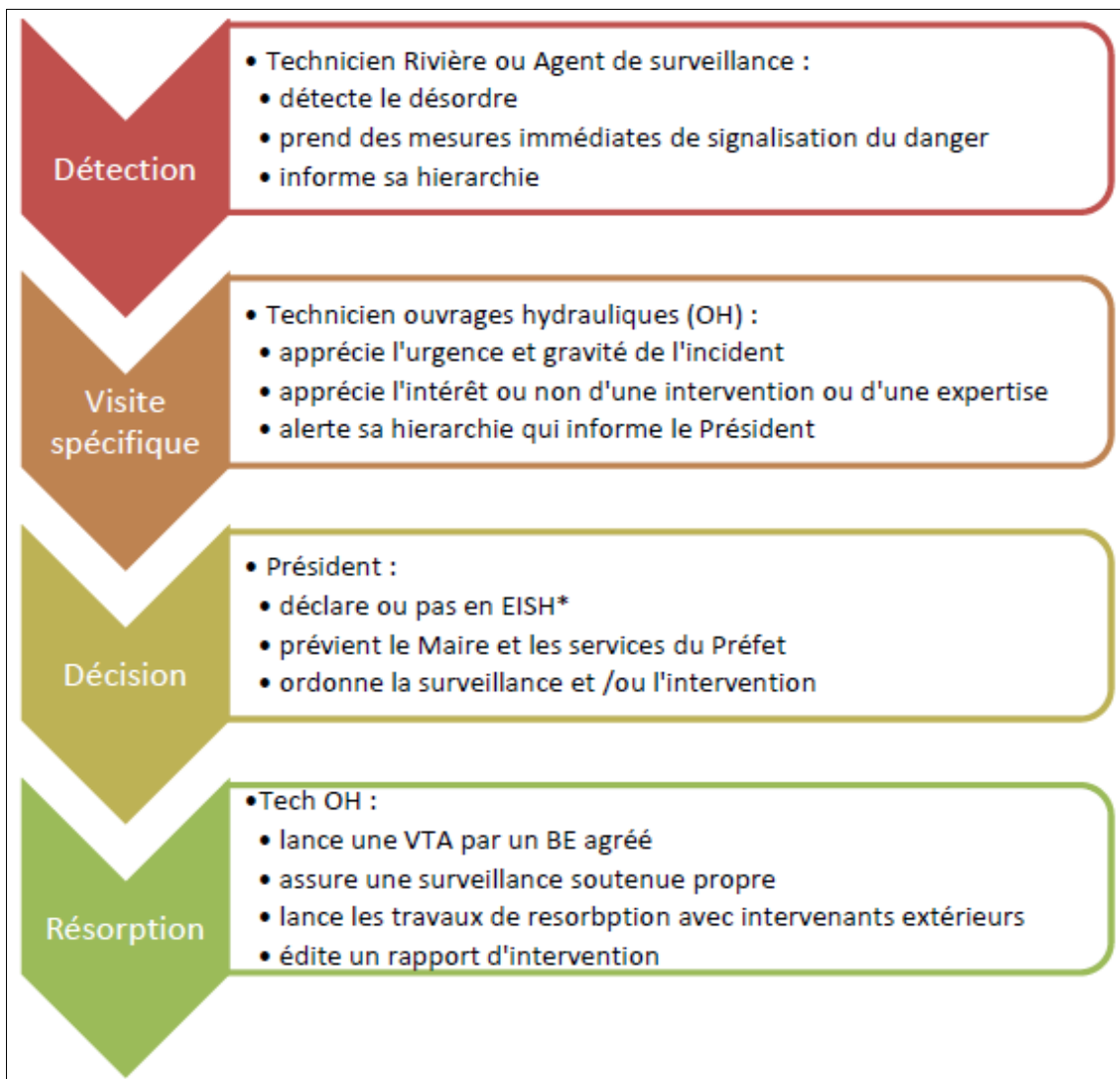
9.1.3 Organisation des interventions programmées

Les interventions programmées peuvent être soit des travaux sur la végétation soit des travaux de réparation en génie civil.

Pour l'ensemble de ces interventions, les techniciens s'appuient sur des intervenants extérieurs sous contrat avec le SM3A.



9.1.4 Organisation lors d'un désordre détecté sur ouvrage



* EISH : événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH)

9.1.5 Entreprises et prestataires sous contrat

Le SM3A dispose de plusieurs marchés sous forme d'accords-cadres lui permettant de faire intervenir des prestataires sur les cours d'eau et les ouvrages classés Système d'Endiguement.

Liste des prestations externalisées :

- Relevés topographiques, bathymétrique, et LIDAR (cette dernière prestation est généralement engagée après des événements marquants) ;
- Visites techniques approfondies réalisées par des bureaux d'études spécialisés disposant de l'agrément « Digués et petits barrages ». Ces prestataires sont également mandatés lors d'expertise exceptionnelle sur des incidents pouvant compromettre la sécurité d'un ouvrage ;
- Pose et fourniture d'échelles limnigraphiques et bornes de repérage spécifiques aux ouvrages classés ;

- Travaux d'entretien des boisements en bord de cours d'eau ou sur les ouvrages ;
- Travaux de curage des cours d'eau. Marché alloti géographiquement et confié à plusieurs entreprises de travaux publics. Ce marché est utilisable pour des interventions d'urgence ;

Les moyens humains et matériels et l'organisation générale du SM3A est en adéquation avec l'objectif de protection.

9.2 Consignes de surveillance et d'exploitation des ouvrages hors période de crise

9.2.1 Consignes générales de surveillance

Le SM3A a mis en place une organisation générale de surveillance qui permet une inspection régulière des ouvrages de protection hydrauliques avec une intensité de visite différenciée en fonction du classement des systèmes d'endiguements.

Le tableau ci-dessous décrit les différentes visites sur les digues en fonction du classement des systèmes d'endiguement. Il est à noter que la fréquence des visites peut également être adaptée en fonction de l'état des ouvrages ou tout autre phénomène appelant une surveillance renforcée de l'ouvrage.

	Type	Digue de classe A	Digue de classe B	Digue de classe C
Visites de surveillance de l'état des ouvrages	Passages récurrents	En fonction des passages de surveillance générale assurés par les techniciens RIVIERE sur les cours d'eau		
	Visite spécifique	Au moins 1 fois par an par l'agent de surveillance DIGUE avec production d'un PV		
	Visites Techniques Approfondies (VTA)	Visite réalisée par un prestataire extérieur avec production d'un rapport tous les 3 ans	Visite réalisée par un prestataire extérieur avec production d'un rapport tous les 5 ans	Visite réalisée par un prestataire extérieur avec production d'un rapport tous les 6 ans

9.2.1.1 Passages récurrents

Il s'agit de passages réguliers réalisés par les techniciens à l'occasion de leurs différentes tournées sur le terrain. Le technicien s'assure de l'absence de désordre majeur sur les ouvrages (vue macroscopique) mais également apprécie l'environnement de l'ouvrage (évolution morphologique du lit : déplacement des bancs, engrèvement ou incision du lit, dynamique générale, évolution de la végétation...).

La surveillance générale et macroscopique assurée par les techniciens doit permettre :

- De donner l'alerte en cas d'inquiétudes relatives à la sécurité de l'ouvrage et, en cas de danger immédiat, de prendre les mesures nécessaires ;
- De suivre, dans le temps, les actions subies par les ouvrages ;
- De suivre l'évolution du fil d'eau ;
- De signaler tout accident ou incident grave ;
- D'observer les anses d'érosion, et autres glissements, aux abords des ouvrages ;

- D'observer le contournement possible des seuils, pouvant entraîner une déstabilisation de l'ouvrage ;
- De guetter l'apparition éventuelle d'anomalie dans le comportement tant fonctionnel que structurel des ouvrages.

9.2.1.2 Visite spécifique de surveillance (visite programmée)

L'ensemble des ouvrages classés en système d'endiguement fait l'objet d'une visite annuelle. Cette visite annuelle pourra être complétée de visites supplémentaires sur les ouvrages de catégorie A mais également sur des tronçons sensibles : soumis à une mise en charge fréquente du fait de configuration particulière (cours d'eau à lit perché), et/ou protégeant des enjeux significatifs.

Cette visite est réalisée à pied par un à deux techniciens, à un rythme moyen estimé à environ 6 à 7 km de digue par jour.

Les parements amont et aval ainsi que la crête sont observés. Sont principalement recherchés sur l'ouvrage :

- L'accessibilité de la digue et la libre circulation,
- Les désordres sur le corps de digue et les perrés ;
- Les travaux réalisés par des tiers.

D'un point de vue matériel, le technicien dispose d'un appareil photo et d'un GPS et les désordres significatifs sont repérés à la bombe.

Un rapport est rédigé et des extraits permettent d'alimenter le registre de l'ouvrage. Une fiche désordre peut être renseignée en fonction des conclusions de la visite et le technicien peut préconiser un suivi du désordre, un diagnostic détaillé voire une intervention de travaux.

9.2.1.3 Visites Techniques Approfondies (VTA)

Les visites techniques approfondies VTA sont réalisées par un bureau d'études agréé « Dignes et petits barrages » et dans les mêmes conditions d'exigences du SM3A s'agissant de la sécurité des agents.

Ces visites sont réalisées par deux personnes à vitesse lente (en moyenne 3 km de digue par jour). La crête et les parements amont et aval sont inspectés préférentiellement en période de basses eaux et hors période de végétation.

Les observations (structures, réseaux, végétation, désordres, etc.) sont saisies sous le logiciel SIRS digue et un compte rendu détaillé est produit présentant les différents secteurs observés avec photographies et commentaires. Dans les conclusions du rapport, des préconisations sont apportées sur les éventuelles actions à mener par suite des observations de désordres.

9.2.2 Consignes d'exploitation des ouvrages

Les travaux d'entretien et d'exploitation des ouvrages classés en système d'endiguement prennent en compte les différents plans de gestion déjà établis et notamment :

- Plans de gestion des matériaux solides ;
- Plans de gestion des boisements de berges et du bois mort.

9.2.2.1 Plans de gestion des matériaux solides

Le SM3A dispose de plans de gestion et de DIG correspondantes sur l'Arve et une partie de ses affluents, travaille à l'élaboration des plans sur les affluents qui en sont actuellement dépourvus, et à leur renouvellement le cas échéant.

La gestion des matériaux solides a pour objectif de répondre à des problèmes ponctuels tout en tenant compte du fonctionnement global du transport solide sur l'ensemble des cours d'eau du bassin versant de l'Arve.

Les plans de gestion des matériaux solides du bassin versant de l'Arve ont pour objet le respect d'un profil qui permet à la fois de répondre aux problèmes d'inondation et de maintenir un équilibre global pour la rivière ainsi que la mise en œuvre d'opérations permettant de répondre spécifiquement aux enjeux du territoire.

Ces plans de gestion doivent permettre au SM3A d'appliquer toutes les modalités techniques de gestion du transport solide nécessitées par le respect d'un « profil référence » du cours d'eau, tout en respectant les contraintes d'ordre réglementaire et juridique.

L'objectif est d'élargir le champ de réflexion des interventions de gestion du lit à des tronçons homogènes plus larges et d'avoir une vue globale des interventions sur l'ensemble du bassin.

Ces plans de gestion s'appuient sur des diagnostics de la situation actuelle et prévisionnelle pour l'ensemble des cours d'eau du bassin versant de l'Arve. Des modalités de suivi du lit sont également définies sur l'ensemble du cours afin de connaître les écarts par rapport au « profil de référence » et de motiver des interventions d'entretien ou de stabilisation adaptées à l'évolution morpho dynamique du lit.

Pour rappel, la revanche importante entre la ligne d'eau Q100 et la crête de digue aménagée permet d'intégrer des potentiels oscillation de fond de lit liées à des apports ou reprises de matériaux par charriage.

Un suivi topographique (bisannuel) du fond de lit est nécessaire (profils en long, lidar...). Également, les échelles limnimétriques permettront de suivre les niveaux du fond de lit lors des reconnaissances terrain par les techniciens.

Il est important de coupler le plan de gestion des matériaux solides au plan de gestion de la végétation (voir ci-dessous). Cela concerne par exemple les bancs alluviaux qu'il faut maintenir en situation mobile (limiter la végétation, scarifier...).

9.2.2.2 Plans de gestion des boisements de berge

Le plan de gestion des boisements de berge et du bois mort concourt à restaurer le bon état des berges par des travaux simples sur les boisements, afin de réguler les risques hydrauliques (inondations, érosions) tout en améliorant les fonctions paysagères et écologiques du milieu.

Plusieurs types d'intervention sont possibles selon les situations : abattage d'arbres instables, élagage des branches gênantes, débroussaillage, dégagement d'embâcles dangereux, recépage, bouturage, etc.

La méthode utilisée pour définir les plans de gestion des boisements de berge et du bois mort s'appuie sur les principes suivants :

- Adapter le niveau d'entretien aux enjeux concernés, que ces derniers soient situés sur le tronçon lui-même (ex : fonctionnement hydro morphologique, incisions) sur un secteur situé en aval (ex : risque d'obstruction d'un ouvrage par des corps flottants) ou plus globalement (amélioration du fonctionnement

biologique par une gestion de boisement adaptée, préservation de milieux remarquables) ;

- Prendre en compte de manière équilibrée tous les éléments qui concourent à l'élaboration d'un plan de gestion à l'échelle de la rivière :
 - Risque hydraulique lié à l'état de la végétation et à l'encombrement du lit ou des ponts par du bois mort ;
 - Impact des incisions sur les infrastructures et habitations proches ;
 - Prise en compte du patrimoine faunistique et floristique par la préservation ou la mise en valeur du milieu naturel et des sites remarquables.

9.2.2.3 Travaux de gestion de la végétation sur le système d'endiguement

La gestion de végétation se fait par travaux d'entretien, mécaniques ou manuels, et par abattage d'arbres.

En présence de végétation boisée à différents stades de développement, une gestion planifiée peut être envisagée. En effet, une gestion au coup « par coup » peut s'avérer couteuse et peu efficace. Un plan de gestion de la végétation sera mis en place. Il permettra une gestion raisonnée et simplifiée en termes de temps, d'objectifs et de dépenses. Cet outil est appuyé sur des prescriptions sylvicoles en adéquation avec la sécurisation des digues.

Le plan de gestion de la végétation définit les objectifs et le programme de travaux pour une durée de 10 à 15 ans. Il assure des fonctions de communication, de négociation, un appui technique, écologique et financier en lien avec les différents acteurs concernés de près ou de loin par les ouvrages de protection contre les inondations.

Le plan de gestion a pour base la sectorisation et la priorisation des actions, il a pour but de :

- Diagnostiquer et cartographier la végétation, les enjeux de biodiversité et sociétaux ;
- Fixer des objectifs atteignables par la gestion /modalité de gestion mise en place
- Définir des consignes, des actions et les prioriser ;
- Définir, décrire et assurer une cohérence des actions ;
- Répartir les coûts ;
- Avoir une traçabilité des travaux effectués et à effectuer.

En sachant que la digue est colonisée par la végétation, ce qui présente un risque considérable sur la stabilité de l'ouvrage (érosion interne et glissement), il est possible de proposer les modalités et les consignes suivantes afin de diminuer la densité du boisement et rajeunir ce dernier :

- Sur la digue : coupe d'éclaircies ;
- Sur le franc-bord : diminuer la densité, le diamètre et la hauteur des arbres ;
- Sur la berge : les grands arbres sont à proscrire ; seule une végétation souple et basse est autorisée.

La végétation a été répartie selon trois types correspondant à diverses méthodes entretiens comme le présente les parties ci-après :

- **Arbres avec un diamètre de 25 cm** : l'entretien de ces individus correspond à des opérations forestières consistant à élaguer, démonter, abattre et dessoucher. L'abattage des arbres doit avoir lieu avant qu'ils n'atteignent un diamètre de 25 cm à la souche. L'abattage est suivi du dessouchage et d'une remise en état de la portion de digue concernée (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 46 : Technique de confortement de digue après dessouchage

Méthode	Position	Description
Remblaiement ponctuel	Val	Mise en place d'un remblai correctement compacté après abatage ou dessouchage.
Recharge étanche	Rivière	Mise en place d'une recharge en matériaux très peu perméables directement après l'abatage ou le dessouchage.
Coupure étanche	Parements	Mise en place de palplanches ou d'une paroi au coulis après le pourrissement des racines (maximum 10 ans après l'abatage).

- **Végétation arbustive** : La végétation arbustive pourra être conservée, mais toujours entretenue de façon à ne pas gêner l'inspection visuelle de l'ouvrage ou causer des désordres. Les opérations sont du fauchage mécanique, du débroussaillage mécanique ou manuel et de l'élagage.
- **La végétation herbacée** : Les interventions d'entretien sur ce type de végétation peuvent se réaliser par des fauchages mécanique (épareuse) lorsque le site est accessible et la surface grande. Sinon il peut être utilisé des techniques manuelles (débroussailleuse portée) lorsque la pente est importante ou qu'il y a de nombreux obstacles. Les opérations de fauche se pratiquent de façon annuelle pour les herbacées hautes et plus fréquemment en présence d'herbacée à développement rapide ou pour des besoins de surveillance (post crue, VTA, etc.).

L'entretien et le suivi de la végétation sont primordiaux les trois premières années qui suivent la plantation afin de s'assurer de la bonne reprise des plants. L'entreprise qui effectue les plantations doit délivrer une garantie de recouvrement et de reprise sur 2 à 3 ans (deux cycles phénologiques). Les arbustes défectueux seront remplacés. Les tailles nécessaires seront réalisées. Un contrôle des espèces végétales invasives (Renouée du Japon, Buddléia de David, etc.) sera effectué. Ensuite, il est important de réaliser un entretien régulier de la végétation (tous les 2 à 4 ans). Le premier entretien aura donc lieu environ 6 ans après les plantations. Il s'effectuera pendant la période de repos de la végétation. Cet entretien consiste en :

- Élagage des branches basses pour les plantations en haut de berge ;
- Coupe d'éclaircie pour favoriser la diversité et la croissance des arbres préalablement sélectionnés ;
- Dédoublage des cépées, les branches et troncs de largeur importante étant à éviter en berge de rivière ;
- Recépage des arbres morts et de la végétation vieillissante ;

- Dégagement des jeunes semis ou plants ;
- Débroussaillage des ronciers.

Il est à noter que dans le cadre des systèmes d'endiguement de Bonneville, une expertise sur la végétation a été réalisée par Arbeausolution en 2017, conduisant à l'élaboration d'un diagnostic et de mesures de gestion de la végétation spécifiques.

Le SM3A n'a pas de plan de gestion de la végétation établi par tronçon homogène, mais applique des mesures générales, qui sont adaptées par les agents en charge de la surveillance et de l'entretien des ouvrages. Ces principes de gestion sont dans ce chapitre 9.

Par ailleurs, après travaux, un suivi et un entretien de la végétation est prévu dans les trois premières années qui suivent la plantation afin de s'assurer de la bonne reprise des plants. L'entreprise qui effectue les plantations doit délivrer une garantie de recouvrement et de reprise sur 2 à 3 ans.

9.2.2.4 Travaux de réparation

Pour les travaux d'entretien et de confortement des digues du bassin versant de l'Arve, le SM3A dispose de marchés sous forme d'accords-cadres par lots géographiques. Les modalités de réalisation des différents types de travaux sont annexées aux consignes générales d'exploitation et de surveillance des ouvrages.

9.3 Procédure d'information et de communication

9.3.1 Chaîne de responsabilité

La répartition des rôles et des responsabilités dans la gestion de crise est multiple et s'applique à plusieurs niveaux :

- L'Etat responsable d'organiser la surveillance et la prévision des crues, grâce notamment au service Vigicrues ;
- Le préfet responsable de la protection civile ;
- Le Maire responsable de l'établissement du Plan Communal de Sauvegarde (PCS), décideur sur la mise en place une Réserve Communale de Sécurité Civile (RCSC), et Directeur des Opérations de Secours ; Il exerce également un pouvoir de police s'agissant de l'information préventive, la surveillance, l'alerte et la mise en sécurité des personnes ;
- Les gestionnaires d'ouvrages classés Système d'Endiguement responsables de la **conduite** des études (EDD, VTA...), de la surveillance et des travaux d'entretien ;
- Les citoyens qui doivent adopter des comportements et des réflexes adaptés ;
- La responsabilité du SM3A découle de l'exercice de la compétence transférée en matière de Prévention des Inondations (GEMAPI) et plus spécifiquement sur la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement en période de crise.

Les opérations de secours sont coordonnées sous une direction unique, assurée par les maires ou le préfet, autorités de police générale, investis de pouvoirs étendus en cas de situation d'urgence.

9.3.2 Liens avec certains acteurs spécifiques de la gestion de crise

Le service interministériel de défense et de protection civile (SIDPC) est le coordinateur principal des structures et acteurs mobilisables (dont le SM3A) sur le département durant les événements climatiques nécessitant une surveillance particulière sur les ouvrages. Il intervient pour coordonner les moyens nécessaires à la gestion de crise, en particulier dans le cadre du plan ORSEC. Le SIDPC assure la coordination entre SM3A et SDIS si besoin.

Les services communaux et intercommunaux sont des interlocuteurs de terrain identifiés dans les PCS, en contact permanent avec leur territoire. Ils assurent une surveillance de l'état des cours d'eau et des points particuliers à surveiller et constituent ainsi un maillon essentiel de la chaîne de surveillance sur le terrain.

Les services du CD74 gestionnaire du domaine routier avertissent aussi régulièrement que possible le SIDPC et le SM3A lorsque l'événement est consécutif à un dysfonctionnement d'un cours d'eau.

Le SM3A est identifié dans le plan ORSEC de la Haute-Savoie (version 2016) pour les missions suivantes :

- Gestion des cours d'eau sur les secteurs de compétences Arve, Giffre & Risse, Borne, Menoge, Haute Vallée de l'Arve : Entretien des lits, des berges, des boisements de berges et de certains ouvrages hydrauliques (DIG ou procédure d'urgence) ;
- Surveillance des digues SM3A ;
- Travaux en rivière sur cours d'eau cités et affluents ;
- Gestion des matériaux solides sur Arve et certains affluents de la Haute Vallée ;
- Interventions sur la prévention des crues et le post crue.

Une fiche contact du plan ORSEC identifie des contacts par ordre de préférence (4 contacts).

9.3.3 Organisation en cas de crise

En cas de crise, la direction des opérations (DGS et DGST), sous l'autorité du Président du SM3A, assure la direction des opérations (DO). Les relations entre la DO et les différents acteurs est détaillée au 9.5.

9.4 Moyens d'information sur les crues ou les épisodes météorologiques à risque

En tant que territoire de montagne à relief marqué, dont 60% se situe à plus de 1000 m d'altitude et 6% est englacé, le bassin versant de l'Arve subit des événements hydrométéorologiques imprévisibles et violents, rendant impossible la constitution d'un système de veille et d'alerte de crue précis et à fiabilité garantie.

9.4.1 Les limites techniques

9.4.1.1 Contribution de multiples paramètres à la survenue d'un événement météorologique et/ou hydrologique exceptionnel

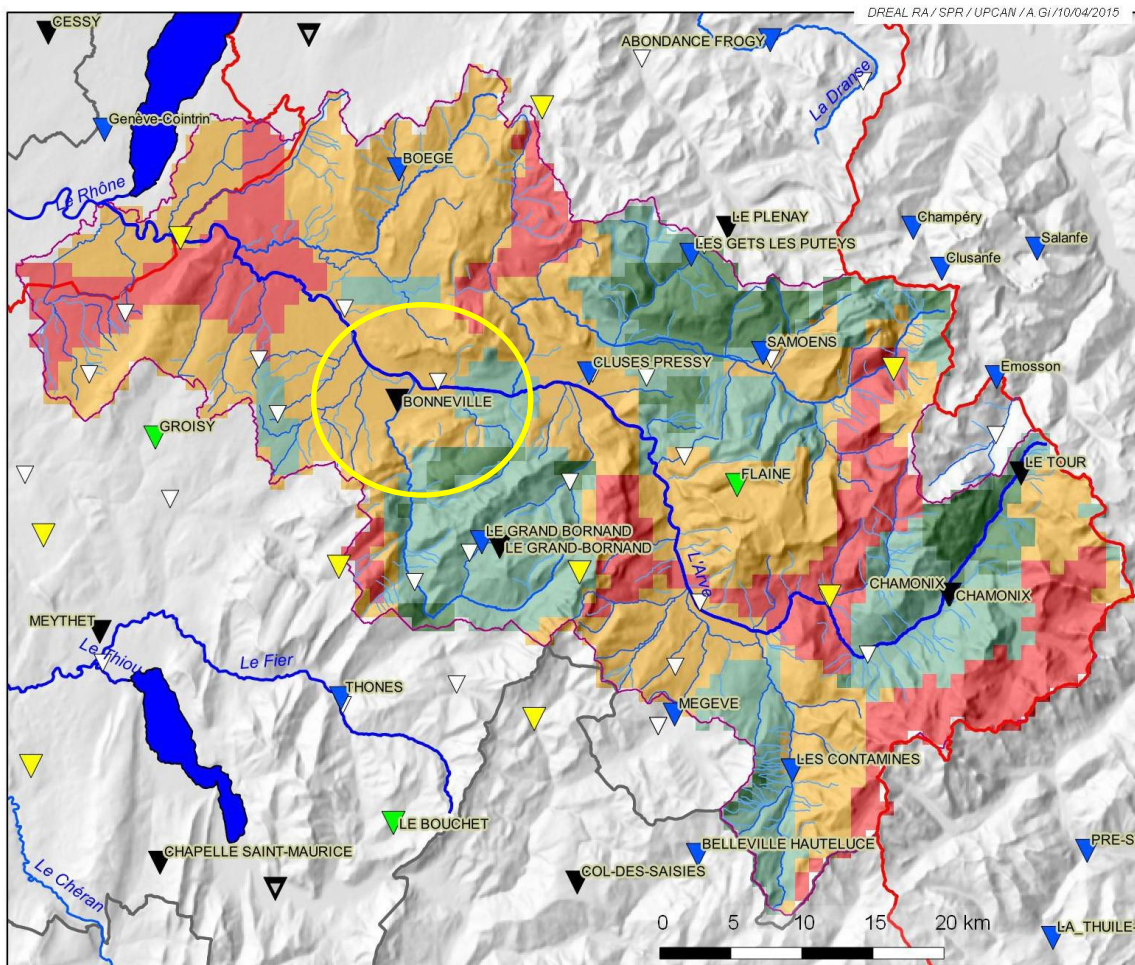
Le bassin versant de l'Arve se caractérise par :

- Un régime d'écoulement des cours d'eau fortement influencé par l'accumulation des précipitations sous forme de neige durant l'hiver, période de basses eaux, et par la fonte de cette neige au printemps, voire de la glace en été, période de hautes eaux.
- Une possibilité de fortes précipitations en début de printemps sur un manteau neigeux en cours de fonte, ce qui augmente fortement la quantité d'eau contribuant à la crue des cours d'eau.
- Un relief à forte hétérogénéité des précipitations.
- Des pentes fortes des versants montagneux entraînent des vitesses d'écoulement de l'eau importantes et génèrent une érosion très active des berges.
- Une forte variabilité des fonds des lits.
- Une forte variabilité des conditions hydrométéorologiques génératrices de crue.
- L'influence de dysfonctionnement des dérivations sous-glaciaires (telle que celle de la retenue d'Emosson)
- Une grande difficulté technique à disposer de mesures fiables et correctement réparties sur le territoire, que ce soit pour la mesure des précipitations, ou pour la mesure des hauteurs ou des débits des cours d'eau.

Toutes ces spécificités rendent délicates, et parfois impossible, la prévision des crues et des laves torrentielles. Elle s'appuie sur l'analyse experte de multiples facteurs, et reste soumise à une forte incertitude.

9.4.1.2 Couverture partielle des systèmes d'alerte météorologique ou hydrologique

La couverture du territoire en matière de stations pluviométriques n'est pas homogène, des zones restant non couvertes par le réseau « temps réel » (voir carte page suivante). De même, en matière d'observation RADAR, la couverture des radars français sur le secteur de la Haute-Savoie est relativement mauvaise, et quasiment inexistante sur le bassin de l'Arve.



Réseau temps réel

- ▼ Météo-France - Réseau existant et pérennisé (2014)
- ▽ Météo-France - Réseau existant dont la pérennisation est demandée (2014)
- ▼ Météo-France - Création validée dans le cadre de la convention Météo-France/DGPR 2011-2016
- ▼ Météo-France - Création demandée dans le cadre de la convention Météo-France/DGPR 2017-2021
- ▼ Réseau EDF/DTG ou suisse ou italien

Réseau temps différé

- ▽ Réseau climatologique d'Etat

Couverture du territoire validée au 15/05/2014

- Il n'existe pas de station à moins de 10 km en "distance 3D"
- Il existe une station à moins de 10 km en "distance 3D"
- Il existe deux stations à moins de 10 km en "distance 3D"
- Il existe plus de deux stations à moins de 10 km en "distance 3D"

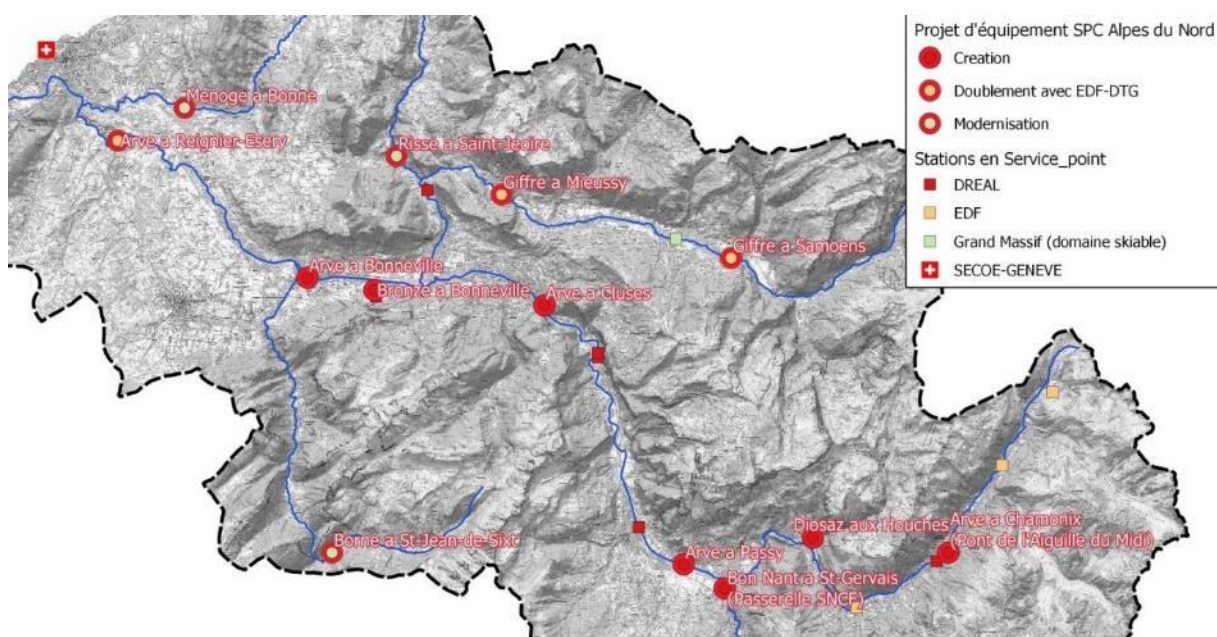
- Limite du SPCAN
- Limite du bassin versant de l'Arve
- Limite départementale

Carte extraite du rapport du Service de prévention des crues (SPC) Alpes du Nord

Le réseau de stations hydrométriques sur le bassin de l'Arve s'est étoffé au cours des dernières années, et compte actuellement 30 stations :

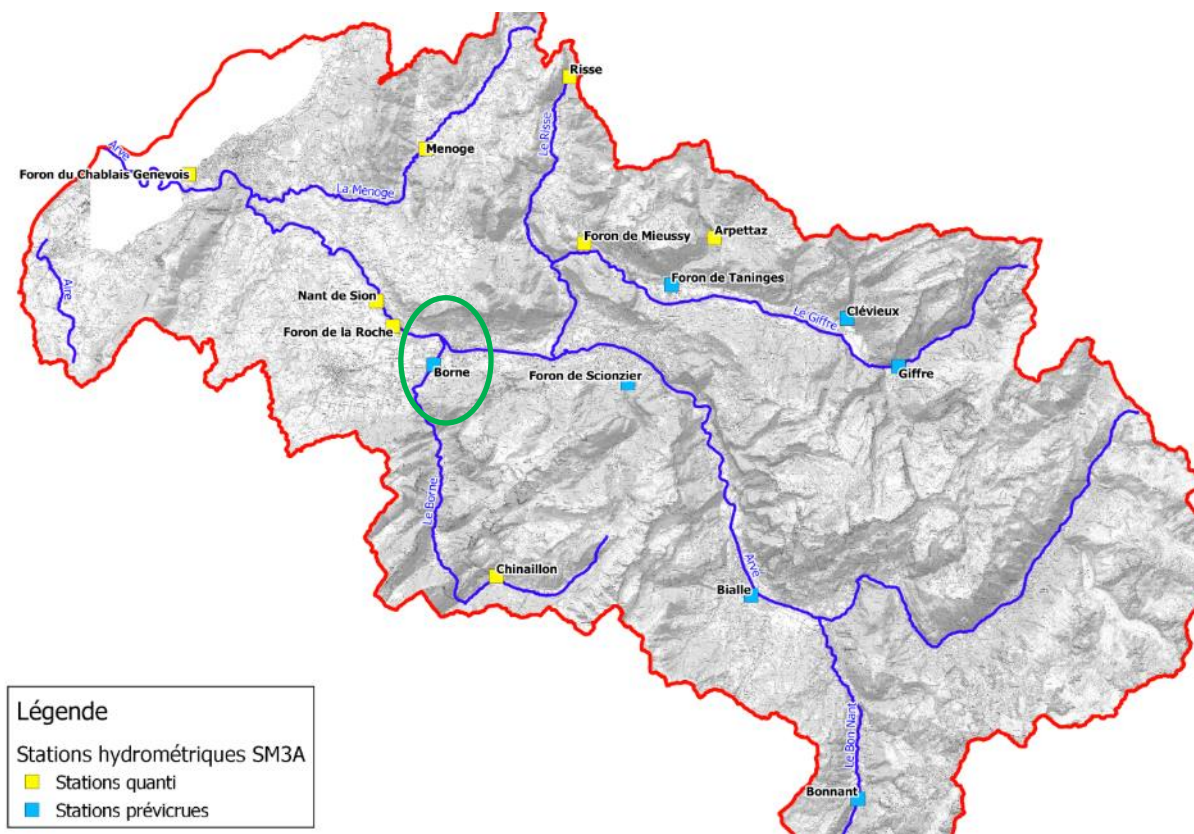
- 11 stations DREAL (pas de temps de 10-12 min)
- 2 stations EDF (pas de temps de 1 heure)
- 2 stations Canton de Genève (pas de temps de 25 min)
- 15 stations SM3A, dont 7 à vocation d'alerte en crue et 8 pour la quantification de la ressource en eau (mesure de hauteur avec courbes de tarages provisoires, pas de temps de 5 min en crue)

Le programme de renforcement du réseau DREAL-SPC depuis 2018 est encore en cours, avec notamment la station de Cluses en projet.



Renforcement du réseau hydrométrique par le Service de prévention des crues (SPC) Alpes du Nord

De manière à compléter le réseau existant ou en cours de renforcement par la DREAL sur les affluents et les têtes de bassin versant non couvertes, le SM3A a installé 15 stations entre 2018 et 2021 dont 7 stations ont un objectif de prévision des crues et d'alerte.



Réseau de stations limnimétriques installées par le SM3A entre 2018 et 2021 avec pour objectif l'alerte en crue (stations « prévicrues ») et de quantification de la ressource en eau (stations « quanti »)

9.4.1.3 Délai nécessaire pour un système d'annonce de crue efficace

Les limites techniques précédemment évoquées et les caractéristiques géographiques ne permettent pas, à la différence d'un événement purement hydraulique sur un bassin non torrentiel, de disposer de plusieurs heures pour une annonce de crue « lente ».

Pour les mêmes raisons, le SPC Alpes du Nord n'a pu, à ce jour, s'engager à opérer une annonce de crue efficace par extension du dispositif Vigicrues au bassin de l'Arve (cf. § [Vigicrues](#)) pour les cours d'eau de tête de bassin notamment, ne pouvant répondre aux critères d'éligibilité d'un temps de réponse du bassin versant drainé supérieur à 6 heures.

9.4.2 Dispositifs de veille opérés par les services de l'Etat

9.4.2.1 Dispositif d'alerte Préfecture

La préfecture relaie les vigilances météorologiques émises par Météo France. Dès qu'une vigilance météo de niveau orange est donnée, la préfecture contacte par fax ou par texto les différentes communes du territoire. Le SM3A est destinataire des alertes émises par le Service interministériel de défense et de protection civile (SIDPC).

Un protocole de transmission a été acté entre les services de l'Etat et le SM3A. Le SIDPC assure :

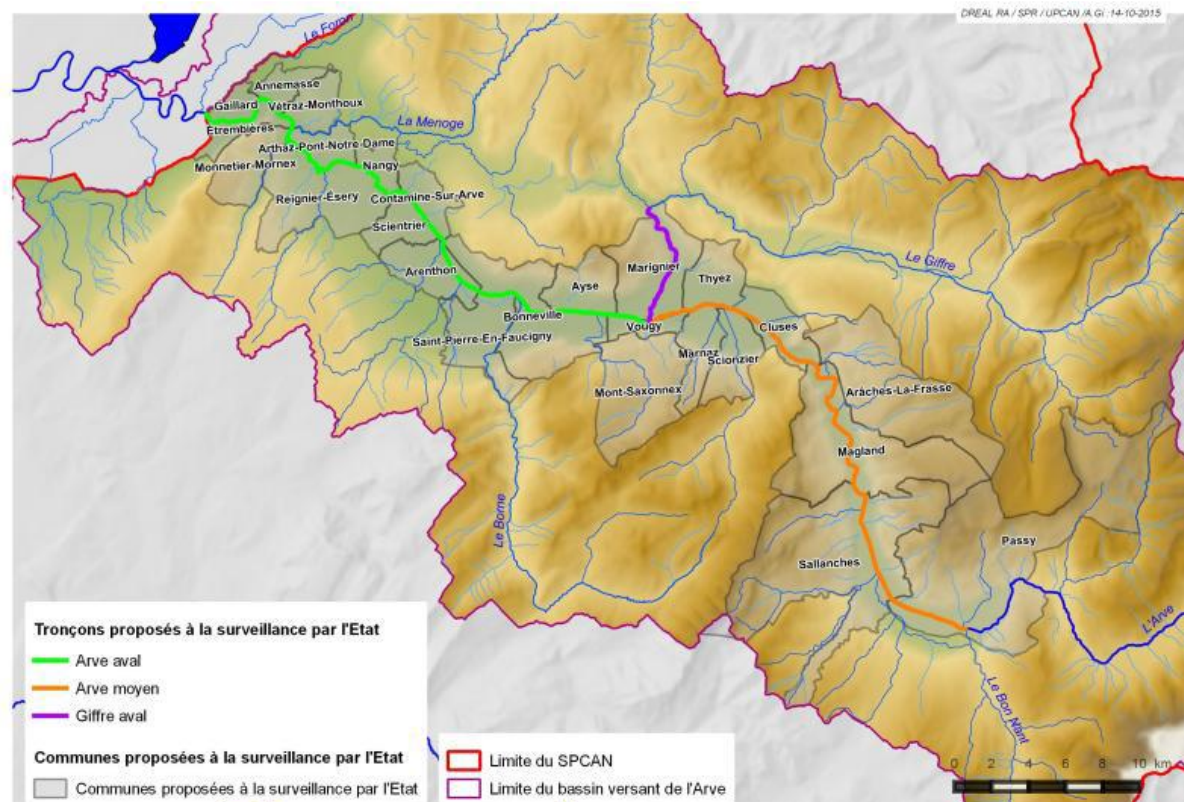
- l'envoi d'un SMS : 1 série de 4 numéros de téléphone. Appel en cascade : le premier ne validant pas la réception du SMS, le second numéro est contacté jusqu'à l'obtention d'une réponse par retour de code.
- l'envoi de Mails sur plusieurs adresses (3 adresses spécifiques + mail général SM3A)

9.4.2.2 Vigicrues

Le dispositif Vigicrues porté par le SPC Alpes du Nord est opérationnel sur l'Arve en aval de Passy (Arve médian et Arve aval) et sur le Giffre en aval de sa confluence avec le Risse (Giffre aval) depuis mars 2020.

Il est complété par un renforcement des suivis météorologique (rénovation et implantation de nouveaux radars et pluviomètres en Suisse et en France, action inscrite au contrat de Plan Etat-Région 2015-2020), et hydrométrique (création et modernisations de stations de mesure,) et d'une modélisation intégrant la partie glaciaire du bassin versant de l'Arve.

Le réseau de stations hydrométriques DREAL-SPC sur le bassin versant de l'Arve s'est étoffé au cours des dernières années. En effet, il compte aujourd'hui 12 stations dont 7 installées avant 2018 (Arve à Chamonix et Sallanches, Giffre à Marignier, Risse à St Jeoire, Bronze à Bonneville, Menoge à Bonne, Borne à St Jean de Sixt) et 5 installées depuis 2018 dans le cadre du renforcement du réseau (Arve à Passy, Bonneville et Reignier, Diosaz à Servoz, Giffre à Samoëns).



Tronçons intégrés au dispositif Vigicrue depuis 2020

Les tronçons Vigicrue actuellement opérationnels sont : Arve aval, Arve médian et Giffre aval. Les sous-bassins versant situés en amont de ces tronçons Vigicrue ne sont pas intégrés au dispositif du fait de leur temps de réponse trop faible (inférieur pour le cas de l'Arve à 6 heures). Sur ces tronçons, d'autres dispositifs portés par le SM3A prennent le relais.

Accéder au bulletin d'information local
publié le 28.09.2022 à 09h50 HL

Production de l'information au moins deux fois par jour, à 10h et 16h.

Situation par tronçon de vigilance crues :

Voir sur la carte	Nom		Vigilance	BSS
	Arc aval	+	Vert	
	Arc moyen	+	Vert	
	Arve aval	+	Vert	
	Arve médian	+	Vert	
	Drac aval	+	Vert	
	Giffre aval	+	Vert	
	Isère Haute-Combe de Savoie	+	Vert	
	Isère aval	+	Vert	
	Isère grenobloise	+	Vert	
	Isère moyenne	+	Vert	

Carte statique Carte dynamique

Interface cartographique disponible sur le site de Vigicrue avec les tronçons disponibles sur le bassin de l'Arve (<https://www.vigicrues.gouv.fr>)

Pour chaque tronçon, des seuils de débits ont été définis au droit de stations de référence, déclenchant le passage au niveau de vigilance supérieur.

Sur l'Arve Médian :

rivière		ARVE MÉDIAN				
		Station de référence : SALLANCHES				
niveau de vigilance	ARVE	crues historiques			zone de transition	
		date	hauteur	débit	hauteur	débit
					3m40 à 3m50	320 à 330 m³/s
		22 sept 1968		280 m³/s		
		26 août 2014	2m80	237 m³/s	2m70 à 2m90	230 à 250 m³/s
		1 ^{er} mai 2015	2m68	222 m³/s		
		17 juil 2011	2m51	201 m³/s	2m40 à 2m60	190 à 210 m³/s

Seuils retenus pour les changements de couleur de Vigilance Crues (tronçon Arve médian)

Sur Giffre Aval :

rivière	GIFFRE AVAL				
GIFFRE	Station de référence : MARIGNIER [Plan Séraphin]				
niveau de vigilance	crues historiques			zone de transition	
	date	hauteur	débit	hauteur	débit
Orange	22 sept 1968	4m30		4m30 à 4m50	540 à 580 m³/s
	1 ^{er} mai 2015	3m91	456 m³/s		
Yellow	23 déc 2022	3m14	293 m³/s	3m30 à 3m50	330 à 370 m³/s
	.31 mai 2010		210 m³/s à Taninges		
Green	4 janvier 2018	2m80	241 m³/s	2m60 à 2m80	200 à 240 m³/s

Seuils retenus pour les changements de couleur de Vigilance Crues (tronçon Giffre aval)

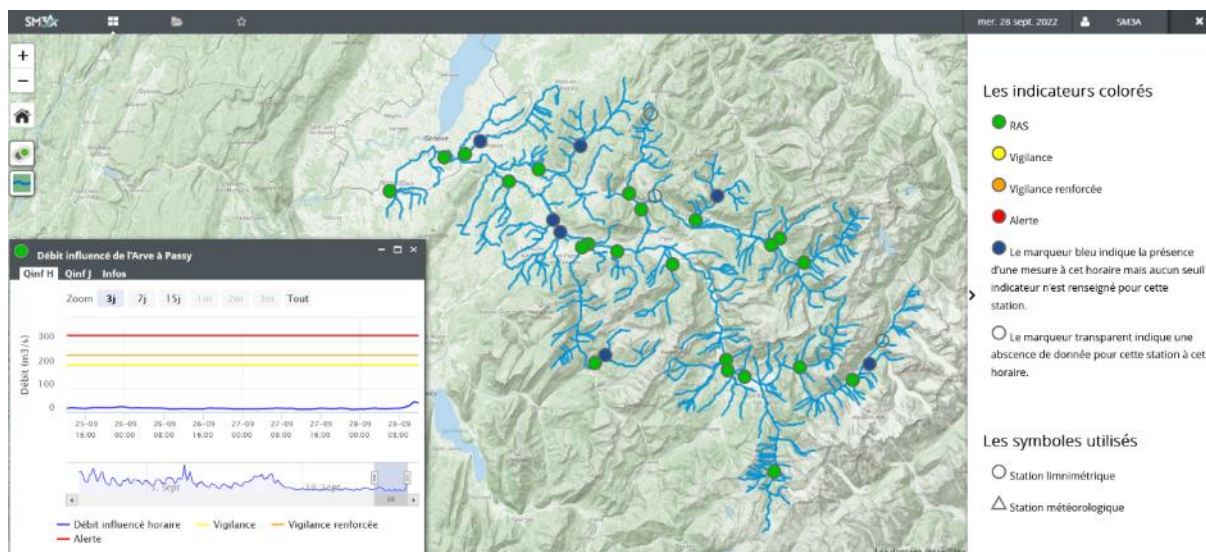
9.4.2.3 Outils de prévision du SM3A

Pour répondre à son besoin de suivi des débits des cours d'eau et d'alerte en crue, le SM3A a engagé en 2020 un marché avec EDF pour le développement d'un outil de prévision des crues et de supervision des stations hydrométriques du bassin versant.

Le superviseur aujourd'hui opérationnel permet de visualiser l'ensemble des mesures de débit existantes sur le bassin versant, ainsi que les stations pluviométriques EDF. En plus des 11 stations hydrométriques DREAL_SPC, les données de 2 stations EDF et de 2 stations du canton de Genève sont également disponibles. Par ailleurs, les stations du SM3A sont également affichées (15 stations avec un objectif de prévision des crues (7 stations) et de suivi quantitatif (8 stations)).

Des prévisions de débits sont également disponibles au droit de 5 stations :

- L'Arve à Chamonix et Sallanches
- Le Giffre à Samoëns
- Le Borne à St-Jean-de-Sixt
- Le Foron du Chablais Genevois



Superviseur sur interface web produit par EDF pour le compte du SM3A

Par ailleurs, EDF envoie plusieurs fois par semaine au SM3A un bulletin hydrométéorologique spécifique à son territoire, décrivant l'évolution de la situation météo pour les jours à venir (précipitations, température et réaction attendue des principaux cours d'eau).

Une astreinte téléphonique 7j/7 et 24h/24 est également proposée en cas de situation problématique.

Bulletin émis le mercredi 28 septembre 2022 à 12:17
Prochain bulletin le jeudi 29 septembre 2022

Bulletin quotidien SM3A

SITUATION ET ÉVOLUTION MÉTÉOROLOGIQUE

La vaste système dépressionnaire centré dorénavant sur le Bénétux est au cœur de son action sur les Alpes aujourd'hui. Une vague pluvieuse plutôt conséquente va donc concerner nos secteurs. Le système étant orographique, les cumuls pouvant être conséquents par endroit avec une LPIH oscillant autour de 2200 m. La dépression va ensuite s'étirer et se disperser progressivement jeudi et le flux va basculer en ouest vendredi et nos secteurs resteront en bordure d'une dépression venue d'Angleterre dont les principaux effets seront cantonnés au nord de nos secteurs samedi (à confirmer vu la versatilité des modèles météo pour cette échéance). Le suite s'accorde sur le retour d'une poussée anticyclonique donc sec et plus lumineux.

AUJOURD'HUI : ...très maussade...
Les précipitations seront soutenues mais modérées quasiment toute la journée dans une ambiance un peu radoucie avec LPN autour de 2000-2200 m. On attend jusqu'à 50-70 mm sur la plupart des bassins des Alpes du Nord (belle orographie) et Ain/Jura ainsi que 30-40 millimètres sur la Rhin. Le cumul seront plus sobres sur les bassins les plus au sud (Drac ainsi que le Vercors) avec entre 20 et 30 mm. La haute Maurienne sera un peu oubliée. Hydratilité en forte hausse dès cet après-midi.

DEMAIN : ...retour progressif du sec...
Jeudi: Les précipitations de la nuit se dispersent progressivement dans la matinée et concernent les secteurs les plus au Nord et les Alpes Suisses. De belle pointes de crues sont attendues au petit matin. La couche neigeuse devient conséquente en haute-montagne (au dessus de 2500m environ) au terme de ces derniers jours de septembre bien humides.

TENDANCE ULTÉRIEURE : ...Embellie brièvement interrompue par un petit passage pluvieux samedi...
Vendredi: belle embellie sous un ciel partagé. Hydratilité en baisse. Températures fraîches pour la saison.
La suite: Samedi Une nouvelle dépression devrait s'échouer sur le nord de nos secteurs (Arve / Fier / Ain-Jura) et occasionner à nouveau de belles averses. Le sud restera en marge (incertain à confirmer dans le prochains bulletin). Par contre, la suite s'accorde sur un retour durable de conditions sèches.

Mentions spécifiques :

Probabilité de dépassement des seuils :

Risque	50%	FORT RISQUE
0% (sauf en cas de crues particulières)		100%

PRÉVISION DES PLUIES ET DES DÉBITS

Précipitations probables (mm)

Régions	J 08		J+1 08	
	à J+1 0h	à J+2 0h	à J+1 0h	à J+2 0h
Arve	40-70	5-15		
Fier	30-50	5-15		
Tarentaise-Vanoise	20-40	2-5		

Prévision des débits moyens (journaliers) (m³/s)

Bassins	J-1		J		J+1	
	Q obs	Q prévu	Q obs	Q prévu	Q obs	Q prévu
Arve à Arthaz (1650 km ²)	32	42	42	70		
Fier à Vallières (1300 km ²)	20	40	32			
Arve à Chamonix (199 km ²)	5.1	11	12			
Giffre à Samoëns (Pont du Giffre) (195 km ²)	8.4	13	22			
Arve à Passy (514 km ²)	13	25	40			
Borne à Saint-Jean de Sixt (85 km ²)	0.6	3.5	4.5			
Form du Chablais à Gaillard (38 km ²)	0.0	1.2	1.0			

† : localement plus, * : estimé, ** : station défaillante, Italiques : suivi particulier

ALTITUDE DE L'ISOTHERME 0°C (m)

Qm	Aujourd'hui		Demain	
	1500	2100	1500	2100
				2000

Exemple de bulletin hydrométéorologique produit plusieurs fois par semaine pour le SM3A

Sur le même principe que celui de Vigicrue, le SM3A a défini des seuils de débits associés à des niveaux de Vigilance, avec des couleurs (jaune, orange et rouge). En cas de prévision de dépassement de ces seuils, EDF appelle directement le téléphone d'astreinte du SM3A. Par ailleurs, le superviseur web SM3A permet de visualiser les points de mesure pour lesquels des seuils de vigilance sont dépassés (changement de couleur).

9.4.2.4 Dispositif transitoire Arve médian – Arve aval – Giffre aval

Suite aux événements de mai 2015, la Préfecture de Haute-Savoie a souhaité mettre en place un dispositif transitoire d'annonce des crues, qui s'appuie sur les stations de surveillance de la DREAL, supports de dispositif Vigicrues :

Tronçon	Limite amont	Limite aval	Stations de référence
Arve Médian	Passy confluence Arve - Bon Nant	Marignier : confluence Giffre-Risse	Sallanches (DREAL)
Giffre aval	Marignier : confluence Giffre-Risse	Marignier : confluence Giffre- Arve	Marignier (DREAL)
Arve aval	Marignier : confluence Giffre- Arve	Gaillard : Arve à la frontière Suisse	Arthaz-Pont-Notre-Dame (EDF)

Figure 133 : Station de référence par tronçon de l'Arve

Deux niveaux d'alertes sont définis sur ces trois stations :

- **La surveillance renforcée** est assurée par le SPC Alpes du Nord qui s'appuie sur les prévisions quantitatives (cumul de précipitations en 24 h) pour les trois jours à venir (J à J+2) sur des zones hydrométéorologiques homogènes.
Lorsque le cumul de pluie prévisionnel dépasse 40 mm sur 24h, le prévisionniste complète son analyse, notamment avec la limite pluie-neige, ainsi qu'avec les niveaux d'eau mesurés.
Il peut décider de passer en surveillance renforcée, et envoie par mail à la Préfecture des éléments d'informations, avec copie à la DDT et au SM3A.
- **L'alerte** est assurée par le SPC Alpes du Nord et s'appuie sur les éléments suivants, correspondant à une crue quinquennale :
 - Arve à Sallanches : Alerte à 200 m³/s (h = 2.5 m) ;
 - Giffre à Marignier : Alerte à 200 m³/s (h = 2.60m) ;
 - Arve à Arthaz : Alerte à 530 m³/s.

Si un des niveaux est atteint, le SPC alerte le cadre d'astreinte du SIDPC. Le Préfet, sous-Préfet ou SIDPC décide de déclencher l'alerte « crue de l'Arve » et diffuse un message pré-formaté vers la DDT, le SM3A et les communes concernées.

En complément, le SM3A a missionné EDF en 2021 en tant que prestataire extérieur pour une mission de prévision des débits de crue sur les têtes de bassin et principaux affluents (Arve amont, Giffre amont, Borne et Foron du Chablais Genevois). Il l'assiste également dans la prévision des évolutions de la situation hydrométéorologique (production d'un bulletin dédié 3 fois par semaine).

9.4.3 Stations hydrométriques

L'Arve possède cinq stations hydrométriques de mesures, le Borne en possède trois dont deux avec des résultats exploitables. Elles sont référencées ci-après.

Tableau 47 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO

Nom de la station	Code	Gestionnaire	Superficie du bassin versant (km ²)	Altitude	Hauteur - données disponibles	Débits - données disponibles
L'Arve à Chamonix-Mont Blanc	V0144010	DREAL	205	1020	1981-2018	1936-2018
L'Arve à Sallanches	V0154010	DREAL	514	535	1979-2018	1965-2018
L'Arve [le Nant d'Orlier] à Magland [Chez Party]	V0056410	DREAL	-	496	2011-2018	2011-2018
L'Arve [le Nant du Crêt] à Magland [Chez Gaudy]	V0056510	DREAL	-	495	2014-2018	2014-2018
L'Arve à Arthaz-Pont-Notre-Dame	V0222010	EDF	1664	410	-	1961-2015
Le Borne à Saint-Jean-de-Sixt	V0205420	DREAL	65	882	1980-2018	1964-2018
Le Borne à Saint-Laurent-les-Bains	V5045810	EDF	63	617	-	1969-2015
Le Borne à Saint Pierre en Faucigny (nommé par erreur Saint Pierre en Rumily)	-	-	142		-	1948-1968

Les stations de référence sur la zone d'étude seront :

- Pour l'Arve, la station de Sallanches située à une trentaine de kilomètres en amont de Bonneville ;
- Pour le Borne, la station de Saint-Jean-de-Sixt située à une vingtaine de kilomètres en amont de Bonneville.

9.4.4 Astreinte

Depuis octobre 2018, le SM3A a mis en place des astreintes de sécurité ou de direction, mobilisables en cas de dangers sur les personnes et les biens liés aux intempéries et à leurs incidences sur les cours d'eau du territoire. Elles peuvent être déclenchées durant toute l'année, hors temps de travail et concernent les agents techniques du SM3A.

Les agents concernés sont en premier lieu les techniciens et adjoints techniques et en second lieu les ingénieurs en fonction des nécessités. Les agents en astreinte ont à leur disposition un véhicule professionnel du SM3A, doté d'une caisse de crise et d'un téléphone professionnel.

Concernant les astreintes de direction (personnel d'encadrement pouvant être joint directement par l'autorité territoriale en dehors des heures d'activité normale du service afin de prendre les mesures et les dispositions nécessaires), les agents pouvant être concernés sont : le responsable des opérations de crises et les membres de l'équipe de direction ou responsables de pôle.

Les agents concernés sont susceptibles d'intervenir sur l'ensemble du territoire, sur tous types de cours d'eau et d'ouvrages en fonction des nécessités, et ne sont donc pas exclusivement dédiés à la surveillance de systèmes d'endiguement.

9.5 Consignes de surveillance des ouvrages en période de crise

9.5.1 Chaîne de responsabilité et rôle des acteurs en gestion de crise

9.5.1.1 Chaîne de responsabilité

La répartition des rôles et des responsabilités dans la gestion de crise est multiple et s'applique à plusieurs niveaux :

- ✓ L'Etat responsable d'organiser la surveillance et la prévision des crues, grâce notamment au service Vigicrues ;
- ✓ Le Préfet responsable de la protection civile ;
- ✓ Le Maire responsable de l'établissement du Plan Communal de Sauvegarde (PCS), décideur sur la mise en place une Réserve Communale de Sécurité Civile (RCSC), et Directeur des Opérations de Secours ; Il exerce également un pouvoir de police s'agissant de l'information préventive, la surveillance, l'alerte et la mise en sécurité des personnes.
- ✓ Les gestionnaires d'ouvrages classés Système d'Endiguement responsables de la **conduite** des études (EDD, VTA...), de la surveillance et des travaux d'entretien ;
- ✓ Les citoyens qui doivent adopter des comportements et des réflexes adaptés.

La responsabilité du SM3A découle de l'exercice de la compétence transférée en matière de Prévention des Inondations (GEMAPI) et plus spécifiquement sur la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement en période de crise.

Le SM3A se doit de :

- Assurer une surveillance adéquate des ouvrages en déployant les moyens humains suffisants ;
- Etablir une véritable chaîne d'information pour alerter les décideurs compétents en matière de sécurité publique ;
- Etre capable d'agir en urgence sur ces ouvrages pour une remise en état ou résorption des désordres si et seulement si, les travaux engagés n'aggravent pas le risque ;
- Assurer la sécurité de ses équipes sur le terrain ;
- Assurer les réparations nécessaires en post-crise.

Les opérations de secours sont coordonnées sous une direction unique, assurée par les maires ou le préfet, autorités de police générale, investis de pouvoirs étendus en cas de situation d'urgence.

9.5.1.2 Liens avec certains acteurs spécifiques de la gestion de crise

Le service interministériel de défense et de protection civile (SIDPC) est le coordinateur principal des structures et acteurs mobilisables (dont le SM3A) sur le département durant les événements climatiques nécessitant une surveillance particulière sur les ouvrages. Il intervient pour coordonner les moyens nécessaires à la gestion de crise, en particulier dans le cadre du plan ORSEC. Le SIDPC assure la coordination entre SM3A et SDIS si besoin.

Les services communaux et intercommunaux sont des interlocuteurs de terrain identifiés dans les PCS, en contact permanent avec leur territoire. Ils assurent une surveillance de l'état des cours d'eau et des points particuliers à surveiller et constituent ainsi un maillon essentiel de la chaîne de surveillance sur le terrain.

Les services du CD74 gestionnaire du domaine routier avertissent aussi régulièrement que possible le SIDPC et le SM3A lorsque l'événement est consécutif à un dysfonctionnement d'un cours d'eau.

Le SM3A est identifié dans le plan ORSEC de la Haute-Savoie (version 2016) pour les missions suivantes :

- Gestion des cours d'eau sur les secteurs de compétences Arve, Giffre & Risse, Borne, Menoge, haute Vallée de l'Arve : Entretien des lits, des berges, des boisements de berges et de certains ouvrages hydrauliques (DIG ou procédure d'urgence)
- Surveillance des digues SM3A
- Travaux en rivière sur cours d'eau cités et affluents
- Gestion des matériaux solides sur Arve et certains affluents de la Haute Vallée
- Interventions sur la prévention des crues et le post crue

Une fiche contact du plan Orsec identifie des contacts par ordre de préférence (4 contacts).

9.5.2 Détails et processus de décision du dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise

Le dispositif existant s'appuie sur des procédures en cascade :

- Une veille quotidienne ;
- Une surveillance soutenue ;
- Une direction des opérations ;
- Une surveillance terrain ;
- Un dispositif d'intervention en gestion de crise ;
- Un dispositif d'intervention post-crise ;
- Un dispositif de sortie de crise (dresser un bilan).

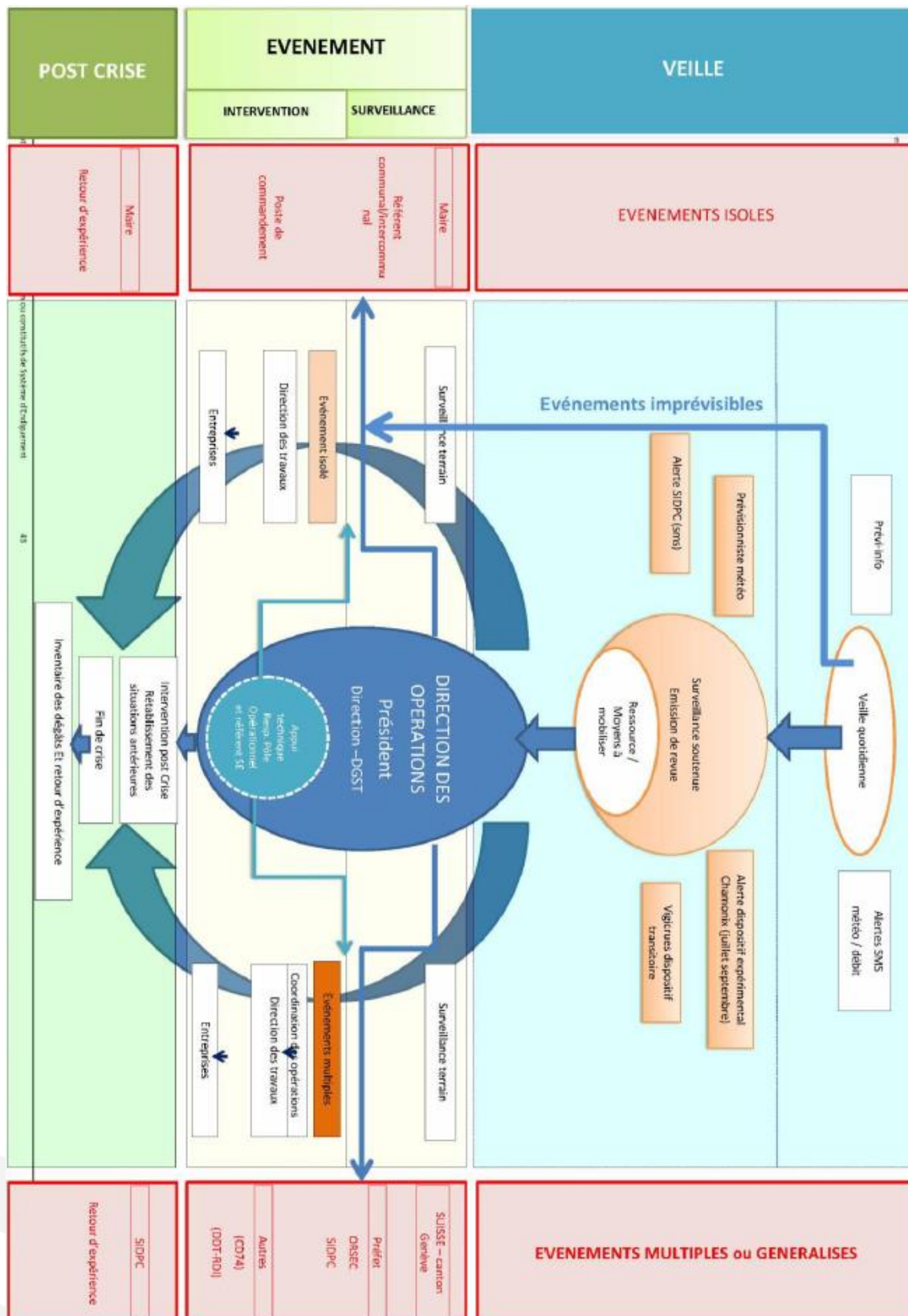


Figure 134 : Dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise

9.5.2.1 Une veille quotidienne

Une veille est assurée quotidiennement par l'ensemble des agents techniques du SM3A.

- Vigicrues par le SPC alpes du nord ;
- Service de prévision météorologique et hydraulique en temps réel (abonnement « Hydrique »).

Outre ces dispositifs, la veille quotidienne s'appuie également sur les réseaux de mesure pluviométrique et hydrométrique et sur différents sites internet notamment Suisse.

Le SM3A, par retour d'expérience sur les crues passées, a défini des seuils de mise en vigilance par cours d'eau pour différents types ou combinaison de paramètres (prévision de pluviométrie, prévision d'évolution de l'isotherme °C, hauteurs d'eau mesurées...).

9.5.2.2 Surveillance soutenue des évolutions météorologiques et hydrologiques

Quand nécessaire, la Direction active une surveillance plus soutenue de l'évolution météorologique et des niveaux hydrologiques des cours d'eau. Cette surveillance est assurée par le pôle prévention des inondations avec l'appui du responsable du pôle opérationnel. Cette surveillance s'appuie sur les mêmes outils que la veille quotidienne. Elle complète également son analyse en faisant appel aux services d'un prévisionniste.

A ce stade, la Direction et les responsables de pôles établissent la liste des ressources humaines pouvant être disponibles, leur affecte les véhicules opérationnels, et informe les agents concernés et le Président d'un éventuel événement.

9.5.2.3 Direction des opérations et communication entre les intervenants

En fonction de l'évolution défavorable des conditions météorologiques, la direction (DGS et DGST), sous l'autorité du Président du SM3A, assure la direction des opérations (DO).

En fonction des délais impartis pour mettre en œuvre les moyens du SM3A, la DO est soit restreinte, soit élargie. La DO élargie est composée :

- Du Président du SM3A, responsable de la DO. Il est en relation avec les élus et le préfet. En fonction de la liste des agents disponibles établis précédemment par la Direction, le Président peut suspendre les congés du personnel concerné, il met en situation « gestion de crise » l'ensemble des agents concernés : plage horaire travaillée allongée ;
- De la direction DGS, qui coordonne les moyens et le déploiement des équipes sur le terrain. Elle est également en relation avec le SDIS, SPC, le canton de Genève et tous autres services de secours. Elle assure la remontée d'information auprès du SIDPC (points de situation réguliers) et est le seul interlocuteur direct. La direction assure le suivi de l'évolution météorologique et hydrologique et tient la main courante des événements ;
- Du DGST, responsable du pôle « prévention des inondations », assurant le rôle de cadre technique des agents de terrain. Il réceptionnera leurs appels et apporte l'expertise technique des interventions à distance et arbitre avec la Direction et le Président si besoin les choix retenus d'intervention. Il met en astreinte et coordonne également les entreprises pour les interventions. Il veille à la sécurité des agents sur le terrain. Le responsable du pôle peut occasionnellement assurer un renfort sur le terrain sur des événements de grande ampleur ;
- De la direction DGA pour suppléer au DGS ou DGST en cas d'absence ;

- En fonction de l'ampleur, un appui technique peut être assuré soit par le responsable du pôle opérationnel ou par le référent du service « système d'endiguement » qui assureront un soutien logistique au cadre technique (surveillance de l'évolution des conditions climatiques et hydrologiques, tenue d'une main courante...) et pourront renforcer les équipes sur le terrain.

Il est à noter qu'actuellement, les postes de DGS et de DGST sont confondus car ils sont assurés par la même personne. Cette dernière est responsable du pôle « prévention des inondations ».

La DO est située physiquement dans les locaux du SM3A à Saint Pierre en Faucigny disposant de l'ensemble des éléments papiers et informatiques pour appliquer les consignes du présent document. Les dossiers d'ouvrage y sont stockés.

9.5.2.4 Surveillance terrain

Une fois la DO en place, elle active la surveillance sur le terrain en déployant les moyens humains.

Les agents de terrain surveillent les points de vigilance spécifiques de leur territoire et retransmettent l'évolution sur le terrain au cadre technique en cas de DO élargie ou à la Direction en cas de DO restreinte.

En cas de désordres observés, l'agent évalue :

- l'importance du désordre ;
- son évolution ;
- la nécessité de suivre à un pas de temps donné ce désordre

Les agents de terrain peuvent participer à des Postes de commandements sous la responsabilité des Maires ou du Préfet. Dans ce cas de figure, toute décision d'intervention du SM3A sera au préalable validée par la DO.

Les agents de terrain mis en situation de « gestion de crise » n'assureront que très ponctuellement une surveillance nocturne. Pour des situations d'envergure (interventions nocturne, forte pluviométrie...) et sur décision de la DO, les agents techniques peuvent être accompagnés en binôme dans les véhicules par des collaborateurs du SM3A, afin de réduire les risques inhérents aux travailleurs isolés et faciliter les transmissions de données.

9.5.2.5 Ressuyage de la zone protégée

La commune de St-Pierre-en-Faucigny dispose de réseaux d'eaux pluviales et unitaires denses et bien réparties sur la zone protégée. Ces derniers se déversent dans l'Arve.

Par ailleurs, ces réseaux d'eaux pluviales existants serviront pour le ressuyage de la zone protégée.

9.5.2.6 Travaux d'urgence

Le SM3A fera état de l'article R214-44 du code de l'environnement pour engager des travaux d'urgence. Il peut s'agir d'empêcher la formation d'une brèche dans les ouvrages classés Système d'Endiguement.

Le préfet de la Haute Savoie, ainsi que la SIDPC seront avertis par la direction des opérations DO au préalable.

Le SM3A dispose en interne de moyens d'ingénierie qui permettront de suivre les opérations d'urgence.

9.5.2.7 Modalité de mise en œuvre des fins d'alerte

Sur la base des informations délivrées par le SPC, le SIDPC ou le constat du SM3A sur le terrain, la direction des opérations organise la fin des interventions ou de la surveillance.

Elle peut :

- Soit passer en fin d'alerte par secteur concerné dans la mesure où la durée de la décrue s'annonce sur certains cours d'eau ;
- Soit lever l'alerte généralisée dans la mesure où elle estime définitif le retour à la normale, sans risque d'une reprise du phénomène.

La fin de l'alerte conduit à :

- Notifier la levée de l'alerte aux entreprises ;
- Engager la mise en œuvre des consignes post-crue ;
- Avertir le service de la préfecture.

Attention, une fin d'alerte peut se caractériser par une surveillance maintenue pendant quelques jours afin de confirmer l'absence de désordre à la décrue.

9.5.2.8 Rapport de crue

Une note de synthèse sur le déroulement de la crue sera réalisée en interne par le SM3A et transmis conformément à la réglementation en vigueur dans les meilleurs délais au service de contrôle pour toute crue supérieure à la décennale, dès le tronçon concerné.

9.5.3 Visites post-crue

9.5.3.1 Objet

La préparation, l'organisation et la conduite de l'inspection visuelle post-crue de la digue relèvent du service gestionnaire des ouvrages. Cette visite doit se faire dans les meilleurs délais après la crue.

En cas de crue majeure couvrant un nombre important de digue, le SM3A pourra faire appel à un bureau d'études pour réaliser ces visites.

Avant l'inspection post-crue, tous les documents topographiques, les comptes rendus des précédentes visites et les clichés doivent être réunis.

Les constats effectués lors de ces inspections visuelles se font sur une fiche semblable à celle utilisée lors des visites annuelles (en annexe XV). Un dossier photographique des désordres est nécessaire avec sa légende et sa localisation ainsi que des photos d'ensemble.

On notera que d'autres phénomènes peuvent nécessiter le déclenchement des visites post-crue :

- Les accidents nautiques (choc d'embarcation sur les perrés, échouage, etc.) ;
- Les engravements important du lit mineur ;
- **Les séismes de magnitude supérieure à 5 sur l'échelle de Richter dans un rayon de moins de 100km.**

Ces visites post-crue permettent également de faire l'inventaire de l'ensemble des dégâts sur le territoire et de prioriser les interventions post-crue.

9.5.3.2 Déroulement

Relevé de la laisse de crue :

Pour chaque tronçon de rivière concerné par la crue, il sera procédé à un relevé des laisses de crue par un géomètre dans les 24h à 48h suivants la crue. Ces levés nécessitent un niveau de précision optimum.

Le niveau sera au minimum relevé au droit de tout ouvrage singulier (ponts, échelles,...). Il sera important de faire le distinguo entre le niveau de charge et le niveau d'écoulement.

Le niveau sera – à minima – relevé systématiquement aux échelles en place, de façon à permettre une comparaison avec les relevés des années précédentes. Dans le cas où le secteur concerné ne comporte pas d'échelle, le niveau sera relevé sur des points de repères fixes (ponts, singularité hydraulique, ...).

Visite des digues :

Une fois l'alerte levée, certaines personnes seront affectées à la surveillance des digues sensibles à la décrue en particulier celles qui sont identifiées comme sensibles à la décompression des matériaux.

Les désordres apparents seront relevés à l'aide d'une fiche de relevé de type VTA dans la mesure du possible : brèche, embâcle, érosion du talus ou pied de digues, indice de fuite, glissement du talus, ...

Chaque désordre observé sera à minima localisé et pris en photo. En cas de désordre mettant en péril l'intégrité de la digue, le personnel de terrain ou le prestataire désigné contactera immédiatement le Poste de Commandement de la surveillance des Ouvrages du SM3A.

Cette surveillance pourra se faire sur plusieurs jours. La localisation des désordres sera faite en utilisant le système de repérage mis en place par le SM3A (bornes ou marquage au sol tous les 100 ou 200 mètres) et à l'aide d'un GPS ou à défaut d'une roulette ou d'un profil.

9.5.3.3 Compte-rendu des visites

La visite post-crue donnera lieu à un compte-rendu de la part du géomètre et des surveillants de digues.

Ce rapport reprendra la totalité des éléments significatifs de la visite de surveillance :

- Dates de la visite post-crue ;
- Composition des équipes de surveillance ;
- Zone de surverse sur les digues ;
- Localisation des désordres (indices de fuite, embâcles, arbres basculés, glissement...);
- Inspection des organes secondaires,
- Photos,
- Relevé des laisses de crue.

Le compte rendu de l'inspection visuelle post-crue servira de support pour les événements à venir et permettra de justifier des levés topographiques dans les secteurs où les désordres sont importants ou encore des reconnaissances complémentaires à la pelle mécanique.

Les désordres (tels que embâcle, érosion du talus ou pied de digue, indice de fuite, glissement du talus,...) relevés sur le terrain par le personnel du SM3A sont renseignés sous SIRS Dignes avec leur photo.

Les relevés de laisse de crue sont également saisis sous SIRS Digues.

9.5.3.4 Signalement des incidences et EISH

En fonction du constat des désordres, le SM3A reprend la procédure de déclaration des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) décrite précédemment.

9.5.4 Interventions post-crue

L'intervention post-crue s'échelonnent sur plusieurs mois et seront priorisées en fonction du degré de l'EISH, des risques supportés par la zone protégée, du risque de réplique de l'événement, de la complexité des travaux, des accès et des moyens matériels et humains disponibles.

Les interventions consisteront pour l'essentiel à remettre en état de fonctionnement les ouvrages.

9.6 Analyse des PCS

Sur le PCS de la commune de Bonneville, différents niveaux d'intervention sont définis. Les notions d'Alerte, inondation et après alerte, sont à mettre en relation avec les stades définis par le gestionnaire des endiguements. Des points d'attention sont décrits (débordements, inondations potentielles, etc.). Dans la plupart des cas, ils sont cohérents avec l'analyse de risque. Cependant un croisement point par point semble nécessaire pour uniformiser les actions en cas de crue.

Que doit faire la population ?

DÈS l'alerte :

- Se tenir informé de l'évolution de la situation (radio, mairie),

PREVOIR LES GESTES ESSENTIELS

- Fermer les portes et fenêtres,
- Couper le gaz et l'électricité,
- Commencer à déplacer les objets de valeur et les produits polluants.





PENDANT l'inondation :

- Se tenir informé de la montée des eaux, (radio, mairie,...),
- Déplacer les objets de valeurs et les produits polluants,
- Éviter de rester bloqué (quitter les lieux dès que l'ordre est donné).
- Ne pas tenter de franchir un cours d'eau à pied comme avec un véhicule.

APRÈS :

- Aérer et désinfecter les pièces,
- Chauffer dès que possible,
- Ne rétablir l'électricité que sur installation sèche,
- S'assurer que l'eau est potable (mairie),
- Faire l'inventaire des dommages.

LES REFLEXES QUI SAUVENT

		
<i>Fermez les portes, les aérations</i>	<i>Coupez l'électricité et le gaz</i>	<i>Montez à pied dans les étages</i>
		
<i>Écoutez la radio pour connaître les consignes à suivre</i>	<i>N'allez pas chercher vos enfants à l'école : l'école s'occupe d'eux</i>	<i>Ne téléphonez pas : libérez les lignes pour les secours</i>

• Ne pas tenter de franchir un cours d'eau à pied comme avec un véhicule.

EN CAS D'INONDATION BRUTALE




		
<i>Fuyez immédiatement</i>	<i>Gagnez un point en hauteur</i>	<i>N'allez pas chercher vos enfants à l'école : l'école s'occupe d'eux</i>

Figure 135 : Consignes de sécurité en cas de débordements

9.7 Adéquation des moyens mis en place pour la surveillance et l'entretien courant avec l'objectif de protection garanti

9.7.1 Entretien, surveillance et exploitation

Actuellement, le SM3A s'acquitte de l'ensemble des visites de surveillance régulières liées à la gestion de son parc de digues (visites de surveillances...). Cependant, les ouvrages actuels présentent des dégradations diverses, voire évolutives.

Le programme de travaux lancé par le SM3A vise à conforter dans l'intégralité le système d'endiguement en rive gauche du Borne. Une fois les travaux achevés, les digues seront donc conformes vis-à-vis des préconisations d'entretien (et notamment de la végétation). Le plan de gestion de la végétation mis en place par le SM3A sur son territoire devra intégrer les digues du Borne, pour pérenniser son niveau de protection.

En cas d'alerte, les ouvrages du système d'endiguement ne nécessitent pas de manœuvres spécifiques.

9.7.2 Veille et information

Le SM3A a souscrit un abonnement à un service de prévisions météorologiques et hydrologiques qui lui permet d'anticiper jusqu'à 15 jours en amont les événements climatiques pouvant être à l'origine de crues sur son territoire. Des seuils de veille et d'alerte ont été définis en plusieurs points du territoire. La veille climatique est donc effective, fiable (dans les limites des modèles hydrométéorologiques mis en œuvre).

En revanche, la couverture du bassin en stations de mesures (hauteur / débit) fiables et en temps réel reste faible. Cependant, le SM3A s'est engagé dans une démarche de densification et de fiabilisation de son réseau. Une fois ces stations mises en place, et raccordées en temps réel au service de prévision précité, le système global sera opérationnel.

9.7.3 Alerte et mise en sécurité

En période de crise, le SM3A est en lien avec l'ensemble des autorités et des services concernés. Les modalités d'alerte sont bien définies.

9.8 Barrières de sécurités

Le chapitre suivant rappelle les mesures de réduction des risques nécessaires pour respecter la criticité des événements, les adaptations à envisager par le maître d'ouvrage pour pérenniser la sécurité de ses ouvrages et les mises en garde vis-à-vis du risque d'inondation.

9.8.1 Définition des barrières de sécurité

Le SM3A fera état de l'article R214-44 du code de l'environnement pour engager des travaux d'urgence.

Il peut s'agir d'empêcher la formation d'une brèche dans les ouvrages classés Système d'Endiguement.

Le SIDPC sera averti par la direction des opérations DO au préalable.

Lorsqu'une intervention d'urgence a été commandée, la Direction des opérations du SM3A fait le point avec l'entreprise sur l'avancement des travaux.

Après concertation avec l'entreprise mobilisée, s'il est constaté sur le lieu du désordre l'impossibilité de procéder à une intervention ou la nécessité de la différer, la DO en informe le Service Interministériel De Protection Civile (SIDPC) de la préfecture.

Les travaux d'urgence sont des mesures provisoires de confortement ou de déblaiement (mise en œuvre en dehors des contraintes usuelles des règles de l'art et des garanties après réalisation). Il peut s'agir de :

- Confortements de digues en urgence par enrochements ou par mise en œuvre de remblais contre le talus de digue ;
- Mise en œuvre de remblais aux abords des digues (cordon de matériaux, diguettes,) ;
- Renforcement et/ou création de pistes d'accès aux zones d'intervention ;
- Réalisation de rampes d'accès et de plateformes de chantier ;
- Travaux préparatoires sur les zones d'intervention (déboisement, dessouchage, décapage,) ;

- Mise en place de busage provisoire de chantier ;
- Curage et dégagement d'ouvrages.

Le SM3A dispose en interne de moyens d'ingénierie qui permettront de suivre les opérations d'urgence.

La liste des entreprises de travaux publics affectées aux interventions d'urgence en période de crue est disponible dans le répertoire opérationnel tenu à jour dans les locaux du SM3A.

En cas de nécessité d'intervention, l'équipe de surveillance se met en rapport avec la DO qui décide de solliciter (ou non) les entreprises. Selon la situation, le SM3A pourra dépêcher sur place un technicien compétent pour assurer la coordination des moyens mis en œuvre. Le directeur des opérations peut aussi se rendre sur place pour prendre la décision (ou non) d'envoyer l'entreprise.

Dans tous les cas, les entreprises mobilisées peuvent également apprécier les risques encourus et faire valoir leur droit de retrait.

Les interventions seront enclenchées si et seulement si :

- **Elles n'engendrent pas de sur-risque pour la zone protégée (pas de surélévation de niveau de protection...) ;**
- **Elles n'engagent pas la sécurité des équipes de travaux (pas d'intervention dans le lit en crue...).**

9.8.2 Respect des barrières de sécurités identifiées

Les scénarios de dysfonctionnement des digues ont tous été jugés de criticité acceptable en état projet du fait de l'existence et de la mise en œuvre par le SM3A de barrières de sécurité, barrières qui permettent de décoter la probabilité d'occurrence des événements redoutés que sont les ruptures de digues.

Il s'agit en particulier, des barrières de sécurité suivantes :

- La surveillance en crue associée à l'intervention des entreprises ;
- La surveillance et le contrôle des ouvrages principaux hors crue ;
- La maintenance des ouvrages principaux et des ouvrages annexes hors crue et notamment :
 - L'entretien de la végétation,
 - L'entretien du fond du lit.
- La surveillance et la maintenance spécifiques des ouvrages traversants ;
- Le maintien des dispositions constructives ;
- La surveillance et l'entretien des bassins versants amont selon les modalités des plans de gestion.

Il n'y a pas lieu de proposer d'autres mesures de réduction des risques sur ces tronçons dans la mesure où ces barrières sont bien appliquées par le S.M.3.A.

9. BIS. RECOMMANDATION DE L'ORGANISME AGREE QUI REALISE L'ETUDE DE DANGERS

9.1.1 Pendant les travaux : Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau

Compte tenu du planning des travaux, il est convenu avec les services de l'Etat (DREAL/DDT) lors de la réunion du 21/06/2023 de ne classer les ouvrages qu'en état de travaux achevés. Cependant, comme cela est précisé dans l'article 3 de l'arrêté du 30 septembre 2019, l'étude de dangers évalue les situations particulières pendant la réalisation des travaux tenant compte de la durée prévue pour ceux-ci. Il a donc été décidé d'analyser à la suite des phases 1 et 2 les écoulements dans l'Arve et les éventuels atteintes d'enjeux au droit des digues dont les travaux sont prévus lors des phases 3 et 4.

Le niveau de protection à Q10 des digues existantes sur l'Arve (source CNR) est notamment conditionné par le secteur Pont ZI-Pont SNCF, qui présente la première mise en charge des digues. Ce secteur devra donc faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre des actions pour les différents niveaux d'interventions décrits ci-dessous. Ainsi, en attendant que les travaux soient réalisés nous préconisons que le maître d'ouvrage mette en place les consignes suivantes (sur l'Arve) :

Tableau 48 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés pendant les travaux (digue de l'Arve rive gauche)

Station/Lieu de référence	Stade	Débit Arve [m³/s]	Cote échelle [m NGF]	Couleur
Pont de la ZI	Q2	364.1	446.61	Vert
	Q5	496.6	447.17	Orange
	Q10	613.0	447.59	Rouge
Pont de l'Europe	Q2	364.1	443.20	Vert
	Q5	496.6	443.67	Orange
	Q10	613.0	444.07	Rouge

Les lieux de références du SE devront être entretenues, visibles pour les équipes du SM3A et accessibles aisément par voies de circulation.

Ces seuils d'alerte sont à définir comme suit :

a) Niveau 1 d'intervention : **alerte vert** → Q2

A l'atteinte de cet état, les actions suivantes sont entreprises :

- Mise en place d'une veille Internet ;
- Mise en place des astreintes téléphoniques ;
- Préparations matériels et organisationnelles des équipes potentiel et mise en alerte.

Les entreprises urgence crue sont placées en alerte vert.

b) Niveau 2 d'intervention : **alerte orange** → Q5

Les astreintes internet et téléphoniques sont en place.

A l'atteinte de cet état, les actions suivantes sont entreprises :

- **Activation de la cellule de veille ;**
- Définition des modalités d'information du SIDPC et de coordination.

Au niveau de l'inspection des digues, la composition des équipes à mettre en place sur chaque secteur en alerte orange est définie.

Les entreprises de TP urgence crue sont mises en alerte VIGILANCE et doivent donc se tenir prêtes à intervenir sur leur secteur dans les plus brefs délais. Elles doivent par conséquent commencer à amener le matériel de travaux publics au voisinage de leur secteur et s'assurer de pouvoir rapidement mobiliser des matériaux. Ces contraintes font partie du marché.

c) Niveau 3 d'intervention : **alerte rouge** → Q10

Les astreintes internet et téléphoniques sont en place.

A l'atteinte de cet état, les actions suivantes sont entreprises :

- **Activation de la cellule de crise ;**
- Définition des modalités d'information du SIDPC et de coordination.

Au niveau de l'inspection des digues, les digues dont la revanche par rapport à la crête est inférieure à 0,50 m ne devront plus être circulées, pour des raisons de sécurité.

Les entreprises de TP urgence crue sont mises en alerte ROUGE et doivent donc se tenir prêtes à intervenir sur leur secteur dans les plus brefs délais.

9.1.2 Après travaux : **Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau**

Une fois les travaux réalisés, le système d'endiguement protégera jusqu'à la crue centennale.

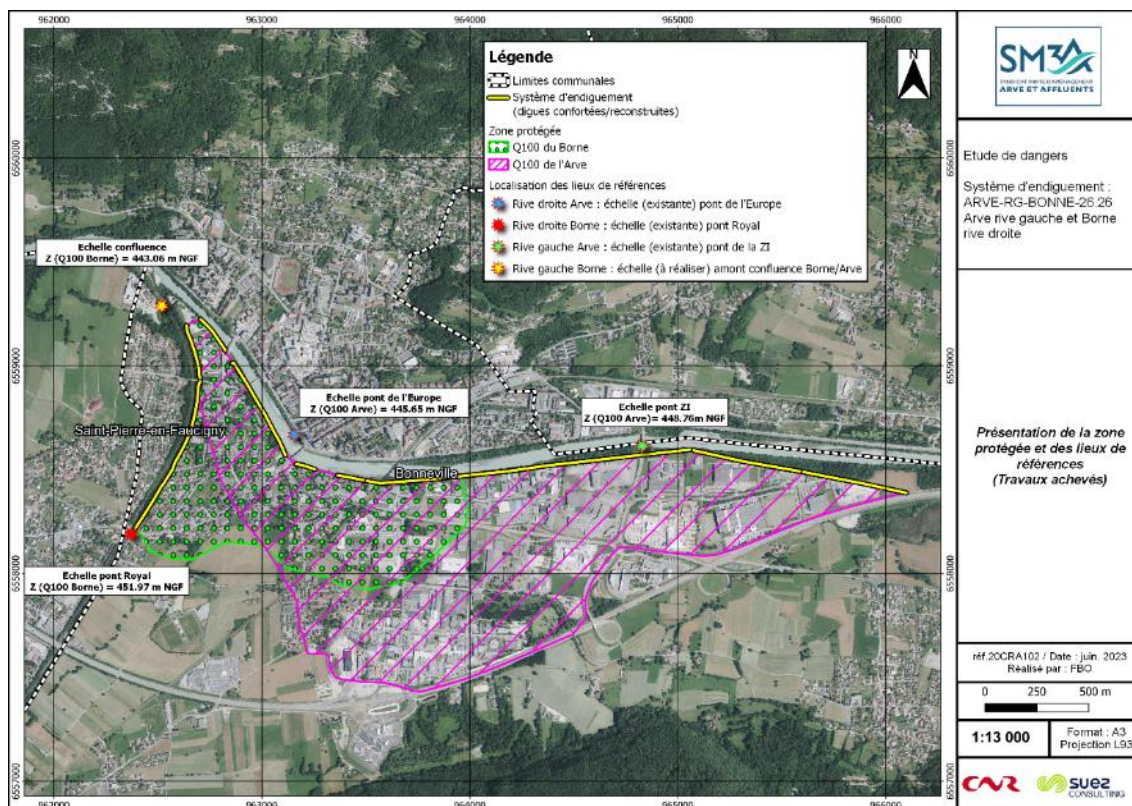


Figure 136 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection

Il est recommandé de fixer les seuils de vigilance et d'alerte suivants (sur le Borne et sur l'Arve) :

Tableau 49 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés après les travaux (digue de l'Arve rive gauche)

Station/Lieu de référence	Stade	Débit Arve [m³/s]	Cote échelle [m NGF]	Couleur
Pont de la ZI	Q10	613.0	447.40	Vert
	Q30	813.6	448.20	Orange
	Q100	1081.0	448.76	Rouge
Pont de l'Europe	Q10	613.0	444.02	Vert
	Q30	813.6	444.85	Orange
	Q100	1081.0	445.65	Rouge

Tableau 50 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés après les travaux (digue du Borne rive droite)

Station/Lieu de référence	Stade	Débit Borne [m³/s]	Cote échelle [m NGF]	Couleur
Pont Royal	Q10	113.5	451.47	Vert
	Q30	141.9	451.75	Orange
	Q100	178.4	451.97	Rouge
Confluence	Q10	113.5	442.64	Vert
	Q30	141.9	442.88	Orange

Station/Lieu de référence	Stade	Débit Borne [m ³ /s]	Cote échelle [m NGF]	Couleur
	Q100	178.4	443.06	Rouge

Les lieux de références du SE devront être entretenues, visibles pour les équipes du SM3A et accessibles aisément par voies de circulation.

Ces seuils d'alerte sont à définir comme suit :

d) Niveau 1 d'intervention : alerte vert → Q10

A l'atteinte de cet état, les actions suivantes sont entreprises :

- Mise en place d'une veille Internet ;
- Mise en place des astreintes téléphoniques ;
- Préparations matériels et organisationnelles des équipes potentiel et mise en alerte.

Les entreprises urgence crue sont placées en alerte vert.

e) Niveau 2 d'intervention : alerte orange → Q30

Les astreintes internet et téléphoniques sont en place.

A l'atteinte de cet état, les actions suivantes sont entreprises :

- **Activation de la cellule de veille ;**
- Définition des modalités d'information du SIDPC et de coordination.

Au niveau de l'inspection des digues, la composition des équipes à mettre en place sur chaque secteur en alerte orange est définie.

Les entreprises de TP urgence crue sont mises en alerte VIGILANCE et doivent donc se tenir prêtes à intervenir sur leur secteur dans les plus brefs délais. Elles doivent par conséquent commencer à amener le matériel de travaux publics au voisinage de leur secteur et s'assurer de pouvoir rapidement mobiliser des matériaux. Ces contraintes font partie du marché.

f) Niveau 3 d'intervention : alerte rouge → Q100

Les astreintes internet et téléphoniques sont en place.

A l'atteinte de cet état, les actions suivantes sont entreprises :

- **Activation de la cellule de crise ;**
- Définition des modalités d'information du SIDPC et de coordination.

Au niveau de l'inspection des digues, les digues dont la revanche par rapport à la crête est inférieure à 0,50 m ne devront plus être circulées, pour des raisons de sécurité.

Les entreprises de TP urgence crue sont mises en alerte ROUGE et doivent donc se tenir prêtes à intervenir sur leur secteur dans les plus brefs délais.

9.1.3 Surveillance vis-à-vis du séisme

La figure suivante présente les échelles de magnitudes, d'intensité et le zonage sismique en vigueur en France jusqu'au 22 octobre 2010, ainsi que la carte du nouveau zonage depuis cette date. La carte suivante présente les zones de sismicité au niveau de Rhône

Alpes suivant cette nouvelle réglementation. En référence à cette carte on note que le secteur de Bonneville se situe dans une zone de sismicité moyenne.

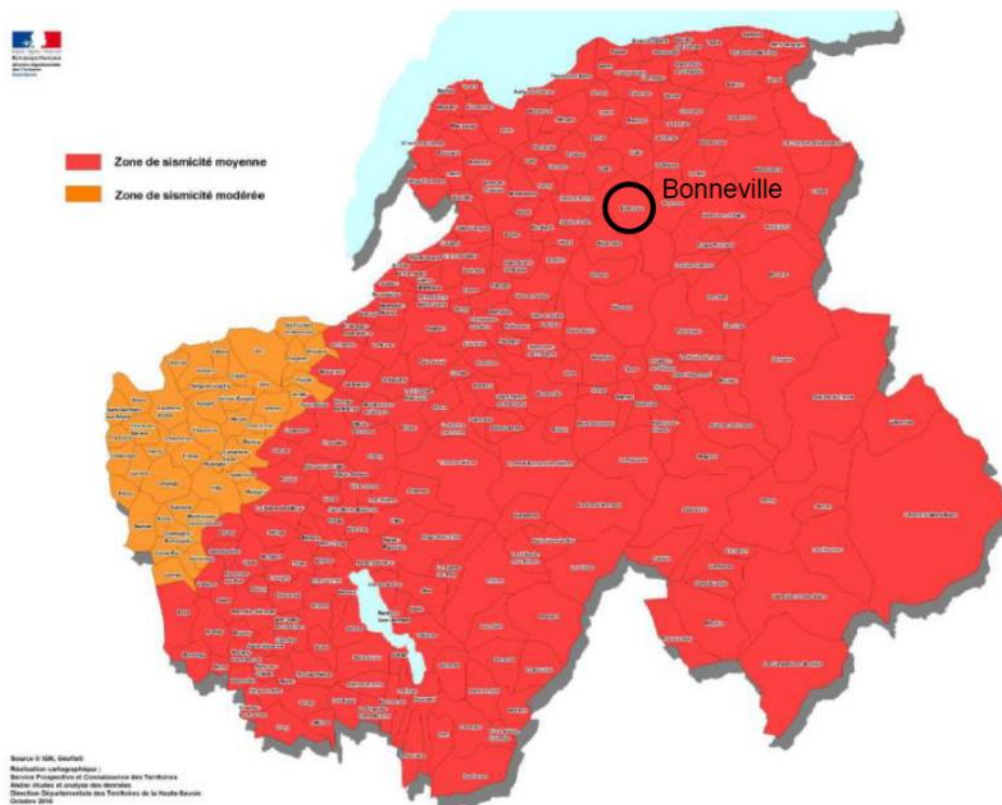


Figure 137 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source www.haute-savoie.gov.fr

D'après les recommandations du MEDDE, après la survenance d'un séisme ayant dépassé une magnitude de 4, les exploitants devront en être informés (cf. § 9.1 du MEDDE). À la suite de la survenue du séisme, 2 cercles correspondant aux accélérations de 0,025 g et de 0,1 g seront tracés et détermineront les actions à entreprendre. En cas de présence d'ouvrages au sein de ces cercles, une visite d'inspection sera réalisée puis, si nécessaire, une visite technique approfondie. Cela concerne toutes les digues situées en zones de sismicité 3, 4 et 5, quelle que soit leur classe.

Afin de s'assurer de la sécurité des digues et faciliter l'intervention d'urgence en cas de survenue d'un séisme, nous recommandons au gestionnaire de s'abonner à un service d'alerte sismique (ex : CEA). Dans le cas, peu probable, où un séisme important survient (magnitude supérieure à 5), le gestionnaire devra faire réaliser une Visite technique approfondie.

La visite post-séisme devra porter une attention particulière sur les traces de glissements et de liquéfactions des sols.

Cet élément est à intégrer au document des consignes générales de surveillance et d'exploitation.

9.1.4 Gestion des ouvrages

À la suite des travaux, le futur système d'endiguement offrira un niveau de protection satisfaisant face aux inondations.

Les actions à entreprendre par la suite ont donc pour but de conserver ce niveau de protection au cours du temps. La surveillance et l'entretien des ouvrages du système d'endiguement permettent ainsi de conserver un niveau de sûreté constant dans le temps.

L'entretien du système d'endiguement repose sur les axes suivants :

- La pratique régulière de la surveillance visuelle, programmée et postérieure aux crues ;
- L'entretien des désordres structuraux (affouillements, dégradations locales, etc...);
- L'entretien des parties d'ouvrage en maçonnerie (muret d'endiguement) ;
- Le contrôle de la végétation sur la digue (respect du plan de gestion de la végétation) ;
- S'assurer de l'entretien et de la lisibilité des échelles limnimétriques ;
- Impliquer des acteurs extérieurs lors des exercices de crise (mise à jour des PCS) ;
- La lutte contre les dégâts des animaux fouisseurs.

9.1.5 Arrêté ministériel du 8 août 2022 et analyse de l'organisation du gestionnaire

Les consignes écrites développées par le SM3A sont adaptées aux moyens du syndicat, à l'ampleur des enjeux et au contexte hydraulique du système d'endiguement.

Dans l'ensemble, le document des consignes générales de surveillance et d'exploitation du SM3A répond aux obligations réglementaires fixées par l'arrêté ministériel du 8 août 2022 « précisant les obligations documentaires et la consistance des vérifications et visites techniques approfondies des ouvrages hydrauliques autorisés ou concédés ». Le récolement réalisé par le SM3A de l'article 3 de cet arrêté sur leur document des consignes générales démontre cette conformité.

Il est recommandé au SM3A de mettre à jour le document des consignes générales, dans la mesure du possible, suivant la même hiérarchisation fixée par cet arrêté ministériel.

Il est à noter que le SM3A s'engage à compléter les consignes générales de surveillance et d'exploitation décrites dans ce chapitre 9 avec une fiche « spécifique au SE ». Cette fiche s'appuiera sur les niveaux d'alerte préconisés dans le §9.BIS pour une gestion de crise optimisée sur le présent système d'endiguement.

Il est à noter que le SM3A a réalisé ce type de fiche sur d'autres systèmes d'endiguement classés

9.1.6 Conclusion

Depuis sa création en 1994 et sa montée en compétence depuis 2012 à l'échelle du bassin versant de l'Arve (aussi bien en matière d'ouvrages hydrauliques qu'en prévention d'inondation fluviale et torrentielle), le SM3A a pris de multiples dispositions

en matière de retour d'expérience des événements passés (gestion de crues en particulier). Ces dispositions lui permettent d'évoluer et d'améliorer continuellement sa politique de gestion de crise, son organisation interne et les outils mis en place dans le cadre de l'exercice de la compétence GEMAPI. Par conséquent, son fonctionnement répond aujourd'hui à l'item 6 de l'arrête du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'Etude de Dangers.

Les outils mis en place dans le cadre de l'exercice de la compétence GEMAPI lui permettent d'intervenir sur l'ensemble du bassin versant de l'Arve. Chaque intervention et/ou outil déployé représente autant d'éléments constituant des barrières de sécurité dans la survenu de l'accident (crue). L'expérience du SM3A montre que les barrières de sécurité citées précédemment fonctionnent et permettent entre autres de réduire drastiquement les risques de rupture (rendu possible par la surveillance et les interventions quotidiennes, la gestion en crise et la remise en état post crise). Par ailleurs, les propositions existantes vis-à-vis de l'item 7 de l'arrête du 30 septembre 2019 fonctionnent pleinement.

10. CARTOGRAPHIES

10.1 Limites administratives

10.1.1 Limites administratives relevant du SM3A et zone protégée du système d'endiguement

Les deux cartes ci-dessous illustrent :

- Les limites administratives du territoire relevant du SM3A ;
- La localisation de la zone protégée qui est inscrite dans ce territoire.

Le système d'endiguement concerné par la présente étude de dangers correspond au système d'endiguement « Bonneville entre Arve et Borne ».

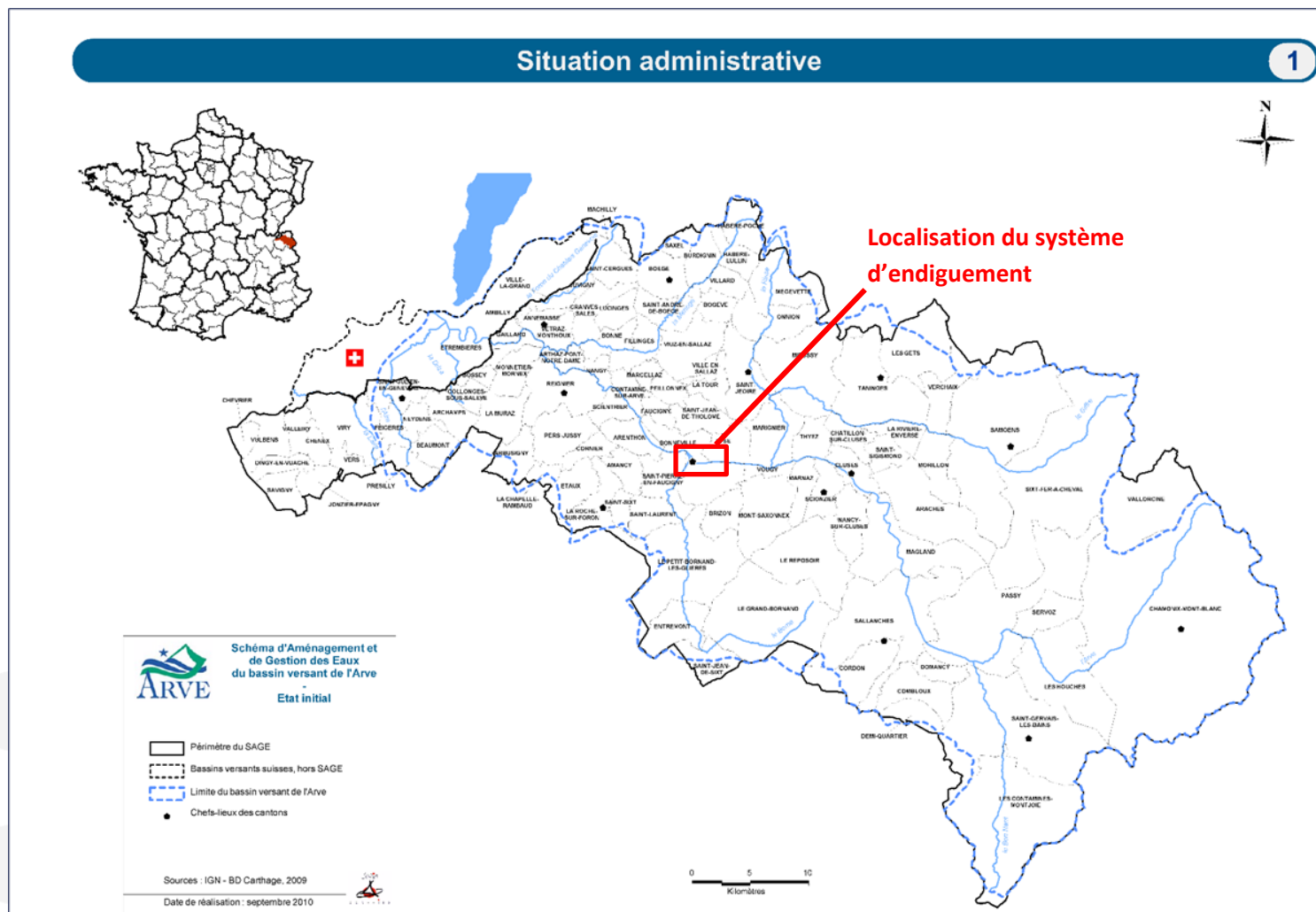


Figure 138 : Limites administratives du territoire relevant du SM3A

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
 Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

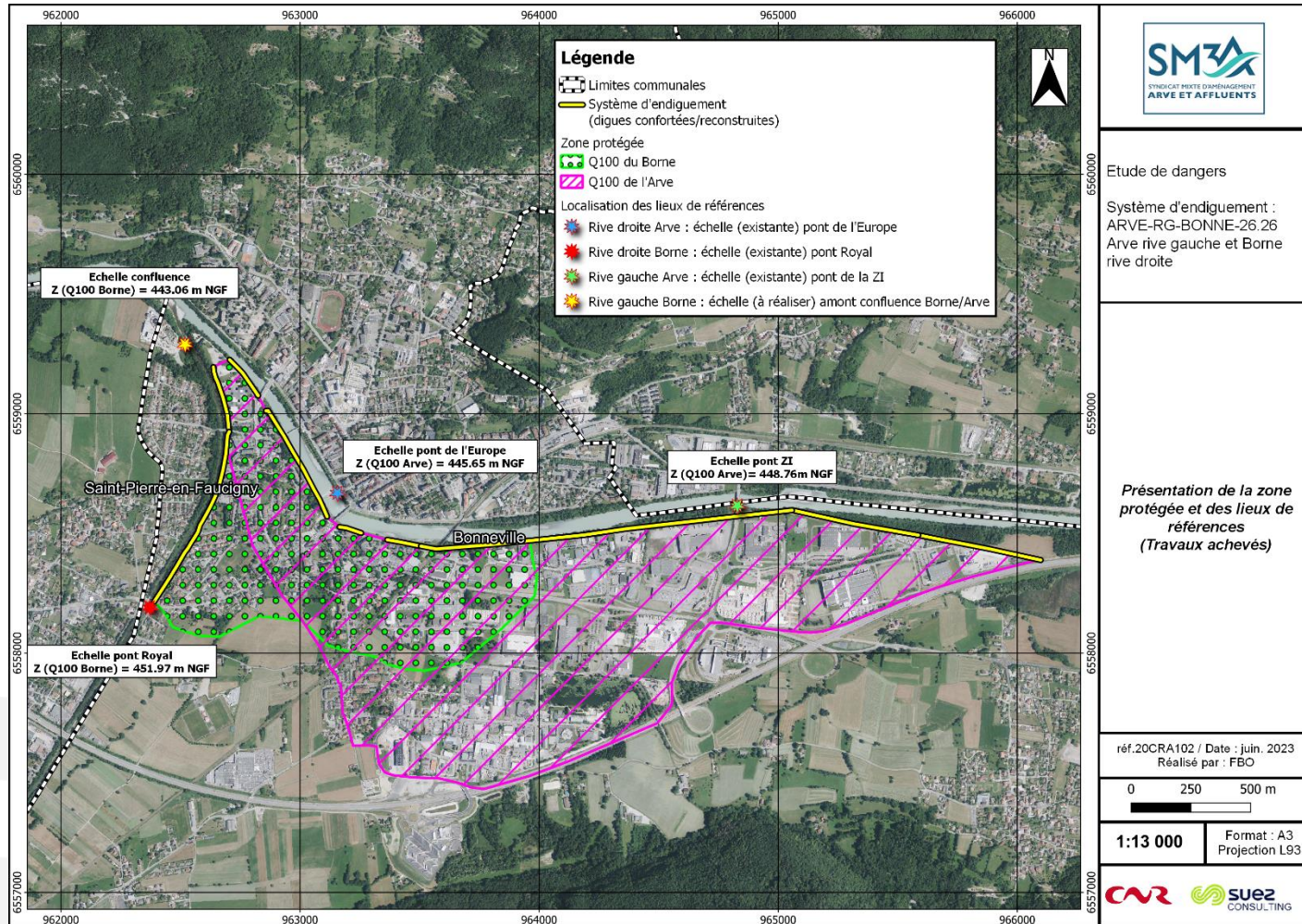


Figure 139 : Zone protégée par le système d'endiguement « Bonneville entre Arve et Borne »

10.1.2 Cartographie des venues d'eau

Une cartographie des zones mises en eau a été réalisée pour les scénarios modélisés. La dangerosité des venues d'eau, autour et dans la zone protégée, est appréciée au regard des critères de vitesses d'écoulement et de hauteurs d'inondation. L'arrêté du 30 septembre 2019 précise que « sont réputées dangereuses les venues d'eau telles que la hauteur d'eau atteint au moins 1 m ou le courant au moins 0.5 m/s ». On distingue donc :

- Bleu clair : **venues d'eau peu dangereuses** – Hauteur d'eau < 1m **et** Vitesse d'écoulement < 0,5m/s
- Bleu foncé : **venues d'eau dangereuses** – 1m < Hauteur d'eau < 2m **ou** 0.5m/s < Vitesse d'écoulement < 1m/s
- Rouge : **venues d'eau particulièrement dangereuses** : Hauteur d'eau >2m **ou** Vitesse d'écoulement > 1m/s

NB : remarques importantes pour la lecture des cartes :

Les cartes représentent les enveloppes d'extension maximale de la zone inondée pour chaque scénario simulé (cas le plus défavorable).

10.2 Scénario 1 : Fonctionnement nominal

Ce scénario correspond au fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau des écoulements correspond au niveau de protection (Q100) :

- **Sur l'Arve :**
 - **Au pont de la ZI : 448,76 m NGF ;**
 - **Au pont de l'Europe : 445,65 m NGF.**
- **Sur le Borne :**
 - **Au pont Royal : 451,97 m NGF ;**
 - **A l'amont de la confluence Arve/Borne : 443,06 m NGF.**

Aucune venue d'eau ne survient dans la zone protégée.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

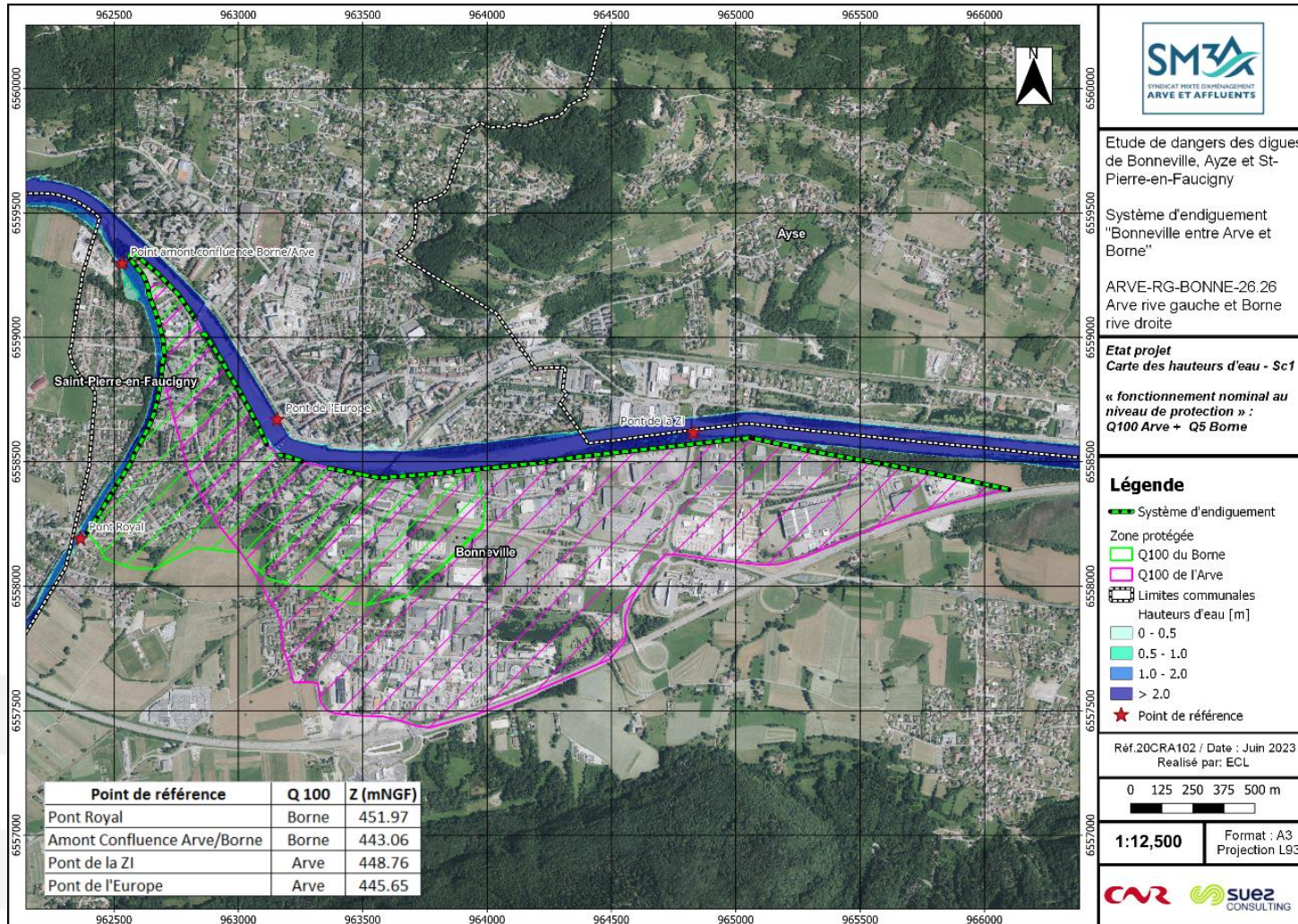


Figure 140 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

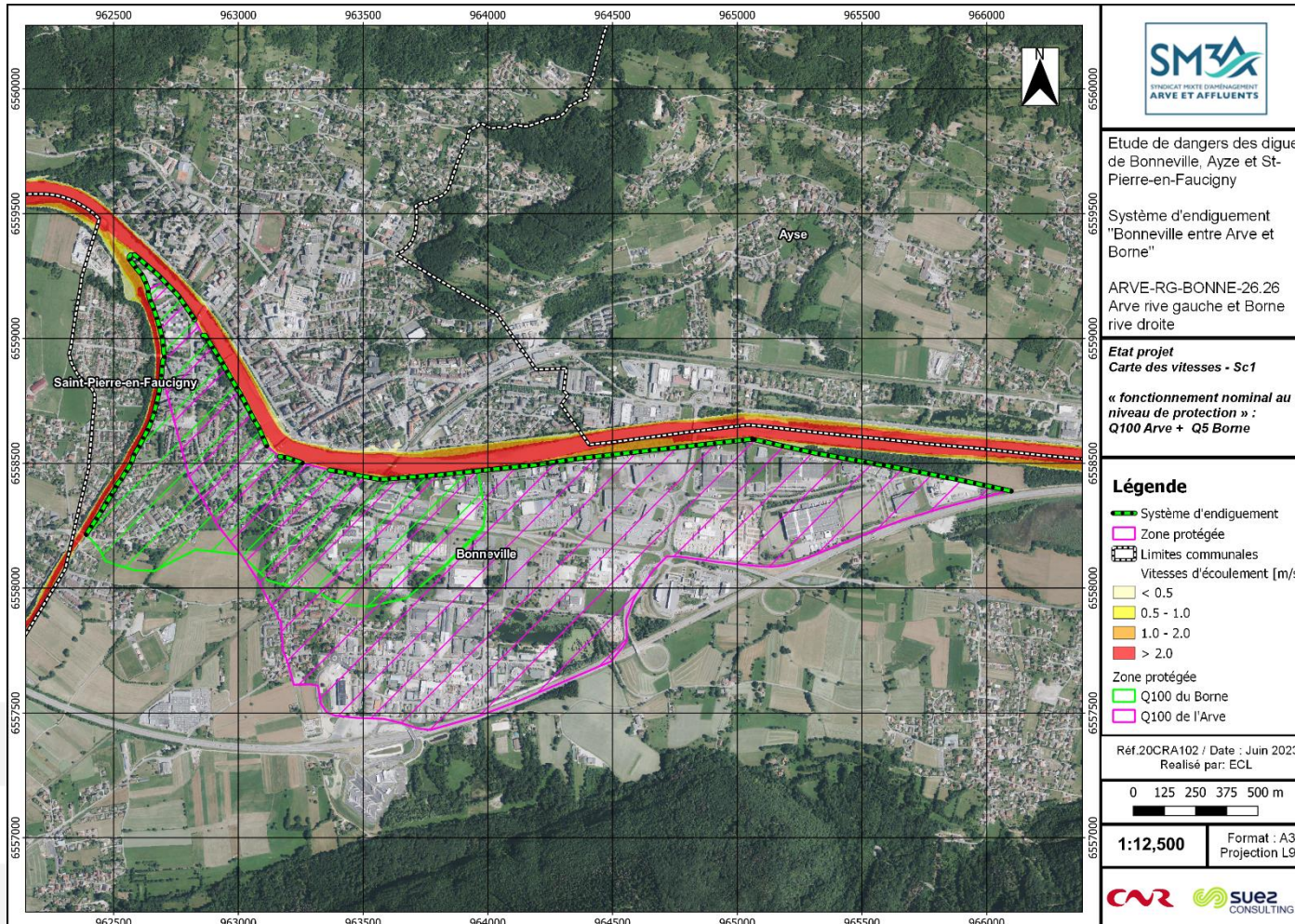


Figure 141 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endigement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

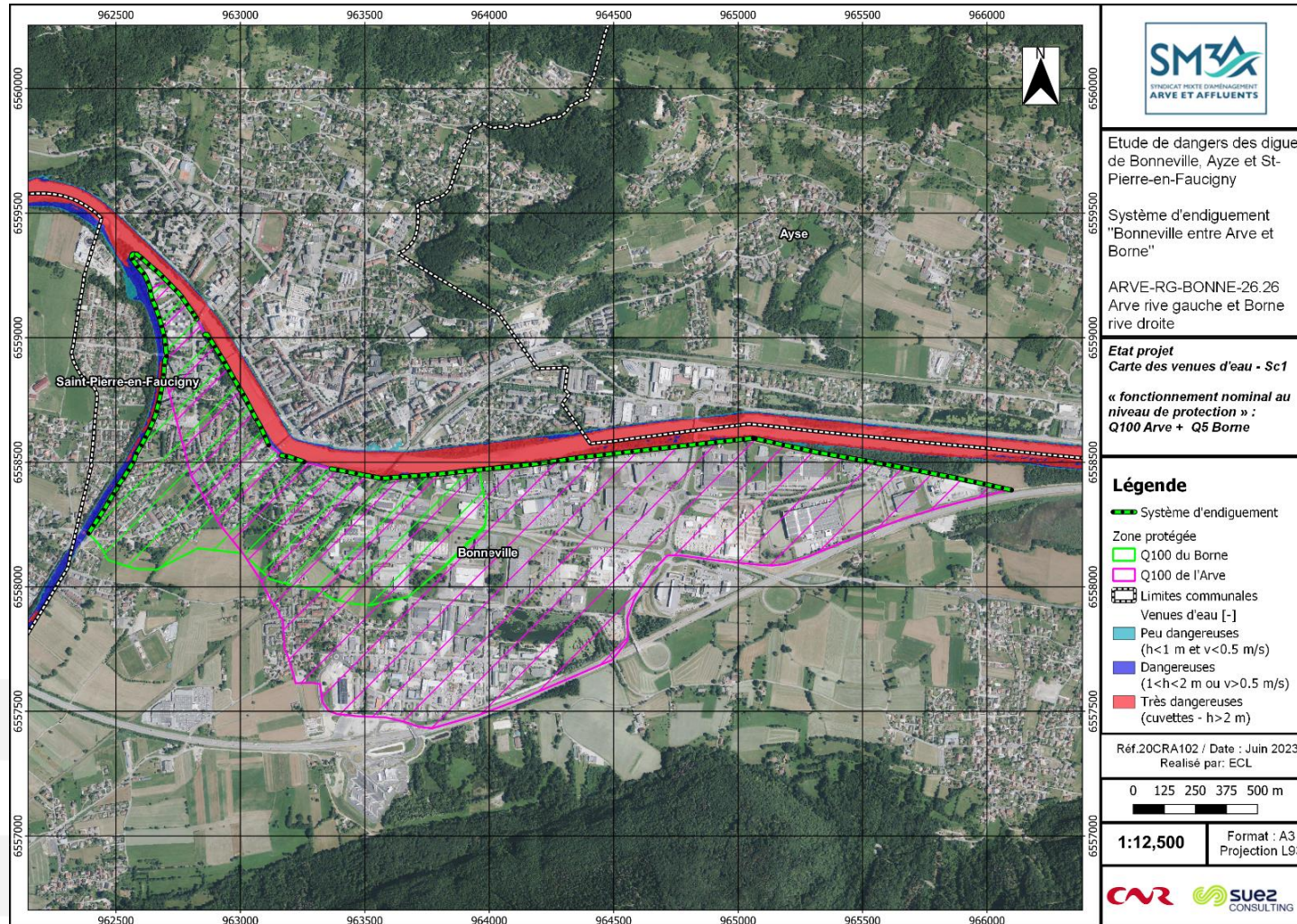


Figure 142 : Cartographie des venues d'eau du scénario 1

10.3 Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle

Une simulation a été réalisée à la suite du repérage et du diagnostic des réseaux traversant les digues :

- Clapet anti-retour du réseau « Bois Jolivet » qui reste en position ouverte pendant la crue centennale de l'Arve.

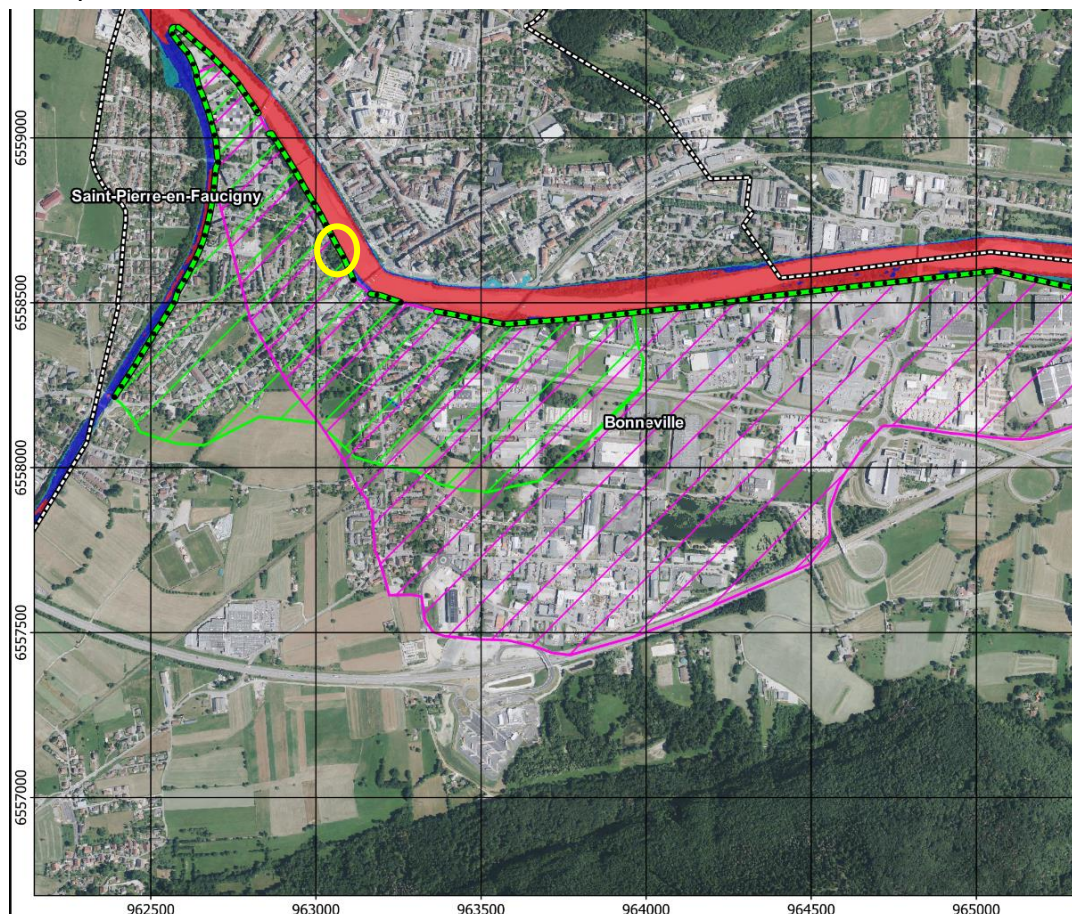


Figure 143 : Localisation du clapet anti-retour du réseau « bois Jolivet » - en jaune

Les cartographies de ce scénario sont données ci-après. Les cartographies montrent l'absence de venues d'eau dangereuses dans la zone protégée.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

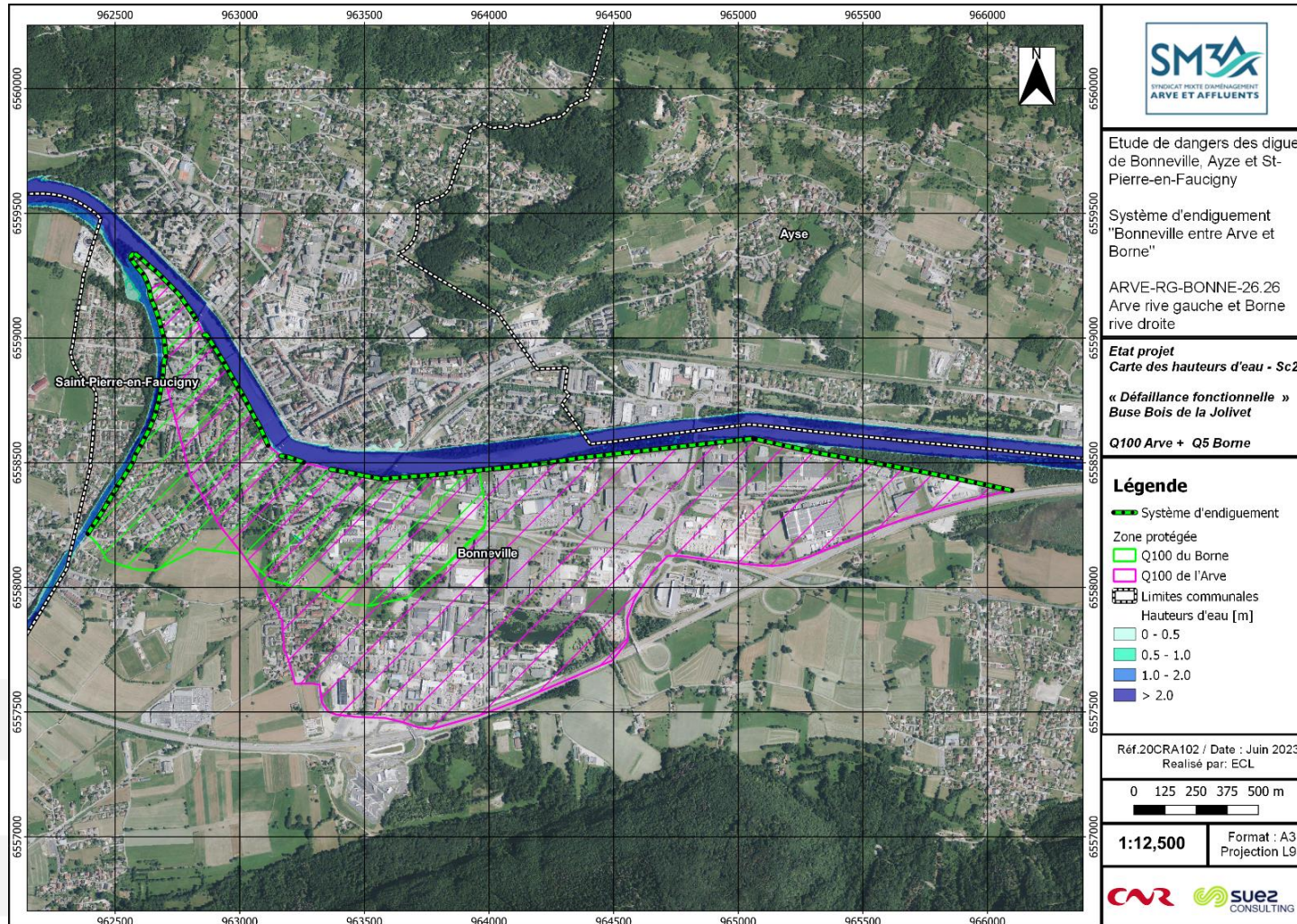


Figure 144 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

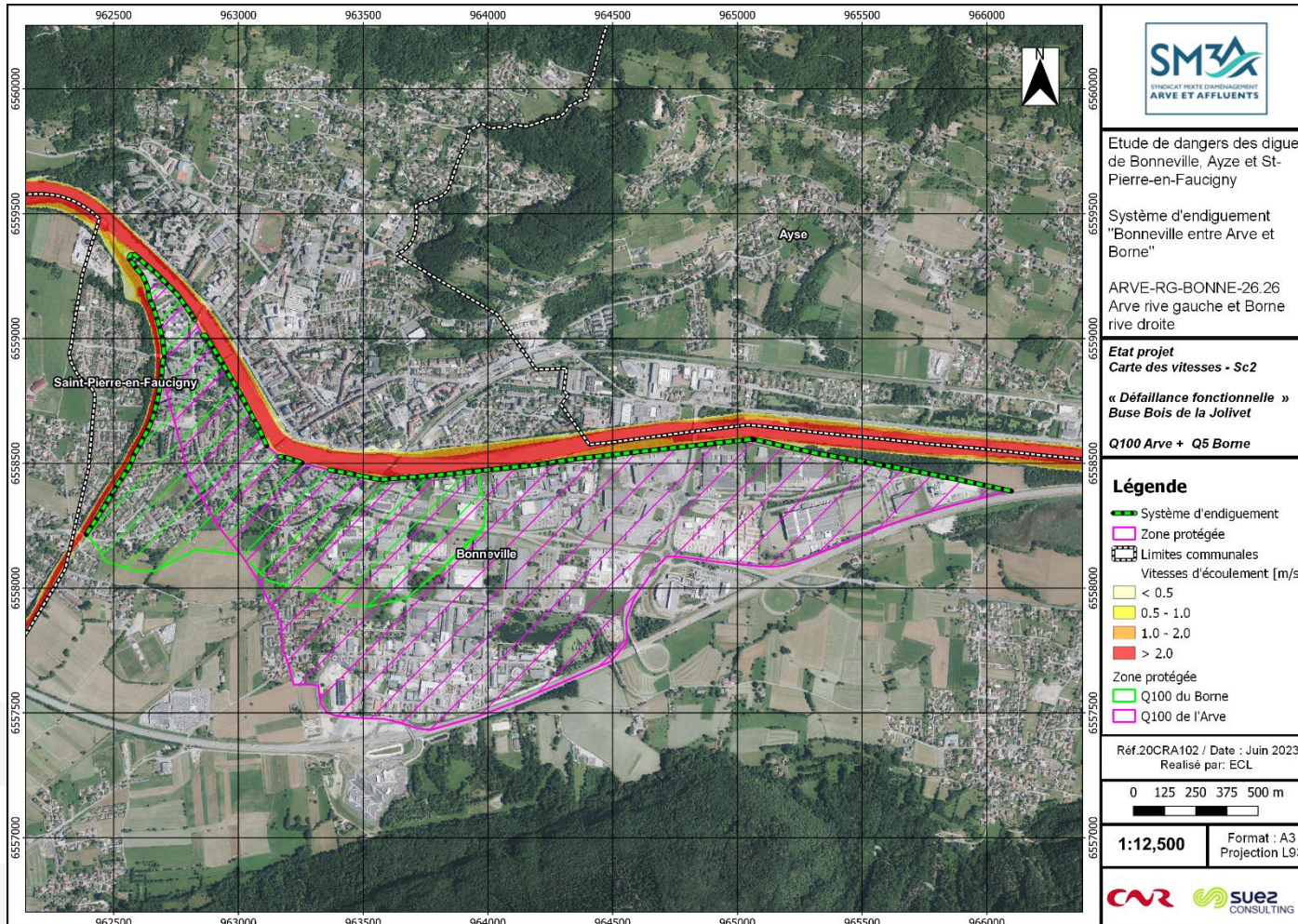


Figure 145 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

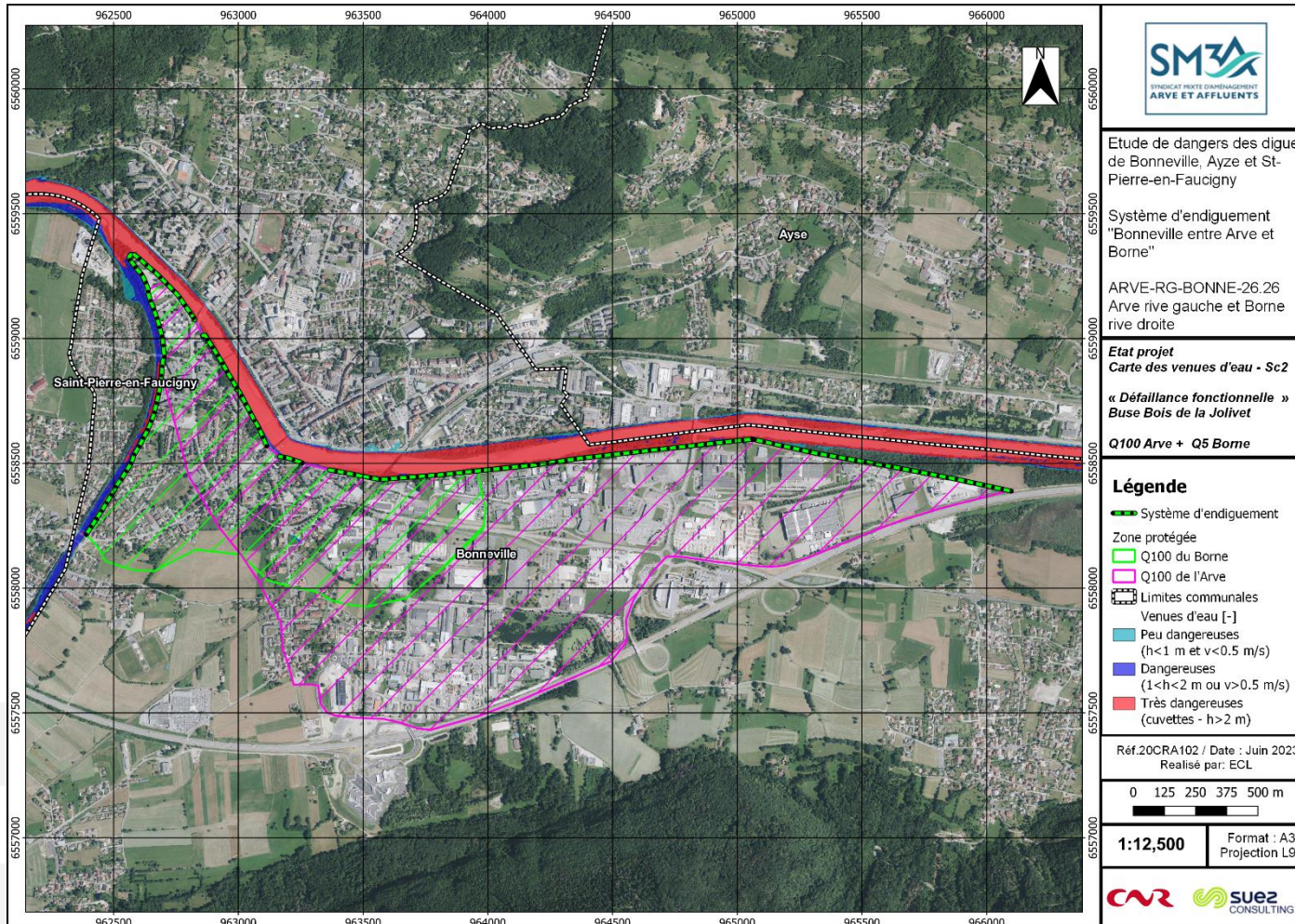


Figure 146 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2

10.4 Scénario 3 : Défaillance structurelle

Le choix de la localisation des ruptures modélisées tient compte en outre des enjeux situés derrière les tronçons de digue considérés, de l'étude historique sur les incidents et accidents survenus sur la digue.

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement : pour que le scénario de défaillance structurelle 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 **supérieure à 50 %**.

Conformément au §7, l'occurrence de la crue modélisée pour le scénario de défaillance structurelle est une Q400. Cette occurrence peut générer un risque de rupture **supérieure à 50 % (analyse des modes de défaillance)**.

Un scénario de défaillance structurelle est représenté par une ouverture de brèche(s) dans le corps de la digue entre le côté eau et le côté zone protégée.

La modélisation d'une rupture est donc définie par plusieurs paramètres :

- Une probabilité de rupture ;
- Un nombre de brèches ;
- Une largeur de brèches ;
- Un instant de rupture ;
- Une cote finale de la brèche ;
- Une durée de formation de la brèche.

Le nombre de brèches est difficile à estimer. Cependant, les informations sur le contexte physique et l'historique peuvent nous renseigner sur les scénarios raisonnables.

Le scénario 3 représentant une brèche sur l'Arve rive gauche est bien représentatif d'une atteinte à la fois des zones habitées et de la zone industrielle. Elle est localisée sur la digues des Bordets (RGT5) → secteur dont la mise en charge des digues est la plus importante.

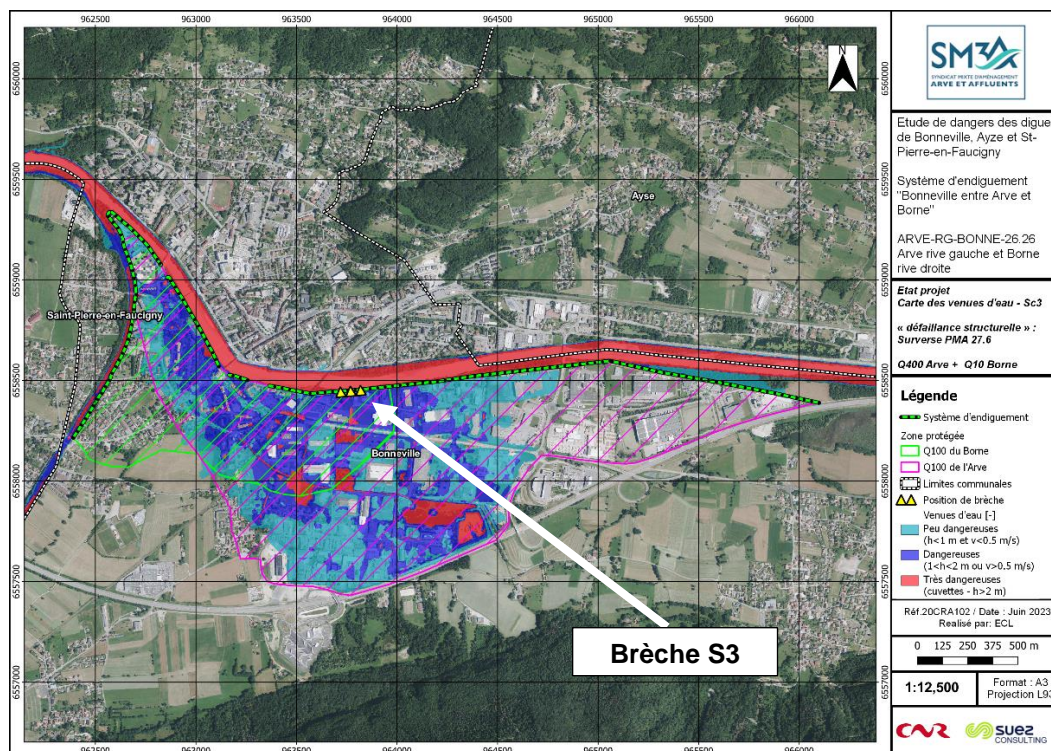


Figure 147 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle (en situation projet)

La modélisation des brèches est basée sur les hypothèses suivantes :

- Amorçage de la brèche :
 - Lorsque le débit de pointe atteint le point considéré pour les ruptures par brèches,
 - Lorsque le début de la submersion apparaît pour les ruptures par surverse ;
- Abaissement de la crête jusqu'à l'atteinte du terrain naturel aval ;
- Largeur de la brèche : de 100 m ;
- Temps d'effacement complet : 1h. Ces hypothèses rentrent dans l'ordre de grandeur des brèches communément modélisées pour d'autres EDD, à savoir entre 100 et 200 mm/min.

Ces hypothèses permettent de représenter une certaine dynamique de rupture, sachant que d'autres dynamiques de ruptures peuvent être susceptibles de se produire.

La localisation des brèches répond à l'objectif de maximiser les conséquences en jouant sur les deux critères suivants :

- Hauteur maximale de la digue au-dessus du terrain naturel (TN). Cette configuration est susceptible de maximiser le débit déversé ;
- Zone habitée en aval.

Pour le scénario de défaillance structurelle, on retrouve la cinétique de brèche suivante :

T=0 h : Début de la brèche

Initiation de la brèche suite à une crue de temps de retour 400 ans de l'Arve

T=1 h : Venues d'eau dans la zone protégée

La brèche s'ouvre complètement. Les eaux s'écoulent dans la zone protégée le long du système d'endiguement jusqu'au pont de l'Europe.

Celles-ci s'écoulent rapidement vers le centre de la zone protégée et surversent sur la D1205 et le ruisseau de la Bézière.

Les eaux remontent également dans la zone d'activité des Bordets.

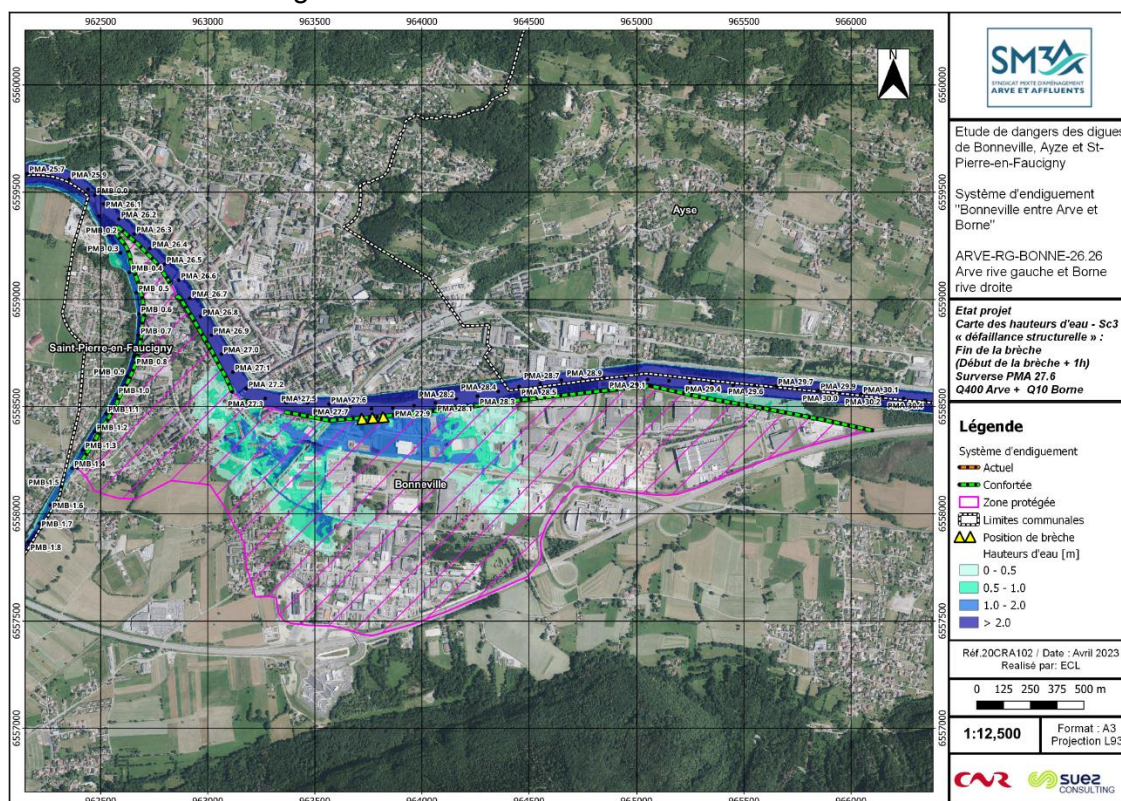


Figure 148 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 1h après la rupture

T=2 h : Venues d'eau dans la zone protégée

Les eaux provenant de la Brèche s'écoulent jusqu'au point le plus en aval du système d'endiguement, et s'étendent jusqu'à la partie sud de la zone protégée.

Celles-ci ne remontent cependant pas beaucoup plus en amont le long de la digue.

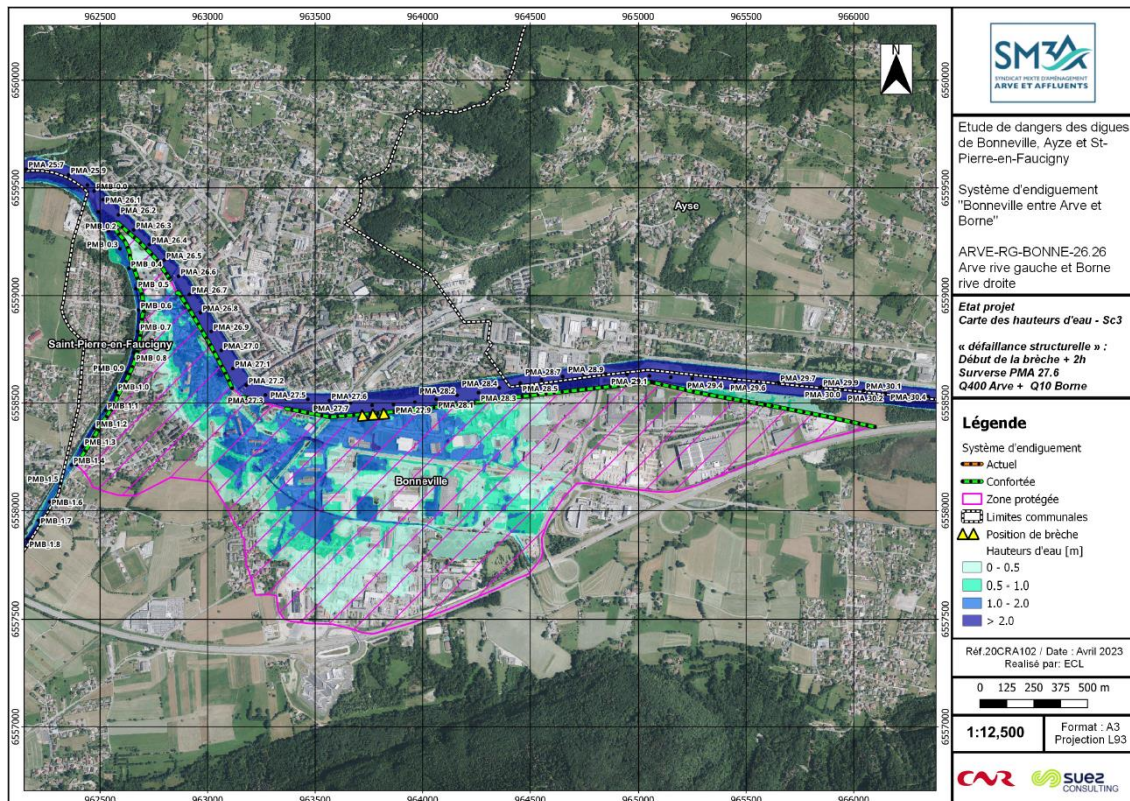


Figure 149 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 2h après la rupture

T=3h : Etalement des eaux

Les eaux s'étendent sur la partie sud et ouest de la zone protégée.

La majorité de la zone protégée est touchée, et on observe des venues d'eau dangereuses et très dangereuses.

La partie est de la zone d'activité longeant les Bordets reste cependant à l'abris des remontées des eaux, tout comme les enjeux proches de la partie amont des digues du borne rive droite.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne" ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

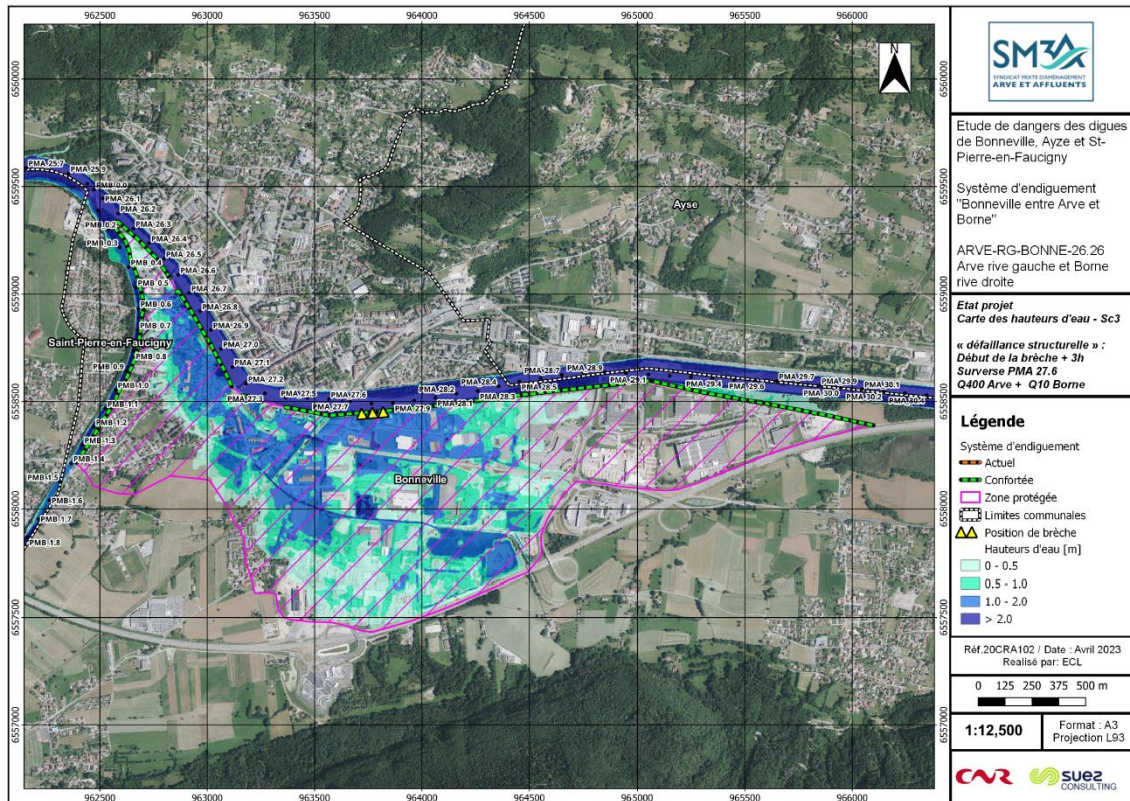


Figure 150 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3 - 3h après la rupture

Les cartographies (débordements maximum) du scénario 3 sont données ci-après.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"
 Arve-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

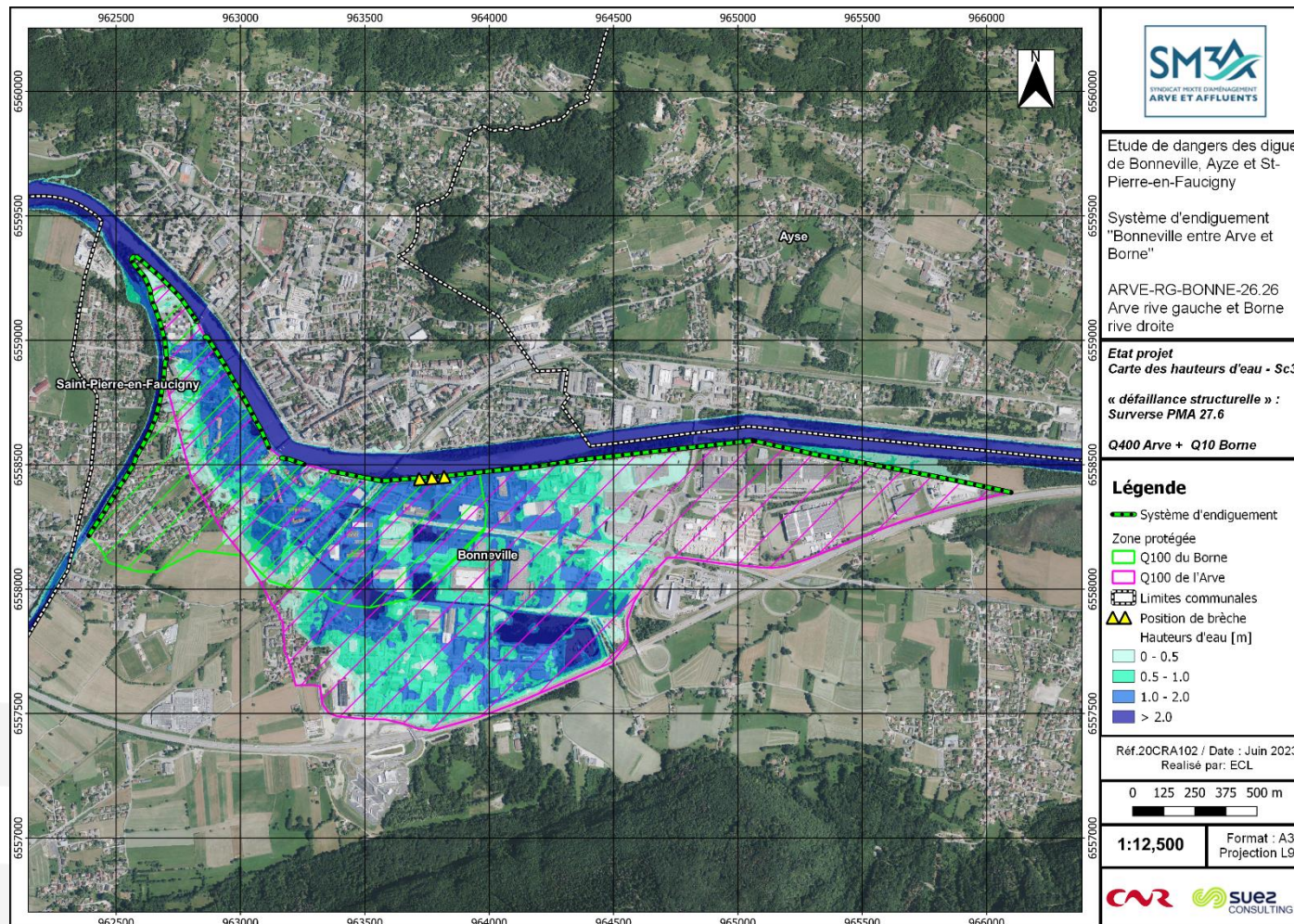


Figure 151 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

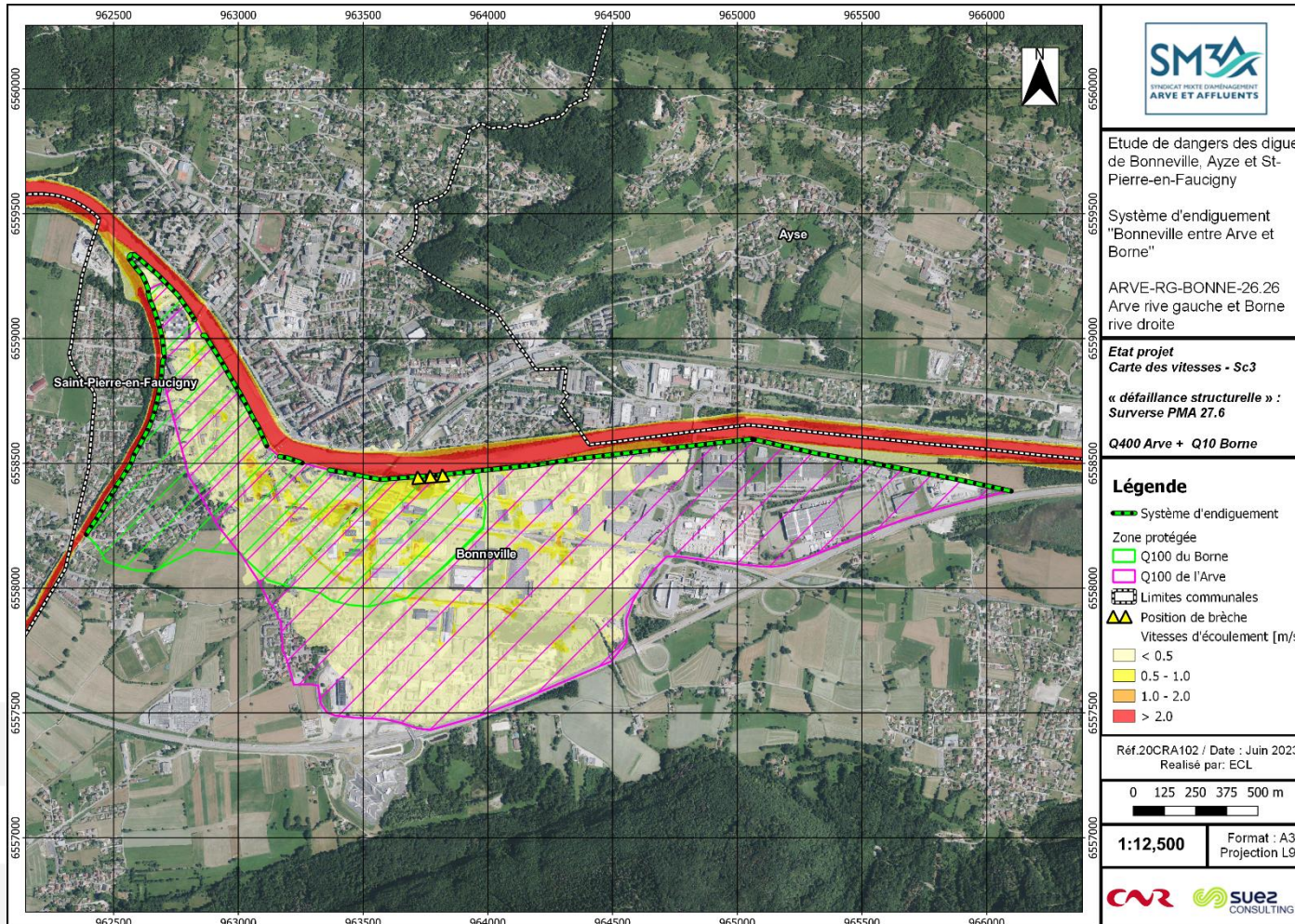


Figure 152 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville entre Arve et Borne"

ARVE-RG-BONNE-26.24 - ARVE RIVE GAUCHE ET BORNE RIVE DROITE

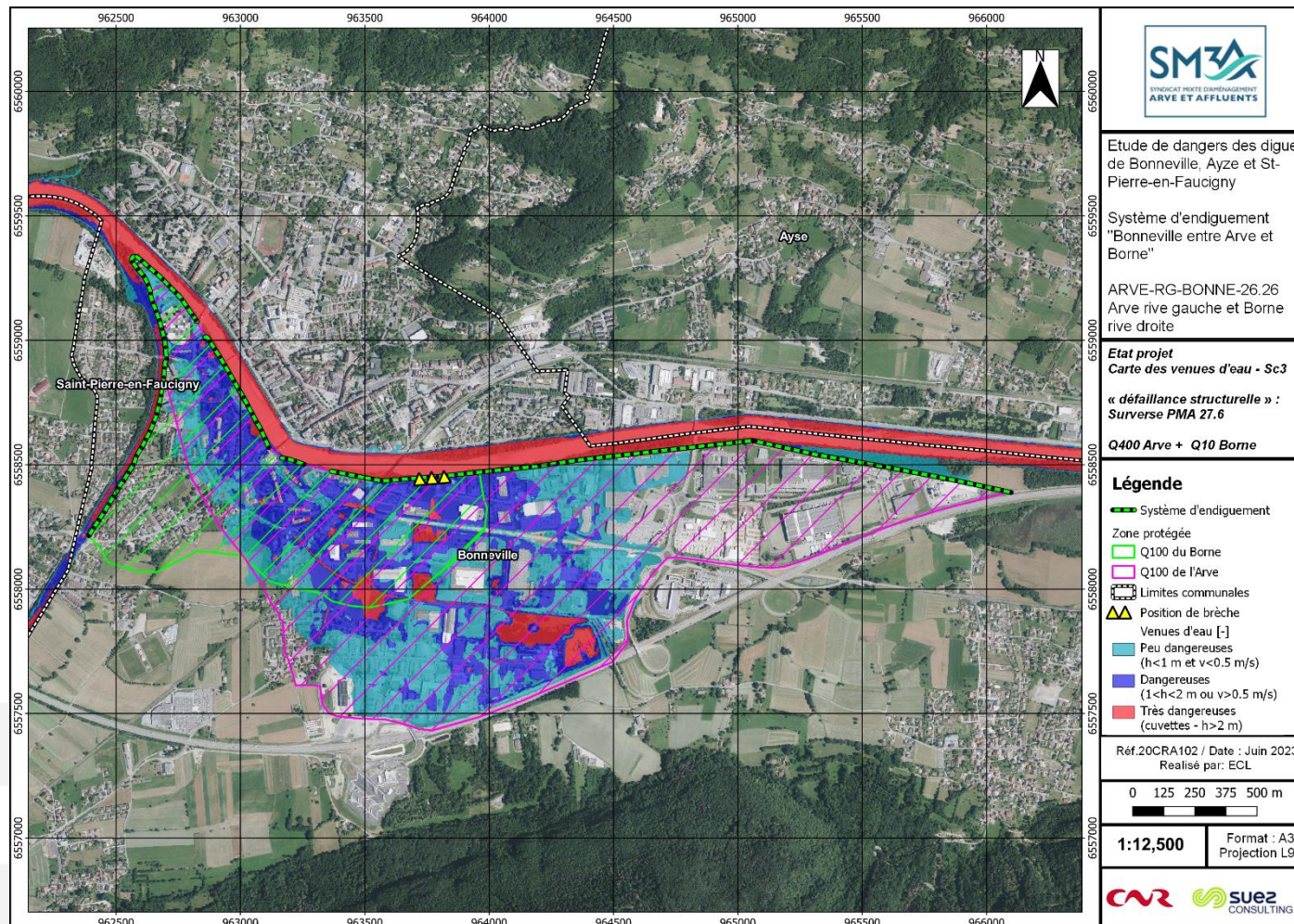


Figure 153 : Cartographie des venues d'eau du scénario 3

ANNEXE 1 : ANALYSE DES ENJEUX

ANNEXE 2 : AVP ARVE

ANNEXE 3 : CARTOGRAPHIES

ANNEXE 4 : EDD CNR 2019

ANNEXE 5 : DIAGNOSTIC RESEAUX TRAVERSANTS

ANNEXE 6 : VISITE TECHNIQUE APPROFONDIE

ANNEXE 7 : DOCUMENTS D'ORGANISATIONS DU GESTIONNAIRE

CONSULTING

SAFEGE SAS - Savoie Technolac
Agence Savoies - Dauphiné
48 avenue du Lac du Bourget
BP 30318
73377 LE BOURGET DU LAC
Tel. : + 33 (0)4 79 26 46 00

