

CONSULTING

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

Système d'endiguement "Bonneville Ayze"

Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE





DOCUMENT B





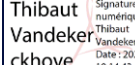
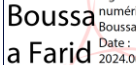
SAFEGE opérant sous la marque SUEZ Consulting (SIREN n° 542 021 829) « Ce document a été réalisé par du personnel de SAFEGE SAS (opérant sous la marque commerciale SUEZ Consulting) ; SAFEGE SAS est un organisme agréé en tant qu'intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, conformément à l'arrêté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

Numéro du projet : 20CRA102

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

**Intitulé du document** : DOCUMENT B - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

<a href="#">Contrôle données entrée</a>	<a href="#">Réunion de démarrage</a>	<a href="#">RACI Agrément</a>	<a href="#">Check List</a> (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.PE STEL 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
<b>4..... Caractérisation des aléas naturels .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1 Hydrologie, hydraulique et morphologie globale .....</b>	<b>16</b>
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
<b>4.2 Analyse hydrologique locale .....</b>	<b>31</b>
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.....	34
4.2.4 Influence aval .....	36
<b>4.3 Analyse hydraulique.....</b>	<b>37</b>
4.3.1 Le code de calculs Telemac-2D .....	37
4.3.2 Emprise du modèle.....	37
4.3.3 Modélisation des ponts et ouvrages.....	38
4.3.4 Le calage du modèle .....	38
4.3.5 Résultats de la modélisation .....	39
<b>4.4 Risque sismique .....</b>	<b>44</b>
4.4.1 Position des ouvrages vis-à-vis des séismes.....	44
4.4.2 Evolution de la réglementation .....	44
<b>4.5 Mouvements de terrain.....</b>	<b>45</b>
<b>4.6 Les embâcles et leurs effets potentiels.....</b>	<b>45</b>
<b>4.7 Les évolutions morphologiques du lit de l'Arve et du Borne .....</b>	<b>46</b>
<b>4.8 Les laves torrentielles et leurs effets potentiels .....</b>	<b>51</b>
<b>5..... Description du système d'endiguement .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1 Ouvrages existants.....</b>	<b>52</b>
5.1.1 Identification et localisation des ouvrages.....	52
5.1.2 Caractéristiques des digues actuelles (avant travaux).....	55
5.1.3 Autres ouvrages .....	72
5.1.1 Description des sources d'agression.....	75
<b>5.2 Description des ouvrages en phase avant-projet .....</b>	<b>75</b>
5.2.1 Rappels de l'AVP structurel - 2018 .....	75

5.2.2	Avant-projet optimisé.....	77
5.2.3	Phasage des travaux.....	91
<b>5.3</b>	<b>Description fonctionnelle du système d'endiguement.....</b>	<b>94</b>
<b>6.....</b>	<b>Retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement.....</b>	<b>97</b>
<b>6.1</b>	<b>Présentation de la démarche.....</b>	<b>97</b>
6.1.1	Obligations réglementaires.....	97
6.1.2	Méthodologie.....	97
<b>6.2</b>	<b>Défaillances, accidents, incidents et évolutions lentes survenus sur les ouvrages.....</b>	<b>98</b>
6.2.1	Crués historiques sur le système.....	98
6.2.2	Synthèse des observations – typologie des désordres (VTA).....	99
6.2.3	Autres évènements particuliers survenus sur le site.....	102
6.2.4	Retour d'expérience sur des ouvrages gérés par le SM3A.....	102
6.2.5	Exemples connus d'incidents et d'accidents survenus sur des ouvrages similaires.....	103
<b>6.3</b>	<b>Scénarios de défaillance probables.....</b>	<b>108</b>
6.3.1	Analyse accidentologique.....	108
6.3.2	Synthèse sur les scénarios de défaillance probables.....	111
<b>7.....</b>	<b>Diagnostic approfondi des éléments constitutifs du système d'endiguement et tenue des ouvrages.....</b>	<b>114</b>
<b>7.1</b>	<b>Diagnostic et reconnaissances sur les digues de l'Arve (EDD CNR de 2019) 114</b>	
7.1.1	Reconnaissances géophysiques.....	114
7.1.2	Historique des reconnaissances géotechniques.....	120
7.1.3	Evaluation de la stabilité des digues existantes (Arve rive droite).....	120
<b>7.2</b>	<b>Mission G2 – Avant-Projet de confortement de l'Arve.....</b>	<b>122</b>
7.2.1	Reconnaissances géotechniques de 2021.....	122
7.2.2	Stabilité au glissement.....	130
7.2.3	Stabilité des berges et dimensionnement des enrochements.....	134
7.2.4	Prédimensionnement des solutions de soutènement.....	135
7.2.5	Prise en compte des aspects hydrogéologiques.....	137
7.2.6	Recommandations concernant l'érosion interne.....	139
<b>7.3</b>	<b>Arve RD – vérification de la tenue des ouvrages.....</b>	<b>141</b>
7.3.1	Principes généraux.....	141
7.3.2	Objectif de protection.....	141
7.3.3	Digues en état actuel.....	141
7.3.4	Méthode de vérification de la tenue des ouvrages.....	141
7.3.5	Caractérisation des probabilités de rupture des digues.....	143
<b>7.4</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>187</b>

<b>7.5 Moyens mis en œuvre pour assurer l'entretien, la surveillance et les réparations courantes des ouvrages</b> .....	<b>187</b>
--	------------

## **8..... ÉTUDE DES RISQUES DE VENUES D'EAU DANS ET EN DEHORS DE LA ZONE PROTÉGÉE** ..... 188

<b>8.1 Généralités</b> .....	<b>188</b>
8.1.1 Les scénarios découlant de l'analyse des modes de défaillance .....	188
8.1.2 Cartographie des venues d'eau .....	189
<b>8.2 Scénario 1 : Fonctionnement nominal</b> .....	<b>189</b>
<b>8.3 Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle</b> .....	<b>193</b>
8.3.1 S2.1 : Défaillance fonctionnelle du ruisseau de la Madeleine.....	193
8.3.2 S2.2 : Défaillance fonctionnelle des Castorduc amont et aval.....	197
<b>8.4 Scénarios 3 : Défaillance structurelle</b> .....	<b>203</b>
8.4.1 S3.1 : Défaillance structurelle – Tronçons Centre T01 et Centre T02 .....	204
8.4.2 S3.2 : Défaillance structurelle – Tronçons RD-T6.....	211

## **9..... Présentation et analyse de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour l'exercice de ses missions** ..... 217

<b>9.1 Organisation du gestionnaire</b> .....	<b>217</b>
9.1.1 Pôles et services chargés de la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement.....	217
9.1.2 Organisation des missions de surveillance générale .....	218
9.1.3 Organisation des interventions programmées .....	219
9.1.4 Organisation lors d'un désordre détecté sur ouvrage .....	220
9.1.5 Entreprises et prestataires sous contrat.....	220
<b>9.2 Consignes de surveillance et d'exploitation des ouvrages hors période de crise</b> 221	
9.2.1 Consignes générales de surveillance.....	221
9.2.2 Consignes d'exploitation des ouvrages.....	222
<b>9.3 Procédure d'information et de communication</b> .....	<b>226</b>
9.3.1 Chaîne de responsabilité .....	226
9.3.2 Liens avec certains acteurs spécifiques de la gestion de crise .....	227
9.3.3 Organisation en cas de crise.....	227
<b>9.4 Moyens d'information sur les crues ou les épisodes météorologiques à risque</b> .....	<b>227</b>
9.4.1 Les limites techniques .....	227
9.4.2 Dispositifs de veille opérés par les services de l'Etat.....	231
9.4.3 Stations hydrométriques.....	237
9.4.4 Astreinte .....	238
<b>9.5 Consignes de surveillance des ouvrages en période de crise</b> .....	<b>239</b>
9.5.1 Chaîne de responsabilité et rôle des acteurs en gestion de crise.....	239

9.5.2	Détails et processus de décision du dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise .....	240
9.5.3	Visites post-crue .....	244
9.5.4	Interventions post-crue .....	246
<b>9.6</b>	<b>Analyse des PCS.....</b>	<b>246</b>
<b>9.7</b>	<b>Adéquation des moyens mis en place pour la surveillance et l'entretien courant avec l'objectif de protection garanti .....</b>	<b>247</b>
9.7.1	Entretien, surveillance et exploitation .....	247
9.7.2	Veille et information .....	248
9.7.3	Alerte et mise en sécurité .....	248
<b>9.8</b>	<b>Barrières de sécurités .....</b>	<b>248</b>
9.8.1	Définition des barrières de sécurité .....	248
9.8.2	Respect des barrières de sécurités identifiées .....	249
<b>9.....</b>	<b>BIS. Recommandation de l'organisme agréé qui réalise l'étude de dangers .....</b>	<b>250</b>
9.1.1	Fiabilisation de la fermeture vanne Castorduc / Madeleine .....	250
9.1.2	Pendant les travaux : Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau .....	251
9.1.3	Après travaux : Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau .....	252
9.1.4	Surveillance vis-à-vis du séisme .....	254
9.1.5	Investigations complémentaires – RD19.....	255
9.1.6	Gestion des ouvrages .....	255
9.1.7	Arrêté ministériel du 8 août 2022 et analyse de l'organisation du gestionnaire ....	255
9.1.8	Conclusion.....	256
<b>10...</b>	<b>Cartographies.....</b>	<b>257</b>
<b>10.1</b>	<b>Limites administratives.....</b>	<b>257</b>
10.1.1	Limites administratives relevant du SM3A et zone protégée du système d'endiguement.....	257
10.1.2	Cartographie des venues d'eau .....	260
<b>10.2</b>	<b>Scénario 1 : Fonctionnement nominal.....</b>	<b>260</b>
<b>10.3</b>	<b>Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle .....</b>	<b>264</b>
10.3.1	S2.1 : Défaillance fonctionnelle du ruisseau de la Madeleine.....	264
10.3.2	S2.2 : Défaillance fonctionnelle des Castorduc amont et aval .....	268
<b>10.4</b>	<b>Scénarios 3 : Défaillance structurelle.....</b>	<b>274</b>
10.4.1	S3.1 : Défaillance structurelle – Tronçons Centre T01 et Centre T02 .....	275
10.4.2	S3.2 : Défaillance structurelle – Tronçons RD-T6.....	282
<b>Annexe 1</b>	<b>: Analyse des Enjeux .....</b>	<b>288</b>
<b>Annexe 2</b>	<b>: AVP ARVE .....</b>	<b>289</b>
<b>Annexe 3</b>	<b>: Cartographies .....</b>	<b>290</b>

---

Annexe 4 : EDD CNR 2019 .....	291
Annexe 5 : DIAGNOSTIC RESEAUX TRAVERSANTS .....	292
Annexe 6 : VISITE TECHNIQUE APPROFONDIE .....	293
Annexe 7 : DOCUMENTS D'ORGANISATIONS DU GESTIONNAIRE .....	294



## 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 : Construction de la courbe de tarage à l'aval du modèle .....	37
Figure 10 : Périmètre du modèle hydraulique (rose).....	38
Figure 11 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - digues rive droite et rive gauche en état actuel et lignes d'eau ...	41
Figure 12 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel .....	41
Figure 13 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel.....	42
Figure 14 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue) .....	43
Figure 15 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source <a href="http://www.haute-savoie.gouv.fr">www.haute-savoie.gouv.fr</a> .....	44
Figure 16 : Profil en Long - Evolution morphologique - Prison de Bonneville – Source Hydratech – Juillet 2013 .....	47
Figure 17 : Profil en Long - Evolution morphologique – Aval Bonze – Source Hydratech – Juillet 2013.....	47
Figure 18 : Profil en long du Borne à hauteur de la zone d'étude – SOGREAH 1998 .....	48
Figure 19 : Photographie de la confluence Borne/Arve - CNR.....	50
Figure 20 : Évolution des niveaux sur le cône de déjection Borne – ETRM .....	50
Figure 21 : Localisation des ouvrages constitutifs du SE (source : CNR, 2016).....	53
Figure 22 - Profil en long du tronçon de la RD19.....	54
Figure 23 : Découpage structural de la digue RD19 .....	56
Figure 24 : Divagations du lit de l'Arve - Google Maps .....	57
Figure 25 : RD19 Profil Géophysique – IMG .....	57
Figure 26 : RD19 : Exemples de conduites traversant l'ouvrage – VTA CNR 2017.....	57
Figure 27 : Photo aérienne de la zone du Bouchet T02 durant la période de la construction du pont de la ZI.....	58
Figure 28 : Découpe structurale de la digue du Bouchet T02 .....	58
Figure 29 : Photos de la digue du Bouchet T02, partie amont de la vanne Décret.....	59
Figure 30 : Photo de la digue du Bouchet T02, partie aval de la vanne Décret.....	59
Figure 31 : Découpage structural de la digue du BOUCHET T01 .....	60
Figure 32 : Bouchet T01 - Profil de digue .....	61
Figure 33 : Bouchet T01 - Phénomène de sous-cavage.....	61
Figure 34 : Découpage structural de la digue Jean-Baptiste REY .....	62
Figure 35 : Digue JB REY – Profil de digue.....	62
Figure 36 : Digue JB REY - Confortement grossier de la digue .....	62
Figure 37 : Découpage structural de la digue POSTE .....	63
Figure 38 : Digue POSTE - Système de vannage de la Madeleine.....	63
Figure 39 : Trésor Public T02 - Profil de digue .....	64
Figure 40 : Trésor Public T02 - Schéma structurel .....	64
Figure 41 : Trésor Public T01 - Schéma structurel .....	65
Figure 42 : Trésor Public T01 - Talus érodé sub-vertical .....	66
Figure 43 : Trésor Public T01 - Arborescence déstructurant le mur en place.....	66
Figure 44 : Découpage structural de la digue de la Lisière du Clos .....	67
Figure 45 : Digue Lisière du Clos - Profil de digue.....	67
Figure 46 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel .....	70
Figure 47 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - digues rive droite et rive gauche en état actuel et lignes d'eau ...	70
Figure 48 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel.....	71
Figure 49 : Seuil aval au pont de l'Europe, vue vers l'amont - CNR.....	73
Figure 50 : Réseaux traversants sur les digues de l'Arve .....	74

Figure 51 – profil en long - définition des crêtes de digue.....	76
Figure 52 : Profil type de l'AVP structurel de 2018. ....	77
Figure 53 : Vues en plan de la sectorisation des digues en tronçons homogènes (RG et RD de l'Arve).....	80
Figure 54 : Profil type RD-T1.....	81
Figure 55 : Profil type RD-T2.....	82
Figure 56 : Profil type RD-T2.....	82
Figure 57 : Profil type RD-T4.....	84
Figure 58 : Profil type RD-T6.....	85
Figure 59 : Profil type RD T7.....	87
Figure 60 : Profil type RD T8.....	88
Figure 61 - Etanchéité au droit des pistes d'exploitation.....	90
Figure 62 : Voies d'accès au système d'endiguement – digues de l'Arve rive gauche.....	91
Figure 63 - Phasage des travaux.....	92
Figure 64 : Planning prévisionnel des travaux.....	92
Figure 65 - Niveau de référence de l'état actuel (source : EDD Bonneville Ayze, CNR, 2019).....	93
Figure 66 - Cartographie d'une brèche sur les tronçons à l'état actuel pour un état intermédiaire au cours de la réalisation des travaux (Phase 1 et 2 réalisées).....	95
Figure 67 : Cartographie des venues d'eau en Q100 Arve à l'état final.....	96
Figure 68 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude - Source S.M.3.A.....	98
Figure 69 : Localisation des linéaires de digue de l'Arve concernés par la VTA.....	99
Figure 70 : Meylan, Ile d'Amour et Isère amont, courbe de Charlet (photos : AD Isère).....	104
Figure 71 : Rupture de la digue en rive gauche.....	107
Figure 72 : Début de renard hydraulique RG en amont de la brèche.....	107
Figure 73 : Schéma de principe d'une rupture par surverse.....	109
Figure 74 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe.....	109
Figure 75 : Schéma de principe d'une rupture par effet de renard hydraulique.....	110
Figure 76 : Schéma de principe de rupture d'ensemble.....	111
Figure 77 - Localisation des campagnes de reconnaissances géophysiques.....	115
Figure 78 : Liste des essais in-situ réalisés en rive droite.....	124
Figure 79 : Description des carottes : SC28.540 ARG (à gauche) et SC.25.990RD à droite.....	126
Figure 80 : Résultats des essais pressiométriques.....	127
Figure 81 : Résultats des essais de perméabilité in-situ.....	128
Figure 82 - Courbes granulométriques des échantillons issus des sondages carottés.....	129
Figure 83 - Courbes granulométriques des échantillons issus des sondages à la pelle mécanique.....	129
Figure 84 - Définition schématique des paramètres de prédimensionnement des murs de soutènement.....	135
Figure 85 - Phasage de calcul et synthèse des résultats dans le cas d'un affouillement de 4,5m et d'une palplanche dégagée sur tout la hauteur affouillée.....	137
Figure 86 - évolution temporelle des niveaux d'eau dans l'Arve en crue pour les profils considérés.....	139
Figure 87 - dispositions constructives au droit des pistes d'exploitation.....	140
Figure 88 - Ouvrages concernés par l'étude, et type d'intervention - Arve RD.....	141
Figure 89 - Arbre type de probabilité.....	142
Figure 90 - vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [8]).....	144
Figure 91 - Recommandation de vérification de la sécurité structurale de la digue à la liquéfaction (recommandation du MEDDE, 2014 [8]).....	144
Figure 92 - accélération maximale de référence au niveau du sol en fonction de la zone de sismicité (Source : Recommandation du MEDDE, 2014 [8]).....	144
Figure 93 - paramètre de sol en fonction de la classe de sol (Source : Recommandation du MEDDE, 2014 [8]).....	145
Figure 94 - Modes de rupture considérés.....	146
Figure 95 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par surverse.....	147
Figure 96 - Vitesse d'écoulement sur le talus d'une digue en surverse - Cerema [10].....	148
Figure 97 - valeurs limites de dimensionnement de la résistance à l'érosion pour des mesures anti-érosions sélectionnées (source : Hewlett et al. – 1987 [11]).....	149
Figure 98 - mécanisme d'érosion par surverse en fonction des matériaux de la digue.....	150
Figure 99 : Largeur en crête et probabilité conditionnelle associée.....	151
Figure 100 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel.....	152
Figure 101 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel.....	153

Figure 102 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue) .....	154
Figure 103 : Profil en long à l'état projet .....	155
Figure 104 : Profil en long du tronçon de la RD19 .....	155
Figure 105 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai) .....	157
Figure 106 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai) .....	157
Figure 107 - Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source: CFBR, 2015 [12]) .....	158
Figure 108 - schéma du phénomène de suffusion .....	166
Figure 109 - Schéma du phénomène d'érosion de contact .....	167
Figure 110 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit .....	168
Figure 111 - Synthèse des facteurs aggravants vis à vis de l'érosion de conduit .....	170
Figure 112 - Probabilités de défaillance par érosion de conduit des tronçons .....	171
Figure 113 - Schéma du phénomène d'érosion régressive .....	172
Figure 114 - Rose des vents à Bonneville (Source : Meteoblue) .....	173
Figure 115 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe .....	174
Figure 116 - Valeurs de résistance à la contrainte d'arrachement de différents matériaux et techniques en cours d'eau (Source : B.Lachat) .....	175
Figure 117 – Contraintes tractrices limites en fonction du matériau- Guide GénieAlp 2013 .....	176
Figure 118 - Synthèse des facteurs influant vis-à-vis de l'érosion externe .....	181
Figure 119 - Probabilités de défaillance par érosion externe des tronçons (Q <sub>100</sub> ) .....	182
Figure 120 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1 .....	190
Figure 121 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1 .....	191
Figure 122 : Cartographie des venus d'eau du scénario 1 .....	192
Figure 123 : Vanne de régulation du ruisseau de la Madeleine, et exutoire en rive droite de l'Arve .....	193
Figure 124 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.1 .....	194
Figure 125 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.1 .....	195
Figure 126 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.1 .....	196
Figure 127 : Castorduc traversant l'ouvrage RD19 (VTA CNR 2017) .....	197
Figure 128 : Position des deux castorduc sur la RD19 .....	197
Figure 129 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=0h après la défaillance de la vanne .....	198
Figure 130 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=1h après la défaillance de la vanne .....	198
Figure 131 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=2h après la défaillance de la vanne .....	199
Figure 132 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=3h après la défaillance de la vanne .....	199
Figure 133 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.2 .....	200
Figure 134 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.2 .....	201
Figure 135 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.2 .....	202
Figure 136 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle S3.1 (en situation projet) .....	204
Figure 137 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T=1h après la rupture .....	205
Figure 138 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T=2h après la rupture .....	206
Figure 139 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T= 3h après la rupture .....	207
Figure 140 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.1 .....	208
Figure 141 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.1 .....	209
Figure 142 : Cartographie des venus d'eau du scénario 3.1 .....	210
Figure 143 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle S3.1 (en situation projet) .....	211
Figure 144 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=1h après la rupture .....	212
Figure 145 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=2h après la rupture .....	212
Figure 146 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=3h après la rupture .....	213
Figure 147 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.2 .....	214
Figure 148 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.2 .....	215
Figure 149 : Cartographie des venus d'eau du scénario 3.2 .....	216
Figure 150 : Station de référence par tronçon de l'Arve .....	236
Figure 151 : Dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise .....	241
Figure 152 : Consignes de sécurité en cas de débordements .....	247

Figure 153 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection.....	252
Figure 154 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source www.haute-savoie.gouv.fr .....	254
Figure 155 : Limites administratives du territoire relevant du SM3A .....	258
Figure 156 : Zone protégée par le système d'endiguement « Bonneville entre Arve et Borne » .....	259
Figure 157 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1 .....	261
Figure 158 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1 .....	262
Figure 159 : Cartographie des venus d'eau du scénario 1.....	263
Figure 160 : Vanne de régulation du ruisseau de la Madeleine, et exutoire en rive droite de l'Arve .....	264
Figure 161 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.1 .....	265
Figure 162 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.1 .....	266
Figure 163 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.1.....	267
Figure 164 : Castorduc traversant l'ouvrage RD19 (VTA CNR 2017) .....	268
Figure 165 : Position des deux castorduc sur la RD19 .....	268
Figure 166 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=0h après la défaillance de la vanne .....	269
Figure 167 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=1h après la défaillance de la vanne .....	269
Figure 168 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=2h après la défaillance de la vanne .....	270
Figure 169 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=3h après la défaillance de la vanne .....	270
Figure 170 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.2 .....	271
Figure 171 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.2 .....	272
Figure 172 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.2.....	273
Figure 173 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle S3.1 (en situation projet) .....	275
Figure 174 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T=1h après la rupture.....	276
Figure 175 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T=2h après la rupture.....	277
Figure 176 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T= 3h après la rupture.....	278
Figure 177 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.1 .....	279
Figure 178 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.1 .....	280
Figure 179 : Cartographie des venus d'eau du scénario 3.1.....	281
Figure 180 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle S3.1 (en situation projet) .....	282
Figure 181 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=1h après la rupture.....	283
Figure 182 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=2h après la rupture.....	283
Figure 183 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=3h après la rupture.....	284
Figure 184 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.2 .....	285
Figure 185 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.2 .....	286
Figure 186 : Cartographie des venus d'eau du scénario.....	287

## 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 de l'Arve et 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 : Description des crues historiques – source étude historique réalisée par Acthys Diffusion [5] .....	36
Tableau 6 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve.....	45
Tableau 7 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants .....	68
Tableau 8 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants (bis) .....	68
Tableau 9 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve.....	72
Tableau 10 : Liste des seuils dans le lit de l'Arve et du Borne sur la zone d'étude.....	72
Tableau 11 : Caractéristiques des buses .....	73
Tableau 12 : Gros réseaux en rive droite de l'Arve.....	74
Tableau 13 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu dans l'AVP optimisé au droit de chaque secteur .....	79

Tableau 14 : Débits estimés et mesurés durant différentes crues de l'Arve et/ou du Borne dans le secteur de l'endiguement.....	98
Tableau 15 : Hiérarchisation de l'état de fragilité des endiguements de l'Arve (rive gauche et rive droite).....	102
Tableau 16 : Identification des Situations dangereuses et Potentiels de danger pouvant intervenir sur une digue de protection contre les inondations (source : CNR, 2019).....	113
Tableau 17 : Synthèse extraite de l'EDD de 2019 avec Arve en état actuel (CNR).....	121
Tableau 18 - Caractéristiques mécaniques obtenues sur les sols testés sur les boites de cisaillement .....	130
Tableau 19 - Coefficients partiels et de modèle - ELU stabilité d'ensemble (glissement) .....	131
Tableau 20 - Caractéristiques géométriques des digues/berges de la rive droite .....	132
Tableau 21 - Synthèse des calculs de stabilité au glissement des talus côté Arve et aval .....	133
Tableau 22 - Synthèse des calculs de stabilité au glissement (Talus amont).....	134
Tableau 23 - Dimensionnement des enrochements de protection et des épis pour les différents tronçons de l'Arve ...	135
Tableau 24 - Synthèse du prédimensionnement des murs de soutènement sur les tronçons concernés.....	136
Tableau 25 - Calcul des temps de percolation pour les profils considérés en fonction des coefficients de perméabilité retenus.....	138
Tableau 26 - Temps de crue/décru pour les profils considérés déterminés à partir des limnigramme de crue .....	139
Tableau 27 : Objectifs de protection du système d'endiguement .....	141
Tableau 28 - Probabilité conditionnelle proposée par Vick (2002) .....	143
Tableau 29 : Grille de probabilités conditionnelles pour la progression de l'érosion par surverse jusqu'à la rupture.....	150
Tableau 30 : Probabilité de rupture à la surverse .....	156
Tableau 31 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après le CFBR (pour $F_s > 1,10$ ) .....	159
Tableau 32 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après Vick (Pour $F_s < 1,10$ ) .....	159
Tableau 33 - probabilités conditionnelles pour l'instabilité des talus au glissement.....	160
Tableau 34 - Probabilités conditionnelles pour la propagation du glissement jusqu'à la rupture .....	160
Tableau 35 - Tronçons calculés pour l'évaluation de la stabilité au glissement.....	163
Tableau 36 : Probabilité de rupture par instabilité de talus .....	165
Tableau 37 - Synthèse de l'analyse à l'érosion interne de l'EDD CNR 2019 .....	167
Tableau 38 : Grille des probabilités pour l'initiation de l'érosion externe .....	176
Tableau 39 : Probabilités de défaillance par érosion externe.....	177
Tableau 40 - Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale $Q_{100}$ .....	183
Tableau 41 : Niveaux de danger et de protection du système d'endiguement .....	187
Tableau 42 : Niveau de protection du système d'endiguement après travaux.....	189
Tableau 43 : Technique de confortement de digue après dessouchage .....	225
Tableau 44 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO .....	238
Tableau 45 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés pendant les travaux (digue de l'Arve rive droite) .....	251
Tableau 46 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés après les travaux (digue de l'Arve rive gauche) .....	253
Tableau 47 : Niveau de protection du système d'endiguement après travaux.....	260

## 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, SYNTHESE DU DIAGNOSTIC DE LA VEGETATION IMPLANTEE SUR 3 DES SYSTEMES 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] «MALLETT., 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 – HYDROGEOTECHNIQUE».
- [58] «Etude des crues extrêmes du Borne à Saint-Pierre-en-Faucigny (149 km<sup>2</sup>) 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 km<sup>2</sup>), à la station EDF/DTG du Pont Neuf à Arthaz/Reignier (1635 km<sup>2</sup>) et au Pont d'Etrembières (1875 km<sup>2</sup>) 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 km<sup>2</sup>** (dont 102 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup> (dont 102 km<sup>2</sup> 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 :

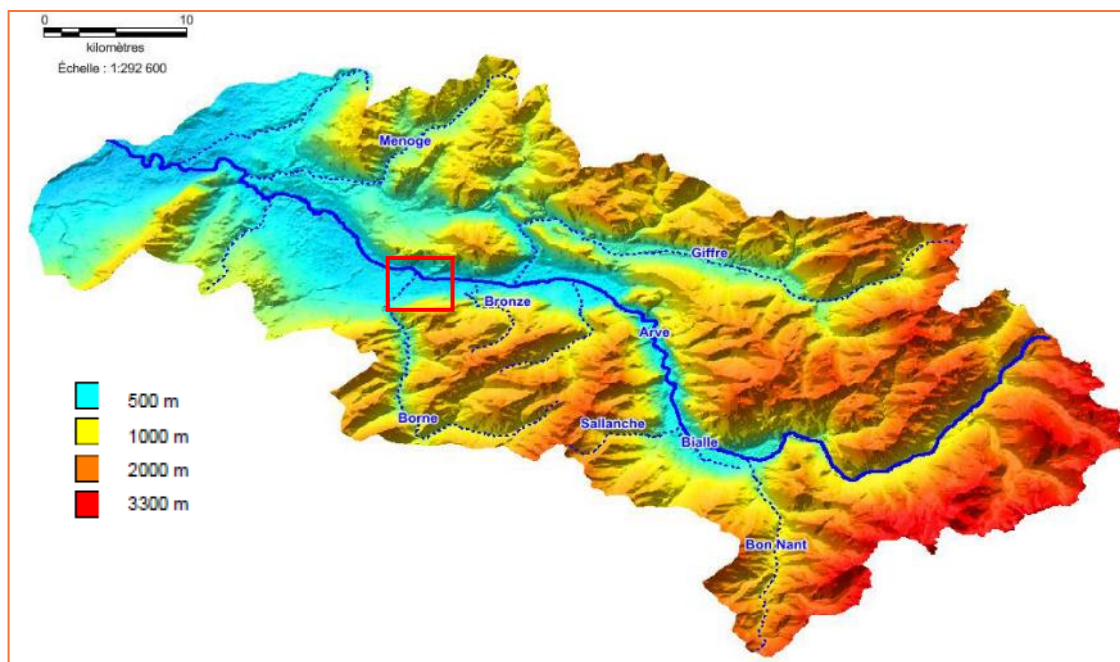


Figure 1 : Bassin versant de l'Arve avec ces principaux affluents (source : étude ISL)

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 (affluent principal de l'Arve sur le secteur d'étude)**

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.

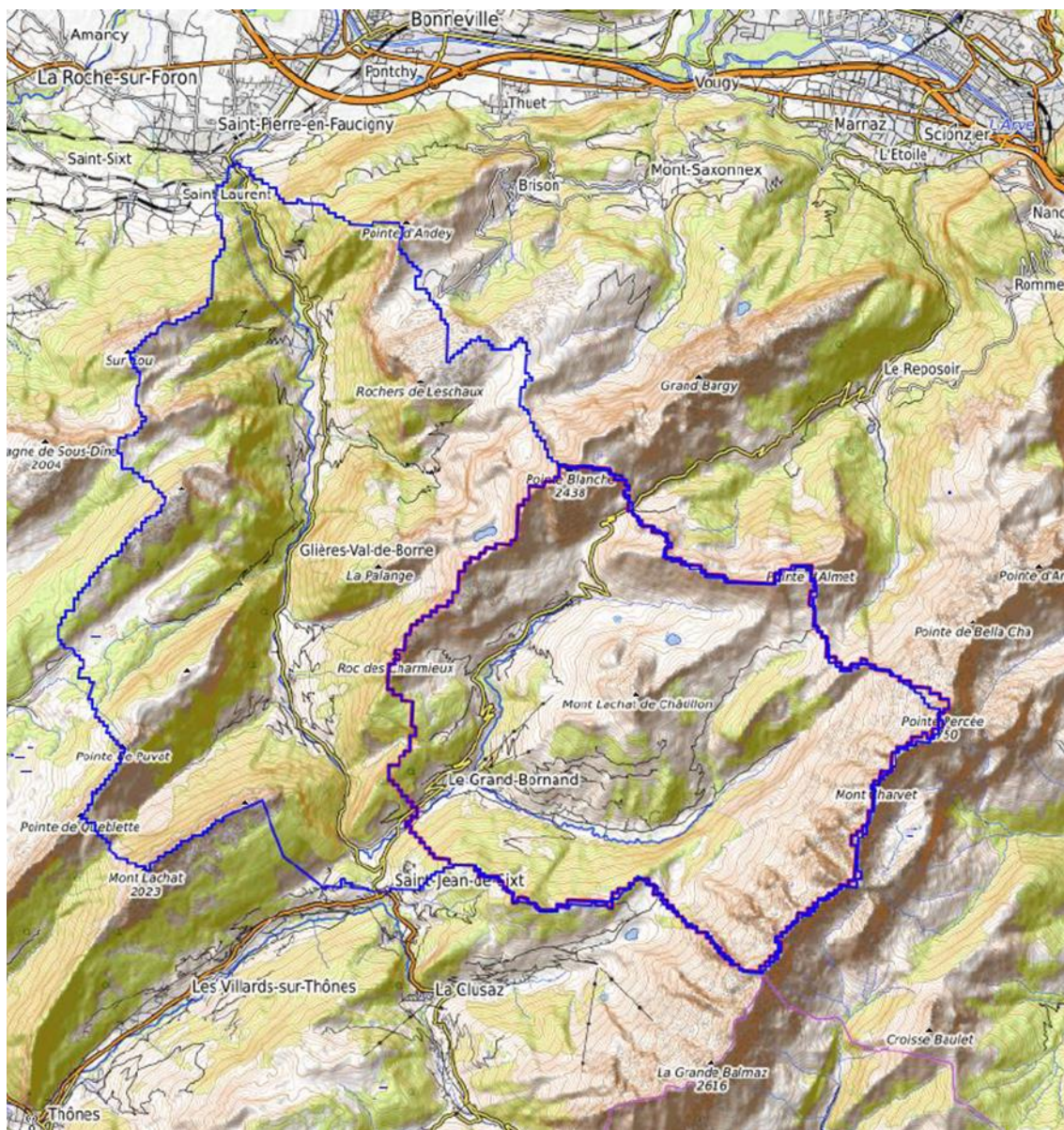


Figure 2 : Bassin versant du Borne (source : étude EDF). Découpage en deux sous bassins versants

#### 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 <sup>2</sup> )	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.

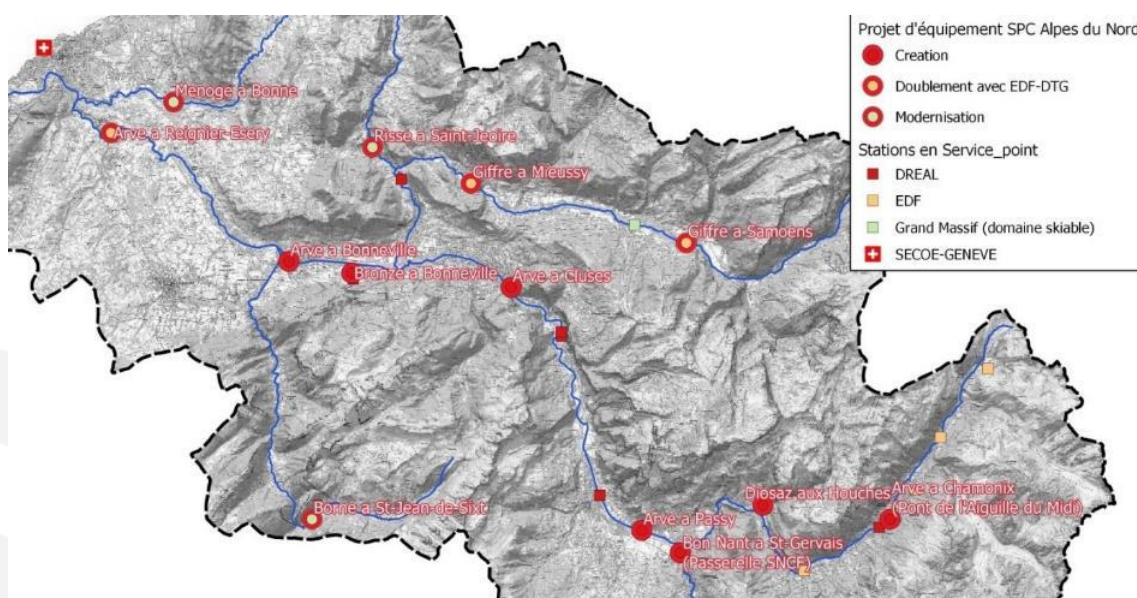


Figure 3 : Stations de références au sein du réseau hydrométrique du SPC Alpes du nord

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 km<sup>2</sup>, 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 ([DA26]) et de l'étude, réalisée par Hydratec (cf. [DA28]) en 2014.

Tableau 2 : Débits de pointe pour des crues de l'Arve et du Giffre

	Station	Surface BV (km <sup>2</sup> )	Q10 (m <sup>3</sup> /s)	Q100 (m <sup>3</sup> /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 m<sup>3</sup>/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 [DA49] 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 hydrologie 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 : <b>MARIGNIER [Plan Séraphin]</b>				
niveau de vigilance	crues historiques			zone de transition	
	date	hauteur	débit	hauteur	débit
	22 sept 1968	4m30		4m30 à 4m50	540 à 580 m³/s
	1 <sup>er</sup> mai 2015	3m91	456 m³/s		
				3m30 à 3m50	330 à 370 m³/s
	23 déc 2022	3m14	293 m³/s		
	.31 mai 2010		210 m³/s à Taninges		
	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)*

#### 4.1.4 Environnement hydro-morphologique

##### 4.1.4.1 Evolution historique

Source : SOGREAH 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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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-Rumilly 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 m<sup>3</sup> 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 17<sup>ème</sup> siècle avec les aménagements d'endiguement visant à protéger les zones où allait se développer l'urbanisation. Ce n'est qu'à partir du 18<sup>ème</sup> siècle qu'un endiguement durable a commencé à se mettre en place et s'est poursuivi activement au 20<sup>ème</sup> 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 m<sup>3</sup> de matériaux arrivant dès l'amont, seuls 15 000 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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<sup>ème</sup> 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 m<sup>3</sup>, 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, Ref 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 m<sup>3</sup>/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 en revanche 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.

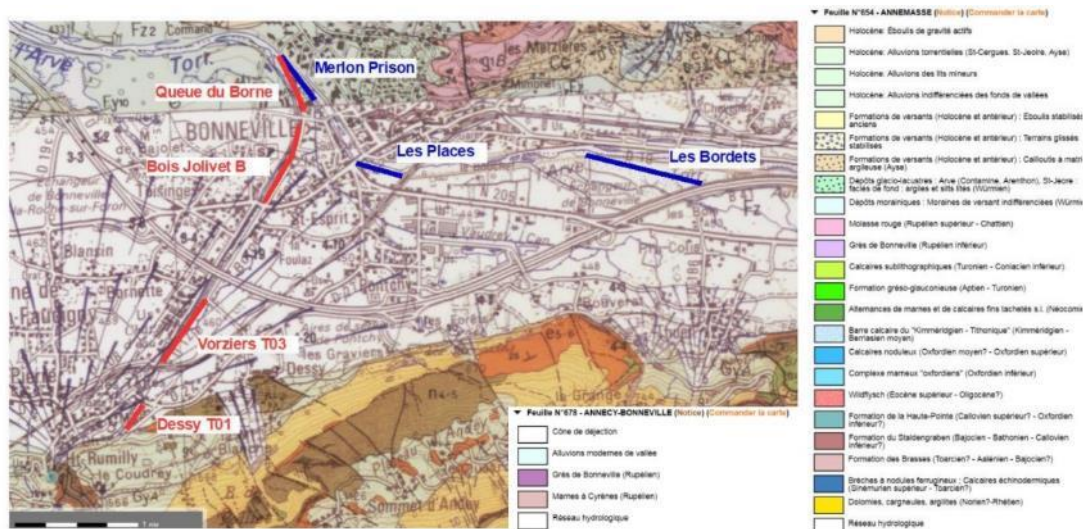


Figure 4 : Extrait des cartes géologiques d'Annemasse et d'Annecy-Bonneville au 1/50000 du BRGM

Le dossier d'ouvrage [2] 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).

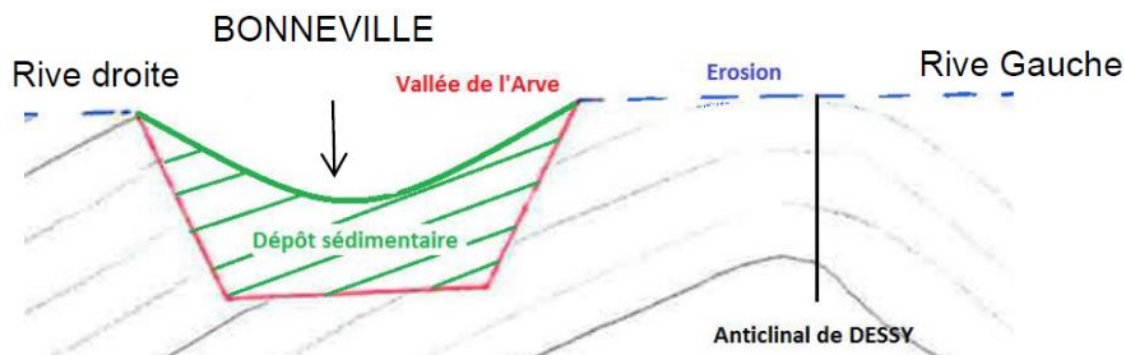


Figure 5 : Schéma en coupe de la géologie du site

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 recoupent 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, 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. 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/Thuet », « 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 Thuet.
- Les réservoirs de biodiversité (ZNIEFF Gravière de l'Arve, ZNIEFF Etang de Thuet) 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, Buddleja du père David, développés surtout en amont de l'autoroute. Une station de Buddleja est présente à la confluence
- Arve : Renouée du Japon, Robinier faux-acacia, Tête d'or, Buddleja du père David, Balsamine à petites fleurs, Berce du Caucase. Les stations les plus importantes sont 2 spots de Buddleja, 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	Potentielle	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.

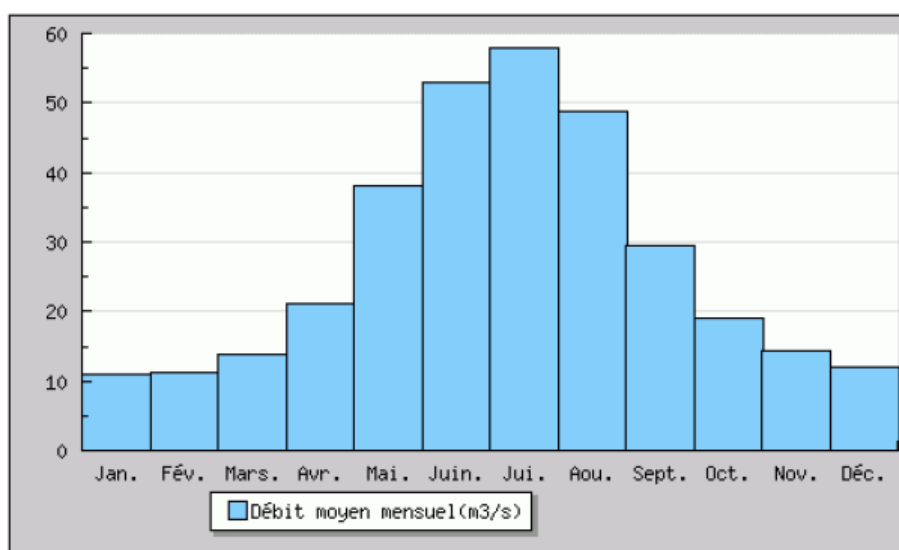


Figure 6 : Débit moyen mensuel de l'Arve à Sallanches – Période 1965 – 2018 – Source banque HYDRO

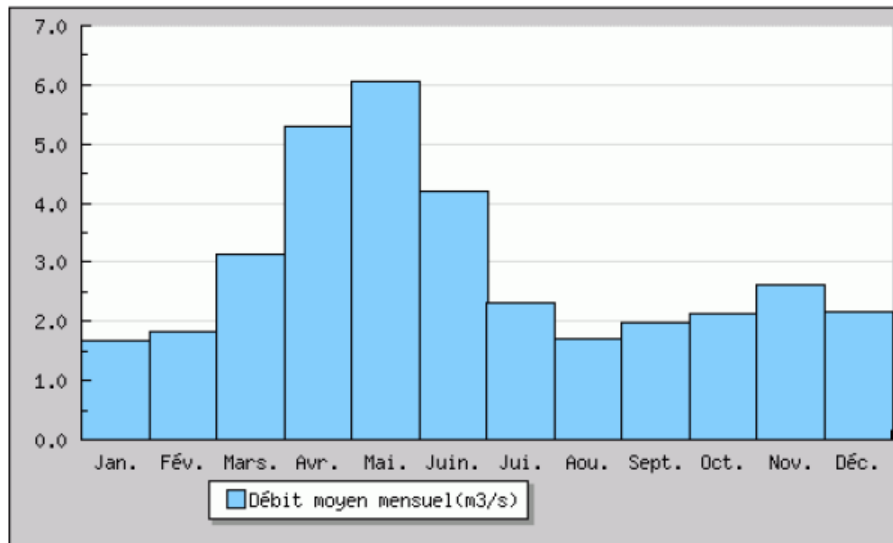


Figure 7 : Débit moyen mensuel du Borne à Saint-Jean-de-Sixt – Période 1964 – 2018 – Source banque HYDRO

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 [3] 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 [4] 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 km<sup>2</sup>) 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 km<sup>2</sup>), à la station EDF/DTG du Pont Neuf à Arthaz/Reignier (1635 km<sup>2</sup>) et au Pont d'Etrembières (1875 km<sup>2</sup>) par la méthode SCHADEX pour SM3A, EDF, indice A, H-44200966-2020-000284, 07/10/2020**

Concernant les occurrences retenues sur l'Arve, le parti a donc été pris de procéder 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 <sup>3</sup> /s)	Borne (m <sup>3</sup> /s)	Bronze (m <sup>3</sup> /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
<b>Q100</b>	<b>100</b>	<b>1081,0</b>	<b>90,0</b>	<b>13,0</b>
Q200	200	1244,1	101,5	13,0
Q300	300	1344,6	108,3	13,0
<b>Q400</b>	<b>400</b>	<b>1415,2</b>	<b>113,5</b>	<b>13,0</b>
Q1000	1000	-	128,3	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 de l'Arve RD :**
  - **Q100 Arve (1081.0 m<sup>3</sup>/s) + Q Borne (90.0 m<sup>3</sup>/s) + Q Bronze (13.0 m<sup>3</sup>/s)**
  - **Q400 Arve (1415.2 m<sup>3</sup>/s) + Q Borne (113.0 m<sup>3</sup>/s) + Bronze (13.0 m<sup>3</sup>/s)**

Le graphique ci-dessous présente les hydrogrammes relatifs à la crue centennale de l'Arve. 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 (Etudes EDF retenues par le SM3A).

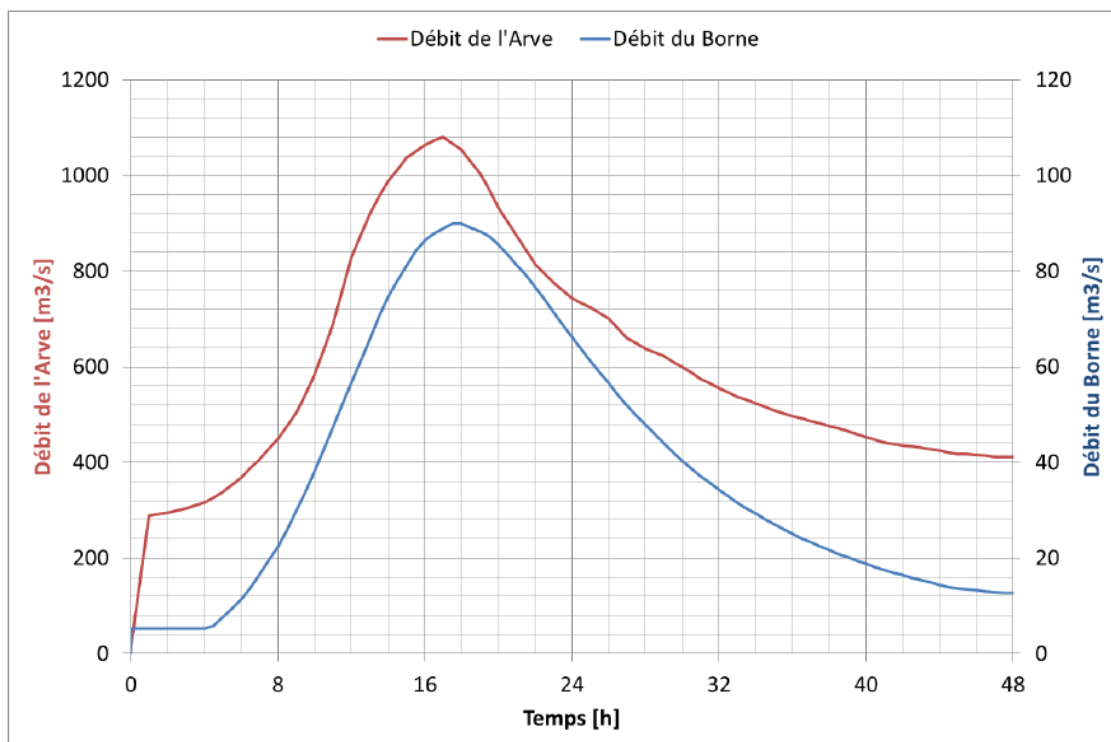


Figure 8 : Hydrogrammes de crues relatifs à la crue centennale de l'Arve

### 4.2.3 Les crues historiques

Les principales crues ayant le plus impacté le système d'endiguement "Bonneville Ayze" 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 Ponchy.	Dessy amont/aval – Vorzier T03
25-26/10/1778	Arve/Borne	Très forte crue de l' <b>Arve</b> . La plaine est inondée de part et d'autre. Le lit de la rivière s'est déplacé en plusieurs endroits. Crue du <b>Borne</b> . 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 <sup>3</sup> . 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' <b>Arve</b> . 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 <b>Borne</b> . 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 <sup>er</sup> 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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /s, légèrement inférieur à Q10 au barrage des Houches (160m <sup>3</sup> /s).	

Tableau 5 : Description des crues historiques – source étude historique réalisée par Acthys Diffusion [5]

#### 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 suivante. 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.

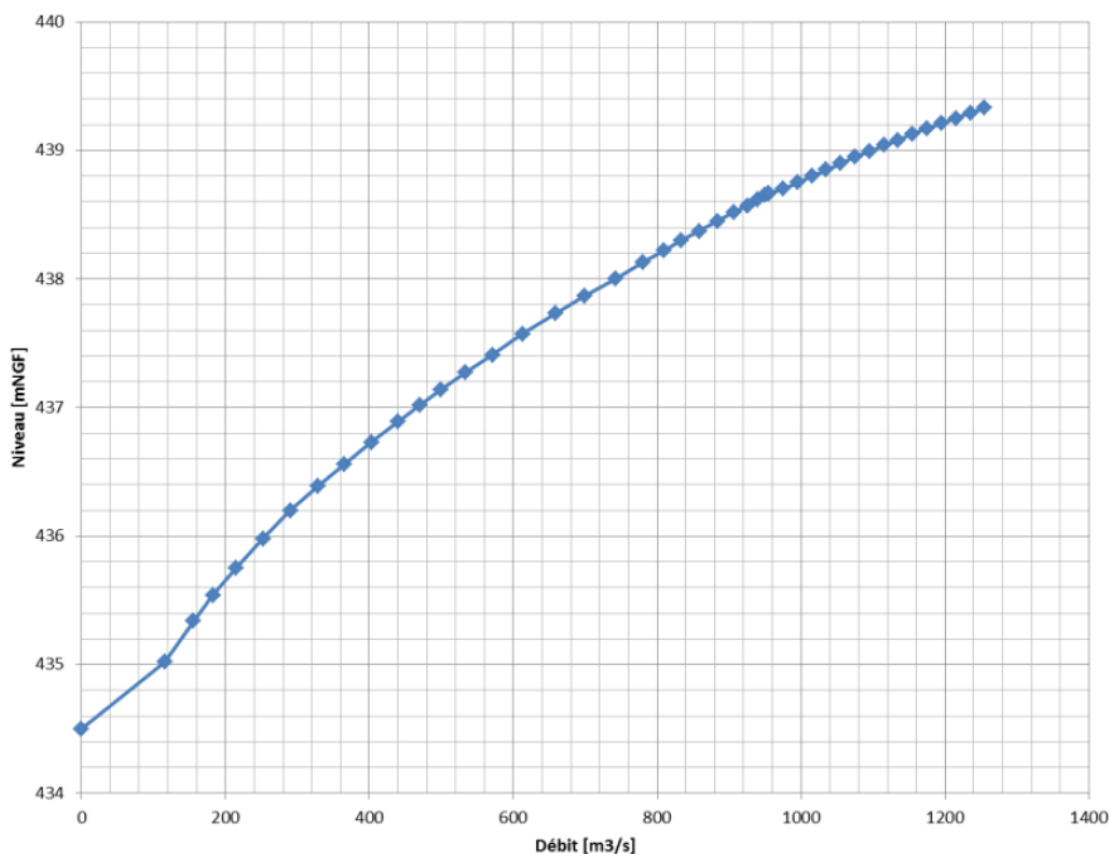


Figure 9 : Construction de la courbe de tarage à l'aval du modèle

### 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 km<sup>2</sup>.

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 (confluence Borne/Arve), ainsi que l'Arve du PK33.3 au PK24.1.



Figure 10 : 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 m<sup>3</sup>/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 (vers le milieu de l'endiguement de Corbière) : 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 présentés dans l'annexe hydraulique.

**Le modèle utilisé inclut ces éléments :**

- **Bathymétrie Arve : 2017**
- **Prise en compte de l'AVP du Borne**
- **Calage Strickler sur le Borne : 22 m<sup>1/3</sup>/s (validé par SM3A au début des études)**
- **Calage Strickler sur l'Arve : 35 m<sup>1/3</sup>/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'arase 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**

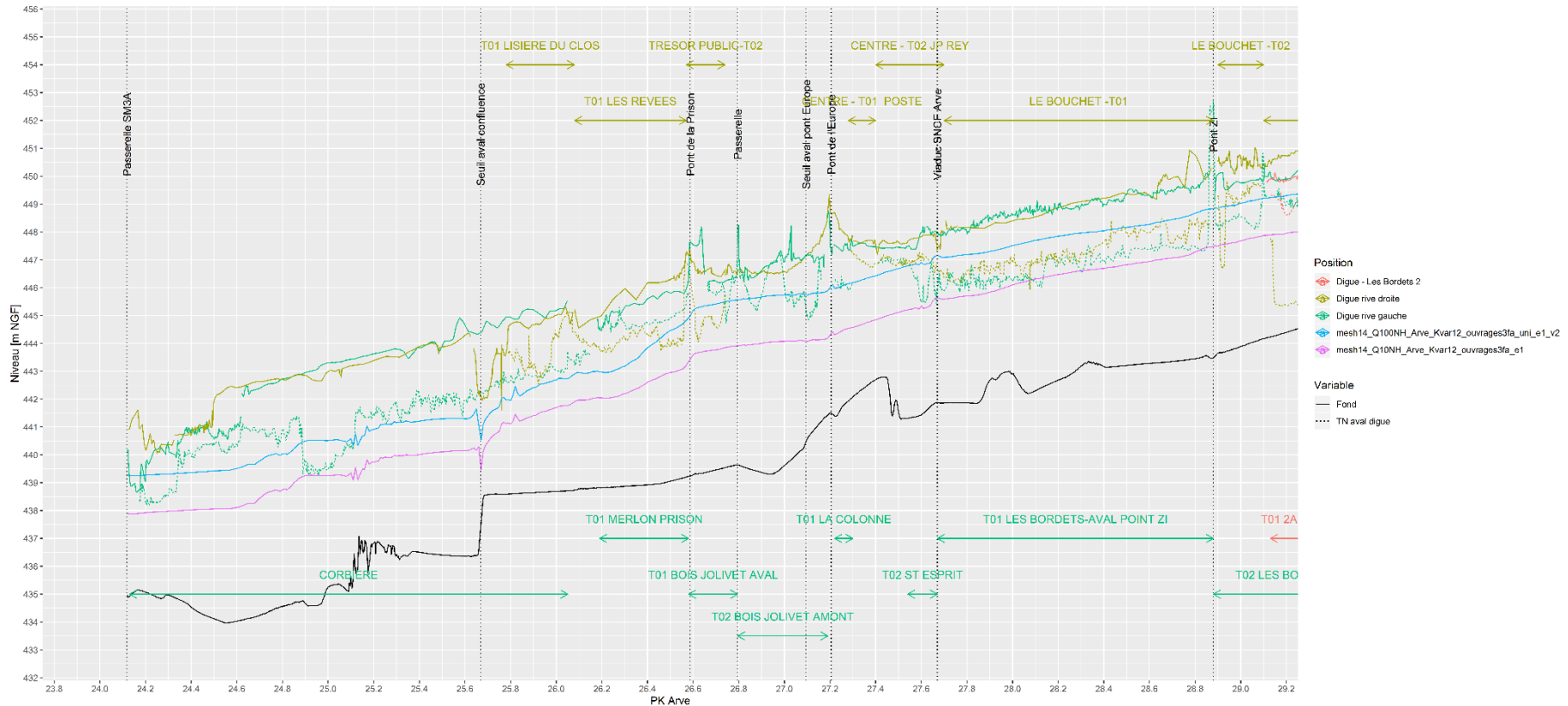


Figure 12 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel

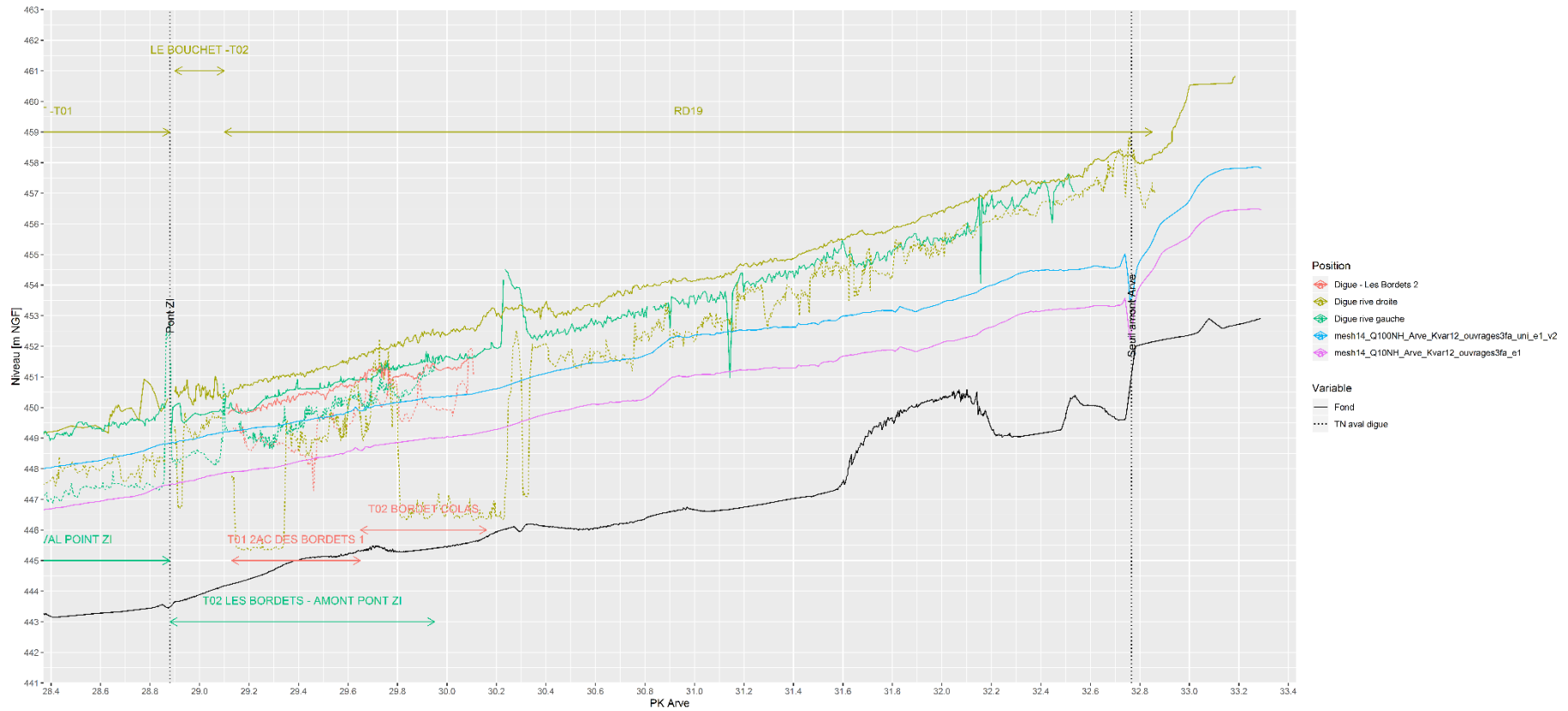


Figure 13 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel

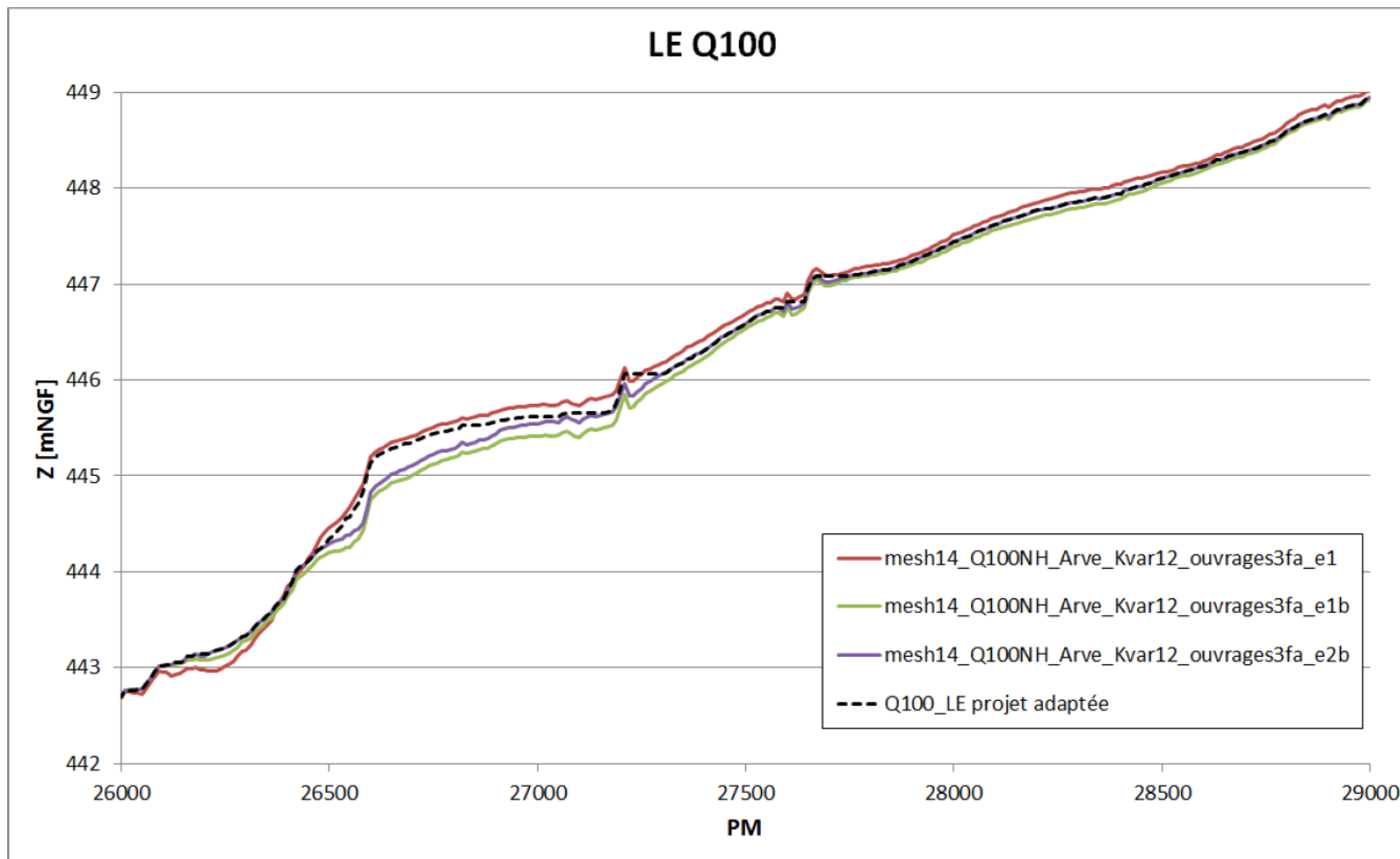


Figure 14 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue)

## 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 Ayze 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.

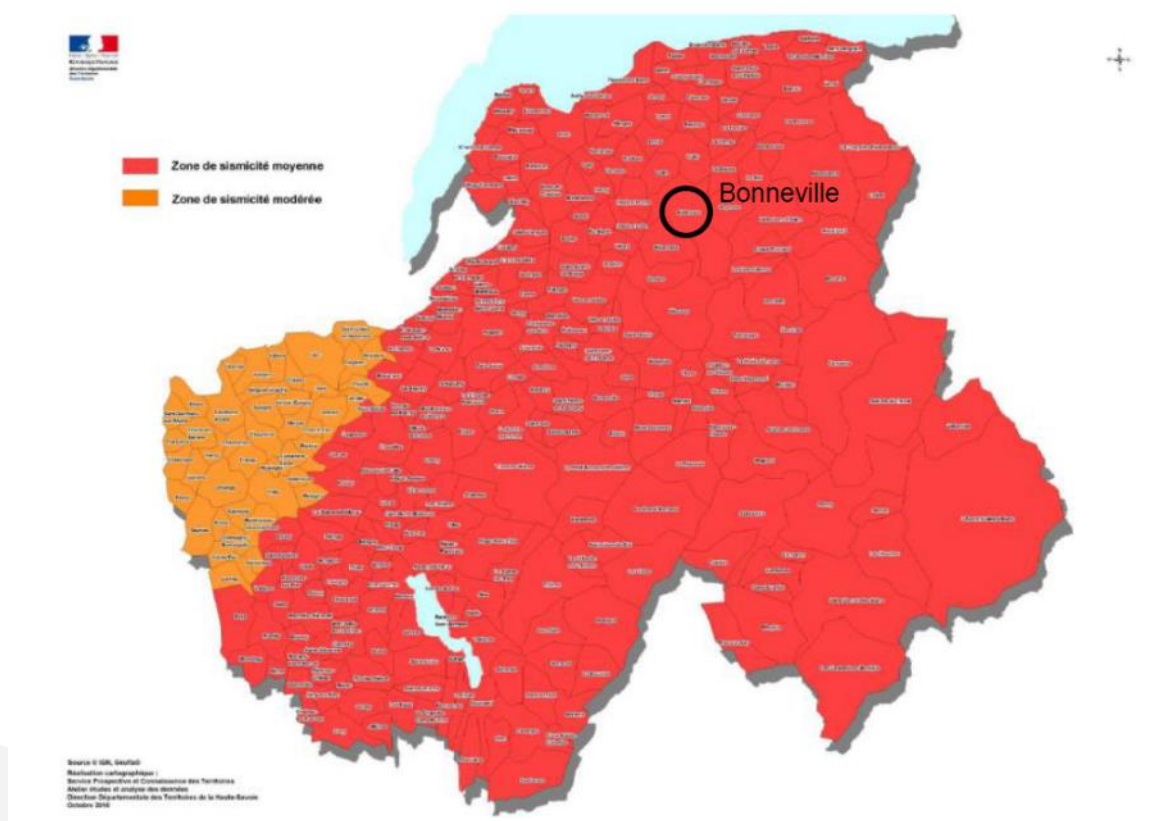


Figure 15 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source [www.haute-savoie.gouv.fr](http://www.haute-savoie.gouv.fr)

### 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, 6 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 (Arve).

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100 870m <sup>3</sup> /s Arve 180m <sup>3</sup> /s Borne	Q200 972m <sup>3</sup> /s Arve 195m <sup>3</sup> /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 6 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve

Suivant ce tableau, la hauteur d'eau minimale d'air libre pour la Q200 est :

- 1.44 m sous le pont de la Prison pour l'Arve ;

**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'embâcle.

## 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, Ref 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 m 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 engrèvements 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.

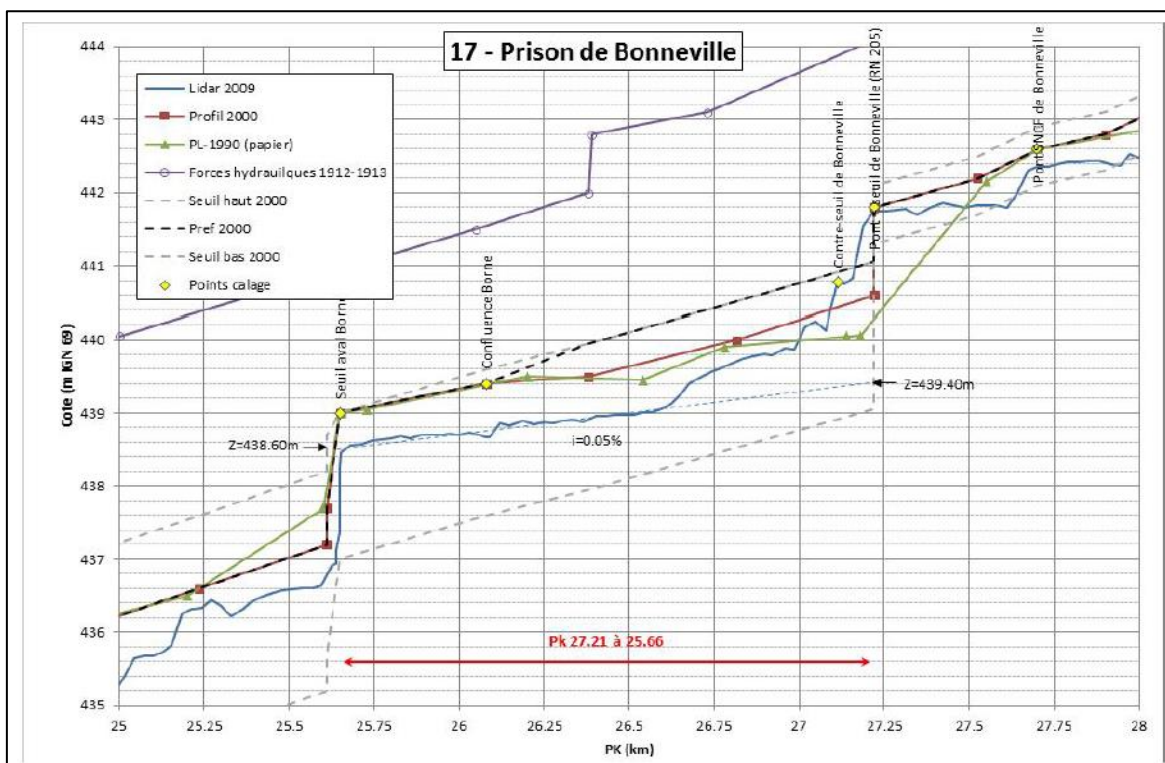


Figure 16 : Profil en Long - Evolution morphologique - Prison de Bonneville – Source Hydratech – Juillet 2013

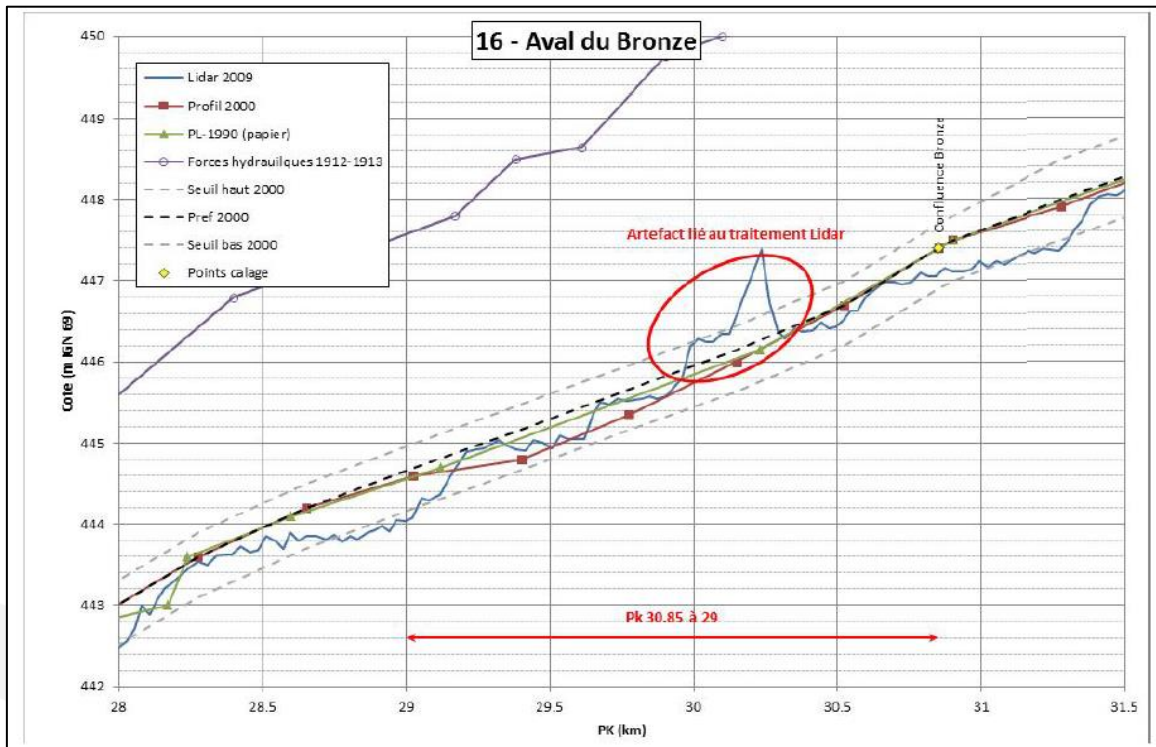


Figure 17 : Profil en Long - Evolution morphologique – Aval Bonze – Source Hydratech – Juillet 2013

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

Le transport solide est très important en amont des gorges du Haut-Rumilly 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 Ayze 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.

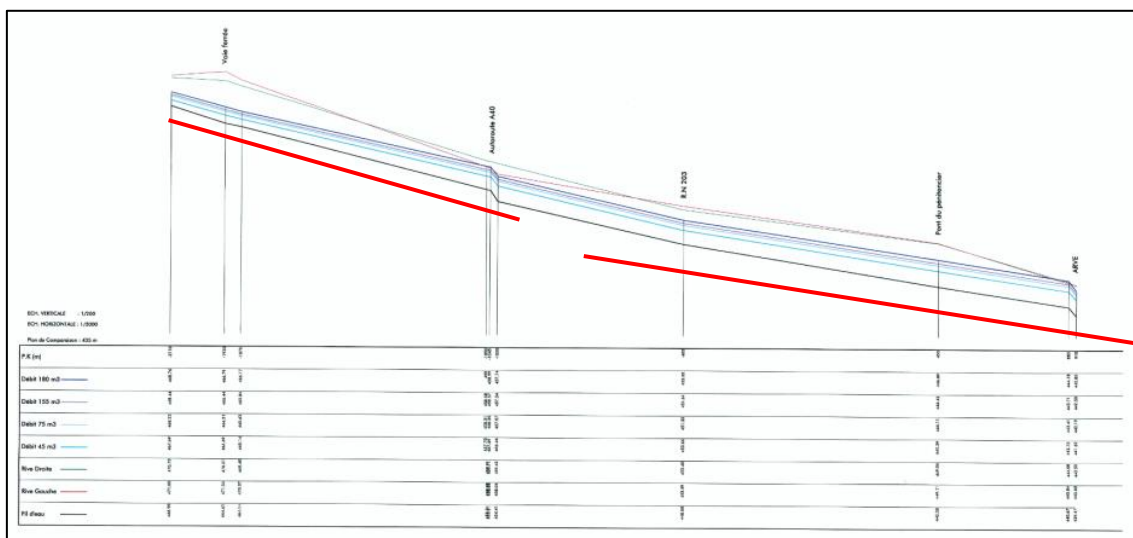


Figure 18 : Profil en long du Borne à hauteur de la zone d'étude – SOGREAH 1998

\*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 18) 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 19 : 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.

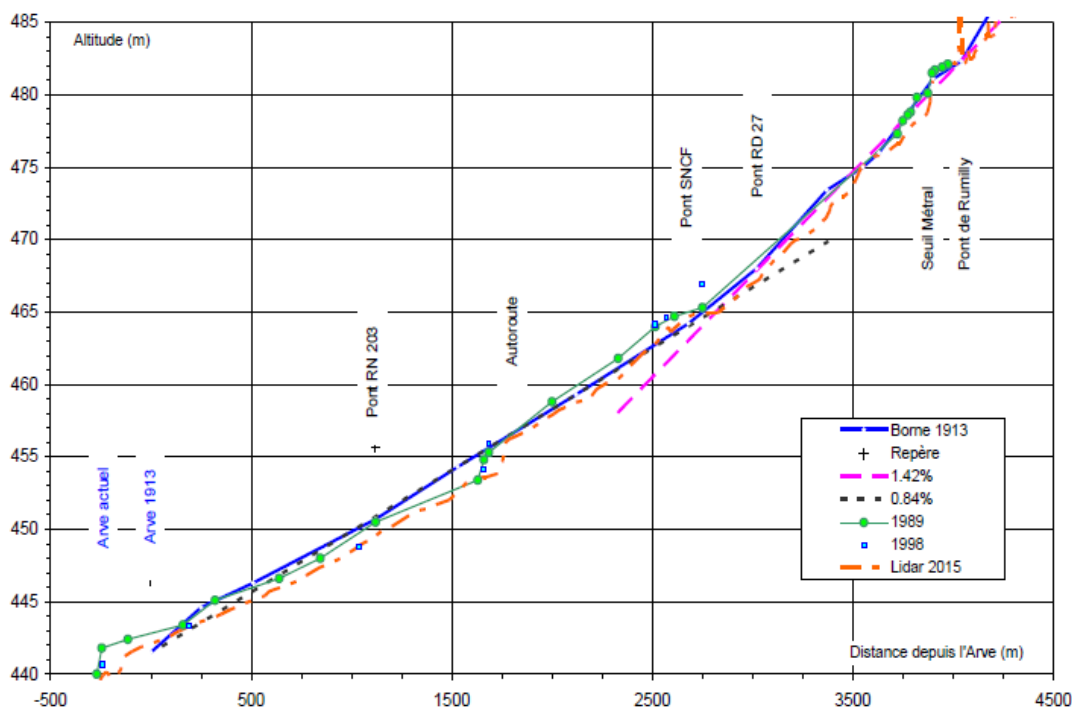


Figure 20 : Évolution des niveaux sur le cône de déjection Borne – ETRM

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 constater 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 Ayze** » est situé sur les communes de Bonneville et d'Ayze dans le département de la Haute-Savoie (74). Il est référencé sous l'identifiant : **ARVE – RD – BONNE – 25.79**.

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

# Etude de dangers des digues de Bonneville, AYZE et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville AYZE" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

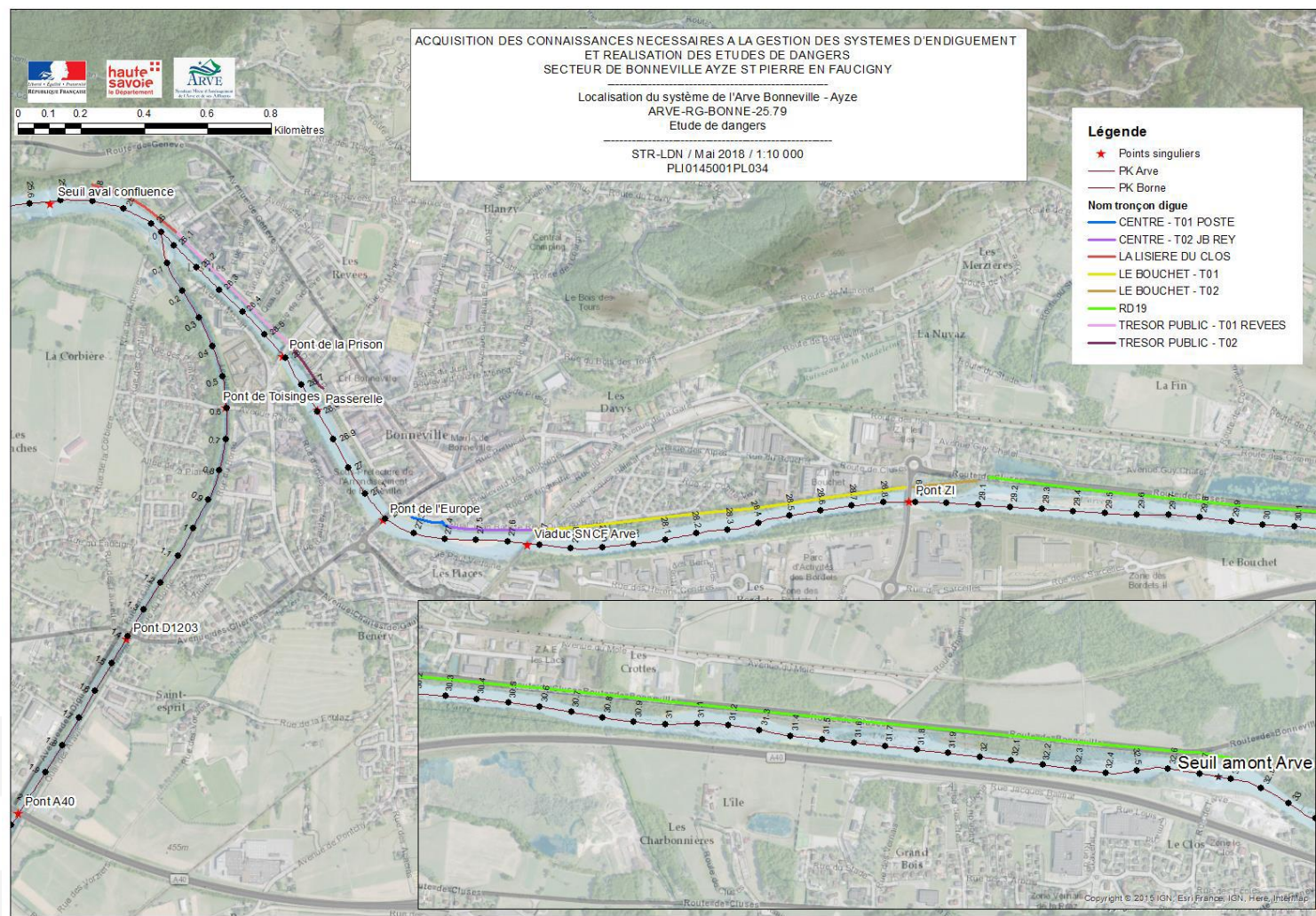


Figure 21 : Localisation des ouvrages constitutifs du SE (source : CNR, 2016)

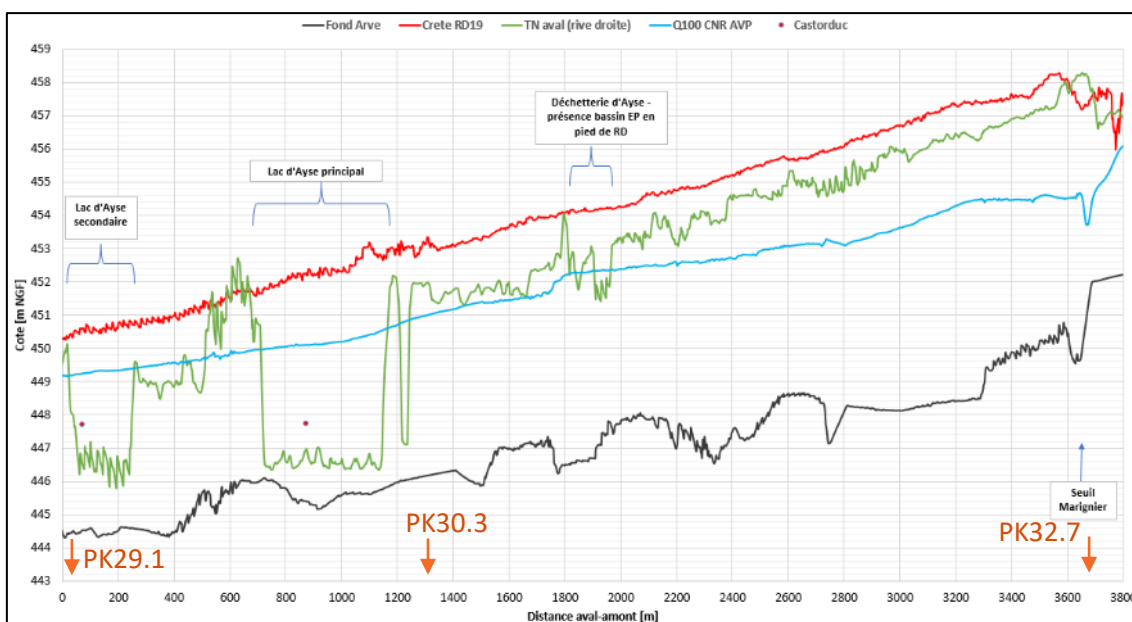
**Intégration de la RD19 dans le système d'endiguement (analyse 2023) :**

Le tronçon nommé « RD19 » dans l'étude de dangers de CNR de 2019 est constitué d'un remblai large, surmonté d'une voirie. Il s'agit de la route départementale D1205 (route de Cluses à trois voies de circulation).

Ce tronçon est situé entre PK 29.1 et PK 32.7.

Entre le PK 30.3 et le PK 32.7, l'analyse hydraulique et topographique du tronçon montre les caractéristiques suivantes :

- Hauteur moyenne du remblai par rapport au terrain naturel : 90 cm ;
- Largeur du remblai : 30 m à 40 m ;
- Absence de mise en charge en crue centennale de l'Arve : -0.8 m ponctuellement et -1.9 m en moyenne → hors au droit de la déchetterie (présence d'un bassin de gestion des EP)



**Figure 22 - Profil en long du tronçon de la RD19**

En considérant une charge maximale sur ce remblai de grande largeur (en cas de crue extrême supérieure à la Q1000), le rapport B/H est de 30 (au minimum). Ce gradient est largement inférieur au gradient hydraulique permettant de mettre en mouvement les sables fins (matériaux défavorables), fortement érodables. Par conséquent, le rapport largeur sur hauteur d'eau maximale permet d'associer ce tronçon à la notion de « terre », dont le risque rupture est considéré comme « nul ».

**La « RD19 » n'est pas retenue dans le système d'endiguement entre le PK 30.3 et le PK 32.7. Ce point est validé par le SM3A.**

**Entre le PK 29.1 et le PK 30.3, la route est toujours large mais la présence des Lacs d'Ayze ne permet pas d'écarter ce tronçon du système d'endiguement en rive droite de l'Arve (le remblai participe à la protection contre les inondations de l'Arve).**

### 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 Ayze, de l'étude historique et des visites réalisées sur les digues lors de la VTA en 2017.

#### 5.1.2.1 Historique

Les digues de l'Arve 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 XVIIIème 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 DE LA RD19 (y compris secteur non retenu dans le SE)

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

##### Digue route

- Dates de construction : 1824-1836 / 1882
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : aval lieu-dit « Chez Millet »
- Limite aval : environ 250 m en amont du rond-point de la RD19
- Le linéaire total est de 3751m, pour une hauteur maximum de 6,5m et un fruit du talus 5H/3V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 2,00m.
- Présence d'un chemin de circulation en crête (partie amont), permettant la circulation de petits engins ainsi qu'une route départementale en parallèle.
- Végétation dense sur les berges en pied de digue, arbres et arbustes.

Quatre profils principaux plus un secondaire ont été réalisés pour en rendre compte (Figure 23). Les réparations ponctuelles au perré et les rechargements en enrochements n'ont pas été intégrés Le secteur C voit sont talus en enrochements repris en pierres de tailles (C'- 1882).

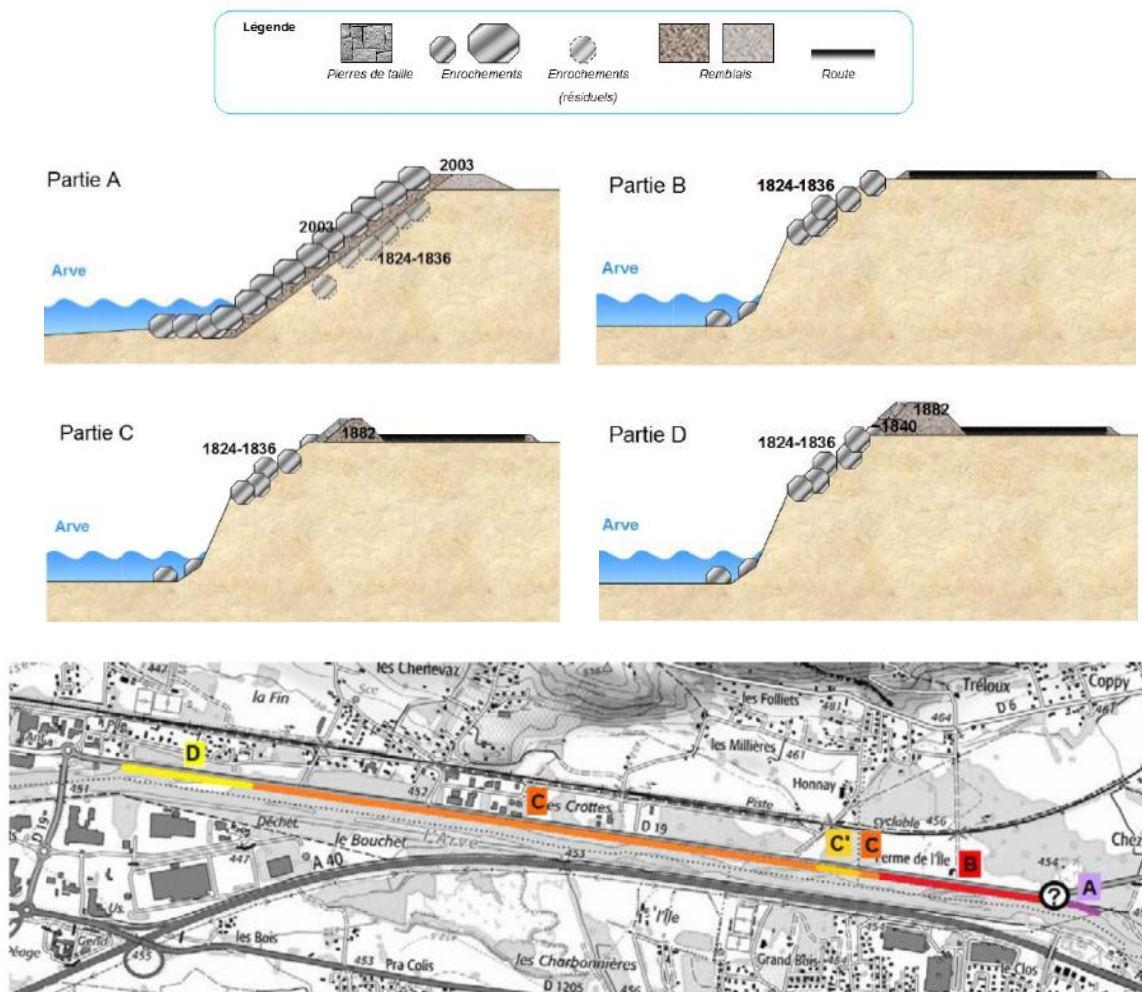


Figure 23 : Découpage structural de la digue RD19

- Partie A : 180 mètres environ. Enrochement sarde, recouvert par un nouvel enrochement début XXIème siècle, en lien avec le seuil. Travaux en cours au niveau du virage de la route, le profil peut en être affecté, il n'est pas représenté (symbolisé par « ? » sur la Figure 23) ;
- Partie B : 670 mètres. Digue sarde uniquement ;
- Partie C : 2420 mètres. Digue sarde surmontée d'un talus en 1882 avec perré sur 150 mètres (C') ;
- Partie D : 480 mètres. Identique à C, avec un petit talus sarde en remblais (~1840) sous le talus rehaussé de 1882.

Sur le terrain, le petit talus établi entre la route et la rivière est visible. Sa hauteur s'amenuise d'aval en amont. En revanche, sur les berges, la végétation permet difficilement d'appréhender les structures anciennes (enrochements ou perrés), hormis quelques indices. En amont du tronçon (partie A), le seuil récent est bien visible ainsi que la protection des berges associée. L'ensemble des enrochements est dans un très mauvais état, déstructuré ou manquant.

L'ensemble du linéaire alterne banquettes boisées et zones fortement érodées du fait de la divagation du lit de l'Arve (Figure 24). L'ensemble des zones érodées commencent à montrer une géométrie critique avec des phénomènes de sous-cavage

importants. La campagne de reconnaissance géophysique réalisée par IMG en 2017 évoque parfaitement cette pathologie (Figure 25).



Figure 24 : Divagations du lit de l'Arve - Google Maps

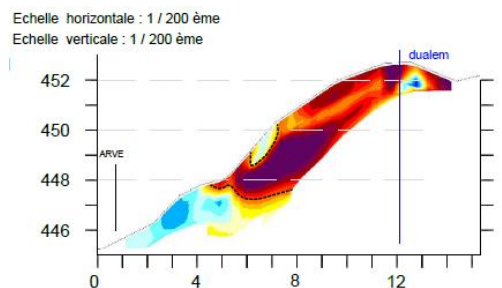


Figure 25 : RD19 Profil Géophysique – IMG

Notons la présence de 2 castorduc et d'un passage à faune (extrémité amont du tronçon) sur le linéaire du secteur (Figure 26).



Castorduc



Un exutoire du réseau de drainage

Figure 26 : RD19 : Exemples de conduites traversant l'ouvrage – VTA CNR 2017

### 5.1.2.3 Digue du Bouchet - T02

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

- Dates de construction : 1834 / 1840 et 1860 / 1873-1874 / 1883 / 1989 / 2004
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : 205 m en amont du pont de la ZI
- Limite aval : pont ZI
- Le linéaire total est de 205m pour une hauteur maximum de 1m et un fruit du talus 3H/2V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 0,90m.
- Sur la partie amont on remarque la présence de nombreux arbres côté rivière, venant déstructurer le corps de digue. Sur la partie aval, malgré l'âge des ouvrages (une quinzaine d'années), une végétation superficielle est déjà en

place, pour l'instant mécaniquement inoffensive, mais qui diminue considérablement la visibilité des enrochements.

- Les reconnaissances géophysiques ne sont pas concluantes dans cette zone à cause de l'effet néfaste des blocs d'enrochement (présence de réseaux incertaine).

En 2004, la construction du pont de la ZI des Bordets impacte la partie aval de la digue. Les données manquent pour préciser l'impact du chantier sur les ouvrages. La visite de terrain révèle une digue en enrochements libres. Reste à savoir si celle-ci recouvre ou remplace tout ou en partie les digues préexistantes (Figure 27).



Figure 27 : Photo aérienne de la zone du Bouchet T02 durant la période de la construction du pont de la ZI

Deux structures de digues sont observables sur site :

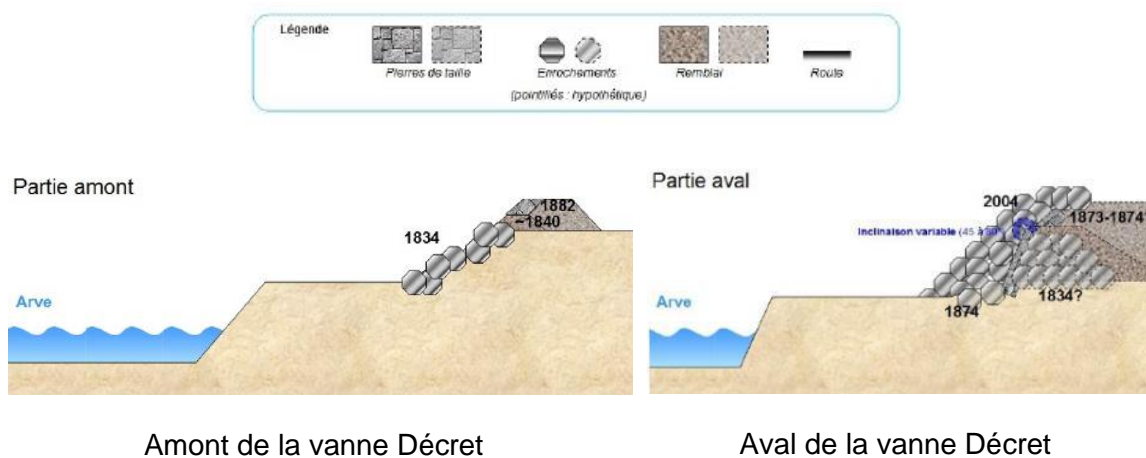


Figure 28 : Découpe structurale de la digue du Bouchet T02



Figure 29 : Photos de la digue du Bouchet T02, partie amont de la vanne Décret



Figure 30 : Photo de la digue du Bouchet T02, partie aval de la vanne Décret

#### 5.1.2.4 DIGUE DU BOUCHET T01

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

##### Digue mur

- Dates de construction : 1834-1836 / 1874
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : pont ZI
- Limite aval : viaduc SNCF
- Le linéaire total est de 1183m pour une hauteur maximum de 3,80m et un fruit du talus 3H/2V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 2,00m.

- Présence d'un chemin de circulation en crête d'environ 2-3m de large qui diminue en amont (1m) dès l'apparition du perré. La circulation de petits à moyens engins semble possible sur la première partie.
- Végétation assez dense sur la pente côté rivière avec des parties végétalisées en crête.
- Enrochements ou perré éparses, souvent caché par la présence de végétation.

La structure de la dernière digue est représentée par deux profils types selon la partie de l'ouvrage concernée (Figure 31) :

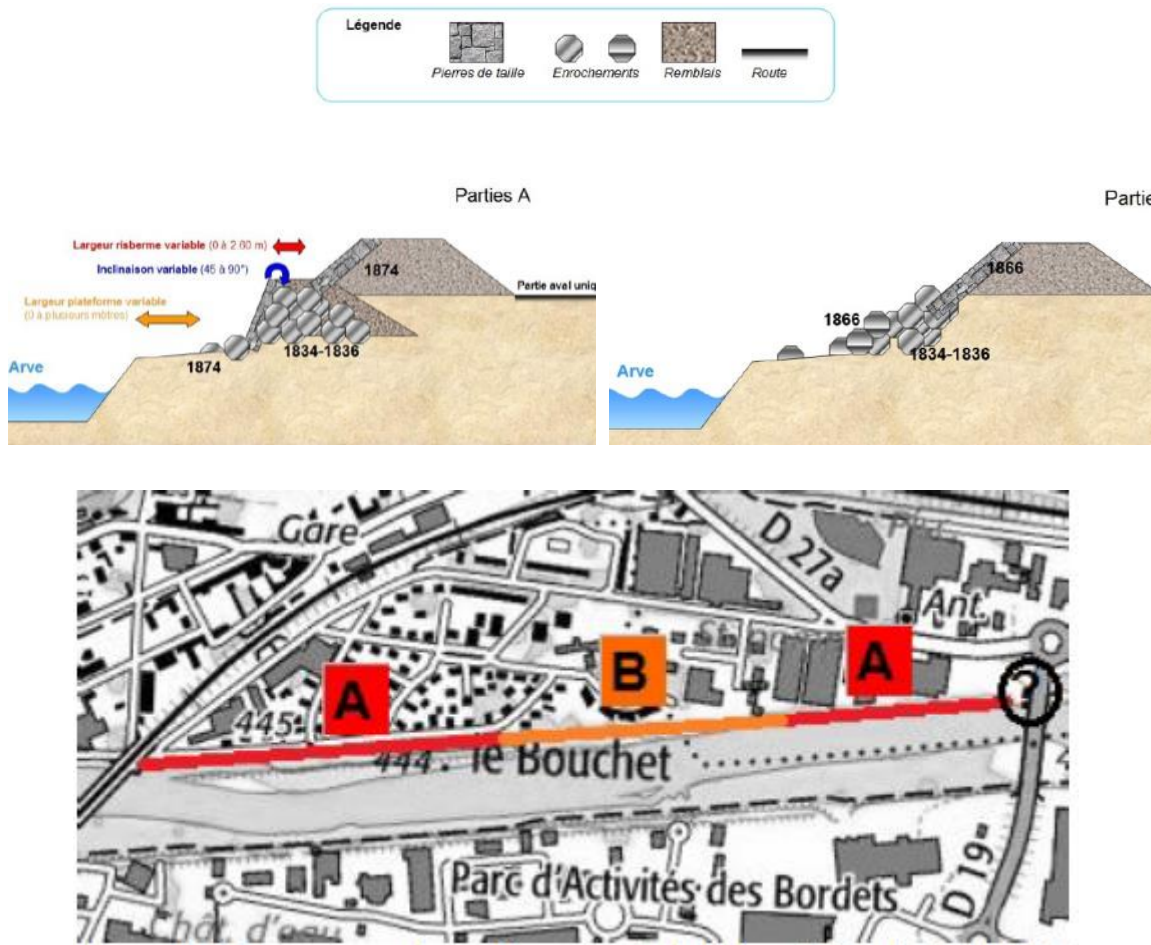


Figure 31 : Découpage structural de la digue du BOUCHET T01

**Parties A** (500 mètres aval et 200 mètres amont). Les ouvrages sont constitués d'un talus perreyé qui se positionne soit au-dessus, soit en continuité des ouvrages existants en pierres de forme trapézoïdale. Des enrochements rechargent la base des digues. Dans les années 1990 d'énormes crues favorisent le creusement du lit de l'Arve. Les enrochements de protection ont suivi cet enfoncement fragilisant d'autant plus les ouvrages désormais perchés. Destabilisés, les perrés sont parfois cisailés dans leurs parties médianes laissant apparaître un front vertical de 1 m à 1.5 m.

**Aujourd'hui**, le parement ancien est soit incliné, soit vertical. La risberme peut être marquée ou inexistante. Mais en général, plus on remonte vers l'amont, plus la digue se rétrécit et devient haute. La base du talus perreyé étant séparée du lit par une marche apparue du fait de l'enfoncement de ce dernier

**Partie B** : idem Partie A mais réparation sur 400 mètres en 1866. Les digues sont établies au-dessus des anciens ouvrages en pierres. Les nouvelles digues sont fixées

au-dessus du terrain naturel avec un talus perreyé côté rivière. Quand le corps de l'ancienne digue est en bon état, on procède à une simple réparation du perré.



Figure 32 : Bouchet T01 - Profil de digue



Figure 33 : Bouchet T01 - Phénomène de sous-cavage

L'ouvrage est largement perché par rapport au lit de l'Arve, du fait de l'enfoncement du lit (incision et érosion longitudinale).

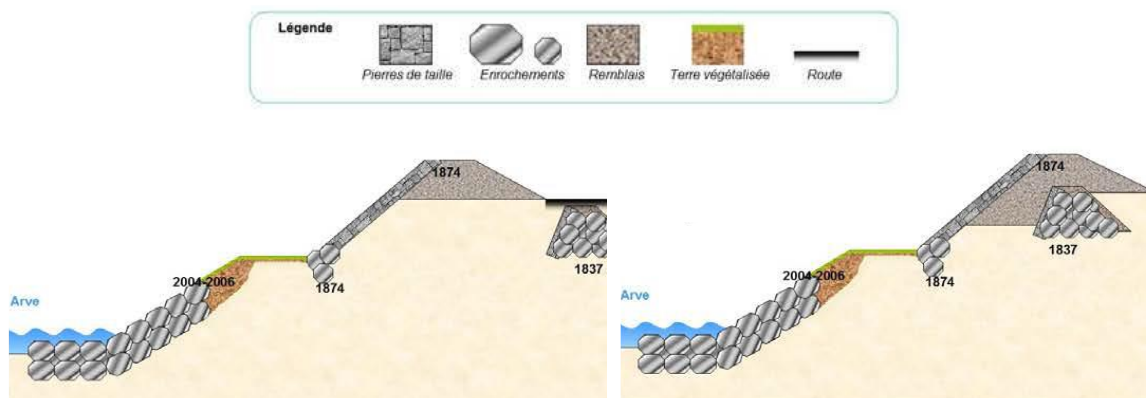
Il résulte l'apparition de mini-cavités dont la présence est dommageable à la stabilité de l'ouvrage (Figure 33).

#### 5.1.2.5 DIGUE CENTRE T02 – JEAN-BAPTISTE REY

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

##### Digue mur

- Dates de construction : 1837 / 1874 / 2004-2006
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : Viaduc SNCF
- Limite aval : Boulevard Allobroges
- Le linéaire total est de 260 m pour une hauteur maximum de 1m et un fruit du talus 2H/1V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 0,8m.
- Présence d'un petit chemin de circulation en crête permettant le déplacement de petits engins.
- Talus végétalisé, mais maîtrisé, permettant une bonne visibilité. Présence d'arbres et d'arbustes en bord de lit.
- Enrochements en pied ainsi que présence d'un perré
- 1837 : construction d'une digue en pierre (enrochements et mur) en continuité de celle du Bouchet - T01 ;
- 1874 : nouvelle digue en talus perreyé construite au-dessus des anciennes ou en avancée à l'intérieur du lit ;
- 2004-2006 : renforcement avec risberme et enrochements sur tout le linéaire à la suite de nombreux affouillements.



Alternance des deux profils ci-dessus sur l'ensemble du linéaire

**Figure 34 : Découpage structural de la digue Jean-Baptiste REY**

**Aujourd'hui**, selon que le premier ouvrage a été ou non recouvert par la digue de 1874, les modules sont soit empilés, soit en décalage les uns par rapport aux autres (Figure 34). L'ouvrage de 1837 est enfoui dans tous les cas. Les ouvrages récents viennent conforter le tout. Les deux types de profils alternent sur le linéaire.

- A noter la présence d'une ouverture confortée récemment juste en aval du pont SNCF. L'origine de l'ouverture n'est pas connue.



**Figure 35 : Digue JB REY – Profil de digue**



**Figure 36 : Digue JB REY - Confortement grossier de la digue**

### 5.1.2.6 DIGUE CENTRE T01 – POSTE

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

#### Digue mur

- Dates de construction : 1837 / 1874 / 2004-2006
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : Boulevard des Allobroges
- Limite aval : Pont de Bonneville
- Le linéaire total est de 126 m pour une hauteur maximum de 1m et un fruit du talus 2H/1V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1m.

- Présence d'un perré en partie supérieure de l'ouvrage, celui-ci peut être par endroit recouvert de sédiments à la suite de l'engravement engendré par l'alternance des niveaux d'eau.
- Pas de végétation gênante à signaler sur ce sous tronçon
- 1837 : construction d'une digue en pierres sèches ou en enrochements avec parement de la berge idem digue initiale des Bouchets ;
- 1874 : nouvelle digue en talus doublement perreyé établie sur la précédente ;
- 2004-2006 : renforcement avec un glacis végétalisé jouant le rôle de risberme et des enrochements venant stabiliser le tout. Mesures prises à cause d'extractions massives, dès les années 1970, qui ont créé d'importants affouillements.

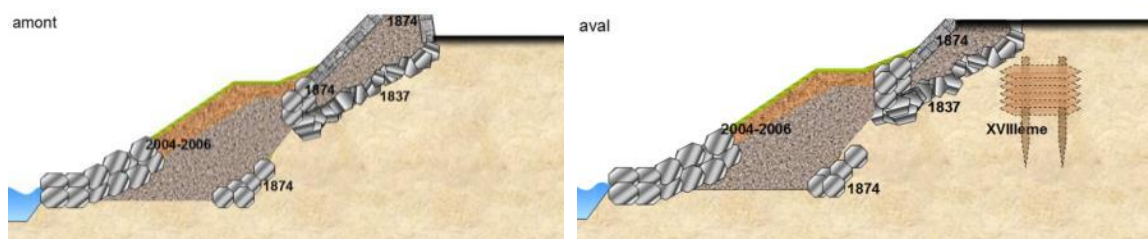


Figure 37 : Découpage structural de la digue POSTE

Aujourd'hui, en amont la tête de digue est bien apparente alors qu'en aval du sous-système le couronnement n'est plus visible. Le passage entre les deux états se fait progressivement. Avec l'abaissement du lit au cours du XXe siècle, tout ou partie des enrochements de 1874 ont pu s'affaisser ou avoir été emportés.

- A noter la présence d'une ancienne vanne, toujours fonctionnelle sur la partie amont à la frontière avec la digue quai Jean Baptiste Rey :



Vanne de régulation du ruisseau de la Madeleine



Exutoire du ruisseau de la Madeleine – Arve RD

Figure 38 : Digue POSTE - Système de vannage de la Madeleine

Globalement la structure visuelle est identique à celle de la digue quai JEAN-BAPTISTE REY.

**Etant données les caractéristiques géométriques de l'ouvrage et l'état général des parements, aucune mise à jour n'est envisagée sur ce tronçon.**

### 5.1.2.7 DIGUE DU TRÉSOR PUBLIC – T02

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

- Dates de construction : 1823-1826 / 1855 / 1866
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : Passerelle
- Limite aval : Pont prison
- Digue rectiligne érigée en pierre maçonnée (1823-1826) avec enrochements en pied et talus aval en terre. Cette digue sera ensuite rehaussée par l'ajout de remblais et perrayée en talus amont à la suite du programme de renforcement des digues (1855-1866). Elle a toujours cette forme aujourd'hui (Figure 40).
- Le linéaire total est de 173 m pour une hauteur maximum de 3m et un fruit du talus 1H/3V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1,5m.
- Présence d'enrochements éparpillés en pied ainsi que d'un glacis perré.
- Présence d'un petit chemin de circulation 7m-8m de large en crête, pouvant servir à la circulation piétonne ou cycliste mais aussi au passage d'engins de petite et moyenne taille.
- Végétation présente sur le talus amont avec la présence de gros arbres assez anciens.



Figure 39 : Trésor Public T02 - Profil de digue

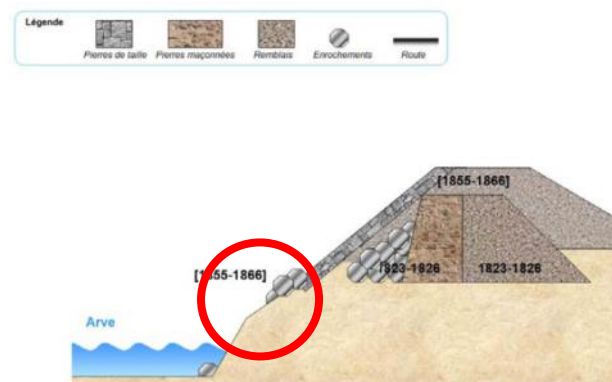


Figure 40 : Trésor Public T02 - Schéma structurel

**Aujourd'hui**, l'incision de l'Arve a abouti à une très forte érosion du pied de talus amont. Cela a pour effet de changer la géométrie des ouvrages en raidissant fortement le fruit du talus côté rivière. Les enrochements présents pour protéger l'ouvrage contre l'érosion chutent petit à petit dans le cours d'eau. La végétation venant ici jouer le rôle de soutien à la structure en limitant l'érosion externe et le glissement de l'ouvrage. Le secteur du Trésor Public en général est la zone la plus impactée par ce phénomène d'incision couplée à l'érosion externe.

### 5.1.2.8 DIGUE DU TRÉSOR PUBLIC – T01

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

#### Digue mur sub-verticale

- Dates de construction : 1823-1826
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : Pont de la Prison
- Limite aval : angle de la rue du Quai d'Arve
- Même structure initiale que le tronçon Trésor public T02, une digue rectiligne en pierres maçonnées (gros moellons), adossée sur un talus aval en terre avec quelques enrochements en pied datant de la période sarde (1823-1826). L'abaissement du lit a largement découvert le pied des ouvrages qui se retrouvent perchés subissant une perte d'une partie des anciens enrochements. **C'est la zone la plus critique du système d'endiguement ARVE-RD-BONNE-25.79 « Bonneville Ayze ».** (Figure 41, Figure 42 et Figure 43)
- Le linéaire total est de 498 m pour une hauteur maximum de 3m et un fruit du talus 1H/3V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1,5m.
- Présence d'un petit chemin de circulation 7m-8m de large en crête, pouvant servir à la circulation piétonne ou cycliste mais aussi au passage d'engins de petite et moyenne taille.
- Végétation présente sur le talus amont avec la présence d'arbuste et de jeunes arbres. Notons aussi la présence de buissons en crête et de plus vieux arbres en bord de lit.

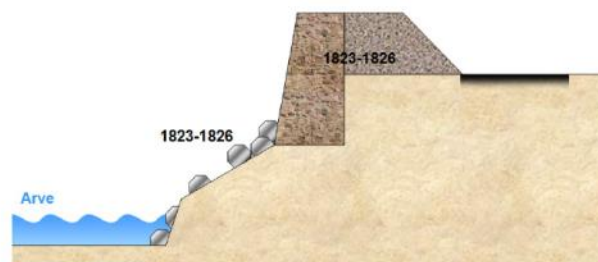
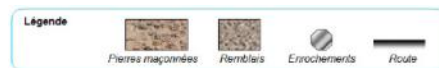


Figure 41 : Trésor Public T01 - Schéma structurel



Figure 42 : Trésor Public T01 - Talus érodé sub-vertical



Figure 43 : Trésor Public T01 - Arborescence déstructurant le mur en place

#### 5.1.2.9 DIGUE DE LA LISIERE DU CLOS

L'étude historique ainsi que les recoupements faits avec les observations de terrain font état des caractéristiques suivantes :

- Dates de construction : 1825-1827 / 1847 / 1863 / 1874 / 1931
- Cours d'eau : Arve rive droite
- Limite amont : Angle de la rue Quai d'Arve
- Limite aval : 316m en aval
- Le linéaire total est de 316 m pour une hauteur maximum de 1,80m et un fruit du talus 3H/4V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 1,00m.
- Présence d'un chemin piéton en crête, peut également servir à la circulation de petits et moyens engins.
- Végétation dense sur le talus aval, composée d'arbres et d'arbustes avec parfois une haie en crête. Le talus amont mis à jour récemment est parfaitement visible (Figure 44).

La digue est constituée d'enrochements, surmontés d'un petit merlon en matériaux terreux et d'un cheminement piéton. Ce nouvel ouvrage se décline en deux modules différents :

- Sur les 85 mètres amont : enrochements liaisonnés, de pente 2/3 ;
- Sur les 135 mètres aval : enrochements libres, de pente 2/5.

Dans les deux cas, l'enrochement recouvre une bâche géotextile anti-contaminant, et le pied de celui-ci est supporté par un sabot réalisé en enrochements non liaisonnés.

Trois profils type sont présents d'amont en aval :

- Partie A1 sur 85m
- Partie A2 sur 135m
- Partie B sur les 96m restants

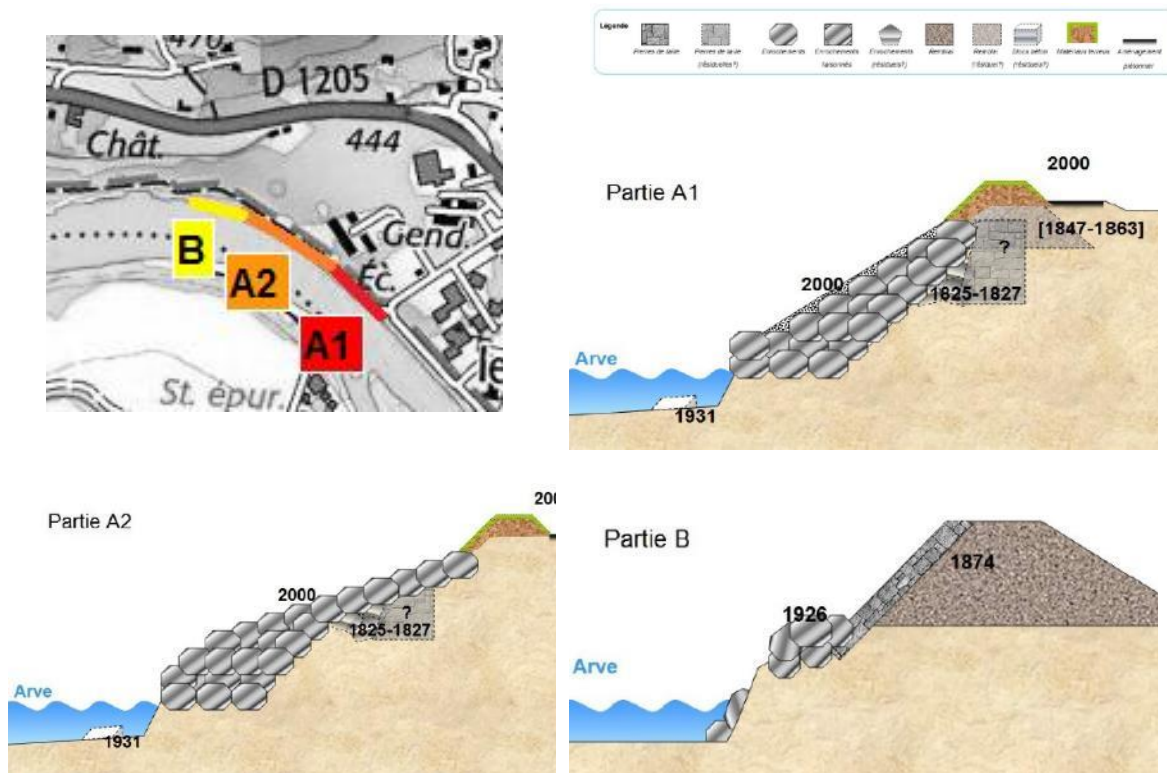


Figure 44 : Découpage structural de la digue de la Lisière du Clos

Aujourd'hui, la partie amont de la digue de la Lisière du Clos est composée de deux modules d'enrochements dont seules les pentes diffèrent (Figure 44 parties A1 et A2). Il est probable que les grandes quantités d'enrochements utilisées lors de sa construction au XIXe siècle, et lors des réparations successives, ne persistent que sous forme de résidus au fond du lit. La nouvelle digue construite en 2000 a effacé une grande partie des constructions anciennes. L'érosion du lit ayant continué depuis, le sabot de ce nouvel ouvrage, auparavant enterré, est désormais visible, au fil de l'eau. Le profil aval est composé d'un simple talus en remblais perreyé.



Figure 45 : Digue Lisière du Clos - Profil de digue

### 5.1.2.10 Conclusion sur la géométrie externe des ouvrages existants

Les Tableau 7 et Tableau 8 suivants présentent les principales caractéristiques géométriques de chaque portion de système et la composition générale des protections.

DIGUE	PK amont	PK aval	Hauteur moyenne aval (m)	Charge	LARGEUR MOYENNE EN CRETE (m)	Risberme
RD19	30.3	29.10	2.00	Q10	15 à 20 m 1 m Merlon en amont de la zone	Non (bancs Végétalisés)
LE BOUCHET -T02	29.10	28.90	2.00	Q10	2 à 3 m (1m à l'amont)	Bancs mobilisables de 3 à 20m
LE BOUCHET -T01	28.88	27.70	2.00	Q10	2 à 3 m (1m à l'amont)	Bancs mobilisables de 3 à 20m
CENTRE - T02 JEAN BAPTISTE REY	27.70	27.40	0.80	Entre Q10 et Q100	1 à 2 m	2m
CENTRE - T01 POSTE	27.40	27.28	1.00	Q100	1m	3m
TRESOR PUBLIC-T02	26.74	26.57	1.50	Q10	6 à 9 m	Non
TRESOR PUBLIC-T01 LES REVEES	26.57	26.08	1.50	Entre Q10 et Q100	Amont :5 à 7 m Aval : 1.5 à 2 m	Non
LISIERE DU CLOS	26.08	25.78	1.00	Q200	1 à 3m	4.00

**Tableau 7 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants**

IDENTIFIANT_SIRS	DIGUE	Hauteur moyenne amont	Pente AM	Pente AV	Revetement AM	Revetement AV
ARVE-RD-AYZE-28.89	RD19	7.00	3/2 à 1/1	3/2 à 1/1	Enrochements	Terre
ARVE-RD-BONNE-28.89	LE BOUCHET -T02	6.00	1.5/1 à 2/1	1/1 à 1.5/1	Terre en partie supérieure Vestige de Perré en partie inférieure Enrochements vers ZI	Terre
ARVE-RD-BONNE-27.68	LE BOUCHET -T01	6.00	1.5/1 à 2/1	1/1 à 1.5/1	Terre en partie supérieure Perré en pied	Terre
ARVE-RD-BONNE-27.41	CENTRE - T02 JEAN BAPTISTE REY	7.00	3/2 à 1/1	3/1 à quelques%	Enrochements en pied +Perré	Terre
ARVE-RD-BONNE-27.23	CENTRE - T01 POSTE	6.00	1/1 au niveau des perrés	subvertical	Perré	Mur
ARVE-RD-BONNE-26.59	TRESOR PUBLIC-T02	8.00	1/1 à 1/2 voure subverticale	3/1 à quelques%	Enrochements en pied	Terre
ARVE-RD-BONNE-26.09	TRESOR PUBLIC-T01 LES REVEES	6.00	1.5/1 à 2/1	1/1 à 1.5/1	Terre en partie supérieure Perré en pied	Terre
ARVE-RD-BONNE-25.79	LISIERE DU CLOS	6.00	3/2 à 1/1	2/1 à 3/1	Amont :Enrochement en pied Aval : Dalles béton	Terre

**Tableau 8 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants (bis)**

### 5.1.2.11 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.

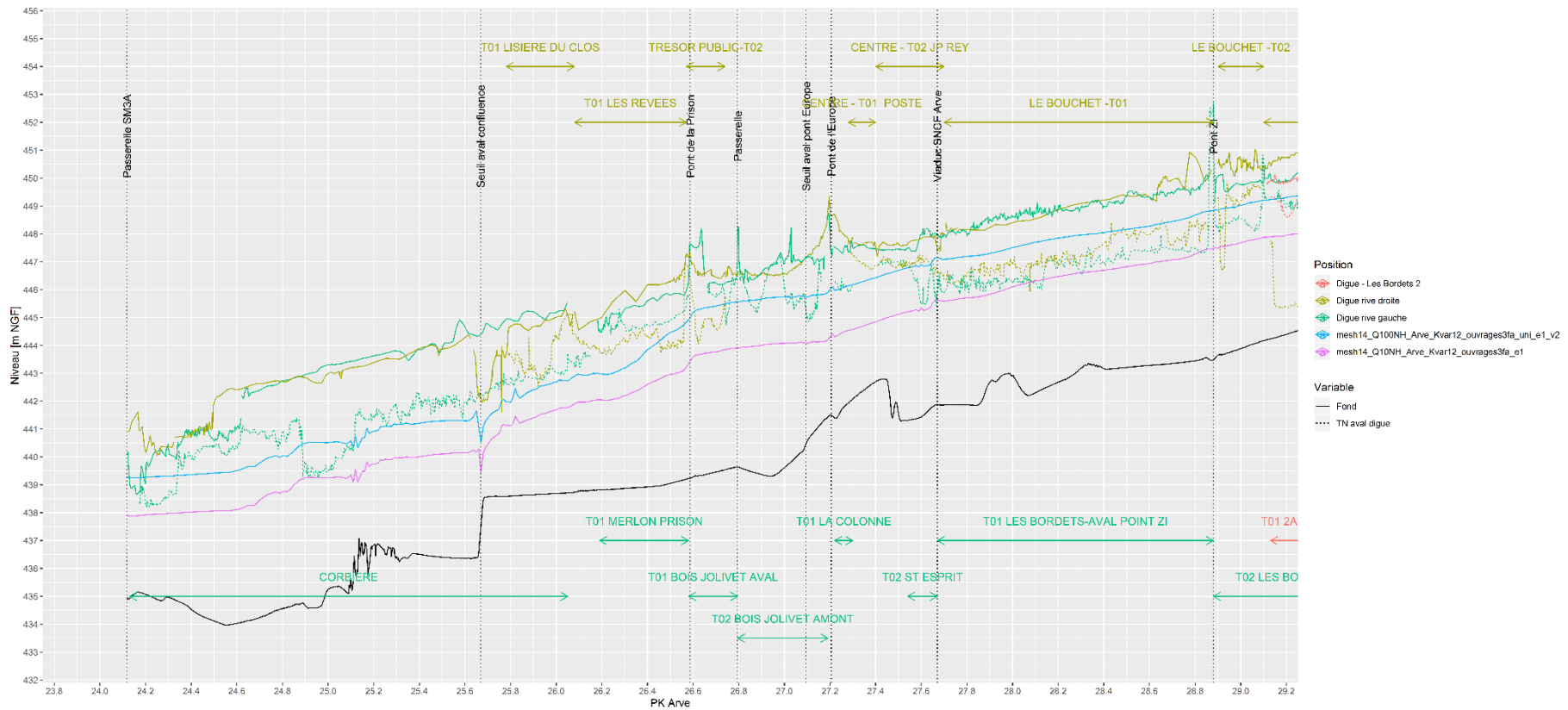


Figure 46 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel

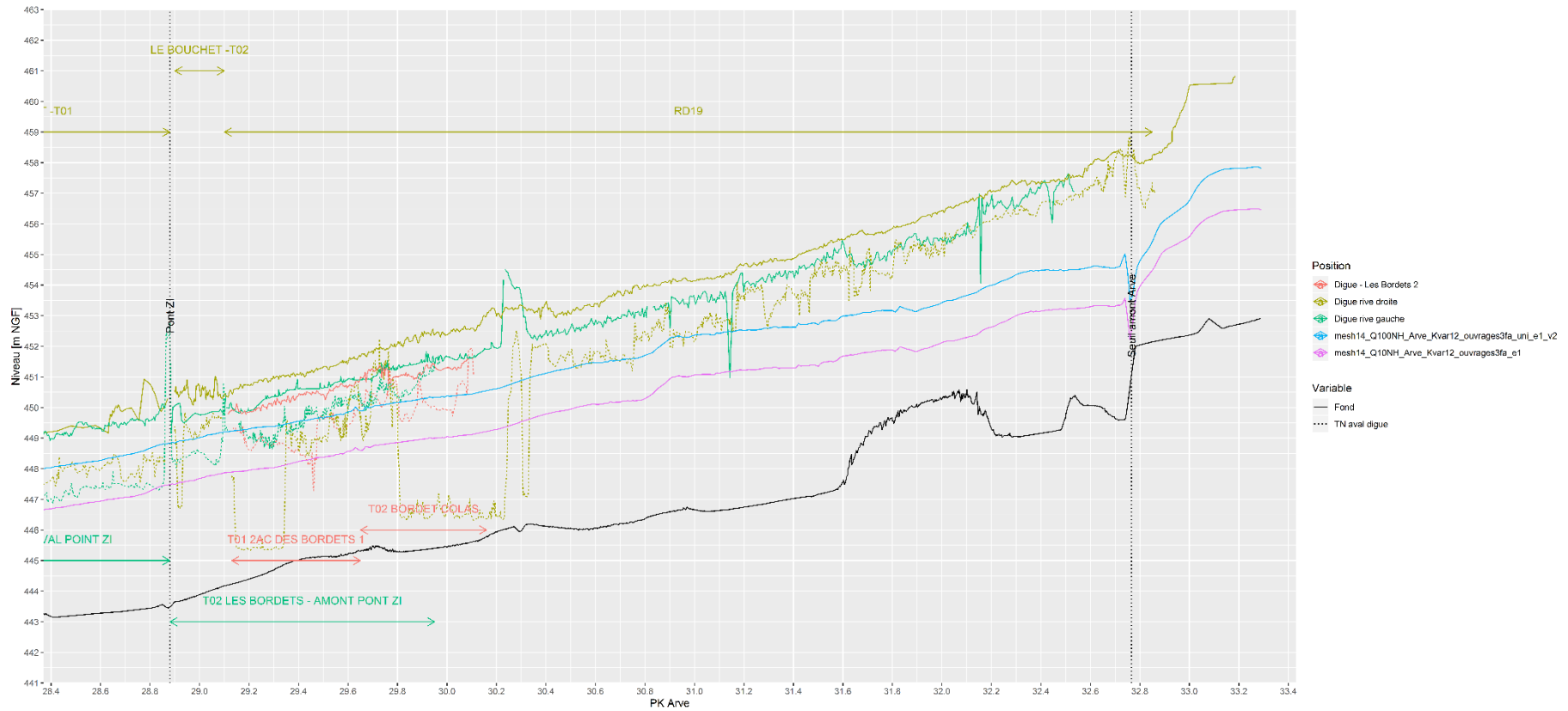


Figure 48 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel

### 5.1.3 Autres ouvrages

#### 5.1.3.1 Ponts

Sur l'Arve, 6 ouvrages type pont sont recensés. Le tableau ci-après, présente les hauteurs d'air libres sous ces ouvrages pour les crues Q100 et Q200.

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100 870m <sup>3</sup> /s Arve 180m <sup>3</sup> /s Borne	Q200 972m <sup>3</sup> /s Arve 195m <sup>3</sup> /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 9 : Ponts présents sur la zone d'étude – Arve

Suivant ce tableau, la hauteur d'eau minimale d'air libre pour la Q200 est :

- 1.44 m sous le pont de la Prison pour l'Arve ;

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 10). 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 10 : Liste des seuils dans le lit de l'Arve et du Borne sur la zone d'étude



Figure 49 : 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 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 11 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 <sup>2</sup> ) Longueur : 40m	447.73	447.73
2	Buse sous RD19	Arve	29.170	Section rectangulaire (1.1x0.55m = 0.6 m <sup>2</sup> ) Longueur : 40m	447.70	447.70
3	Buse sous RD19	Arve	31.700	Diamètre 1m (Section = 0.79 m <sup>2</sup> ) Longueur : 40m	453.74	453.14
4	Bois Jolivet (RG : Arve)	Arve	27.150	Diamètre : 2.20m (Section = 3.80 m <sup>2</sup> )	444.22	440.46
5	Quai Jean-Baptiste Rey (RD : Ruisseau de la Madeleine)	Arve	27.380	Diamètre : 1m (Section = 0.79 m <sup>2</sup> )	444.88	444.19
6	Vanne à l'aval du Seuil Métral (RG)	Borne	4.150	Section arquée = 4.96m <sup>2</sup> - Régulé sur 2,24m <sup>2</sup> actuellement	480.71	480.71

Tableau 11 : Caractéristiques des buses

### 5.1.3.4 Conduites et réseaux traversants

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.

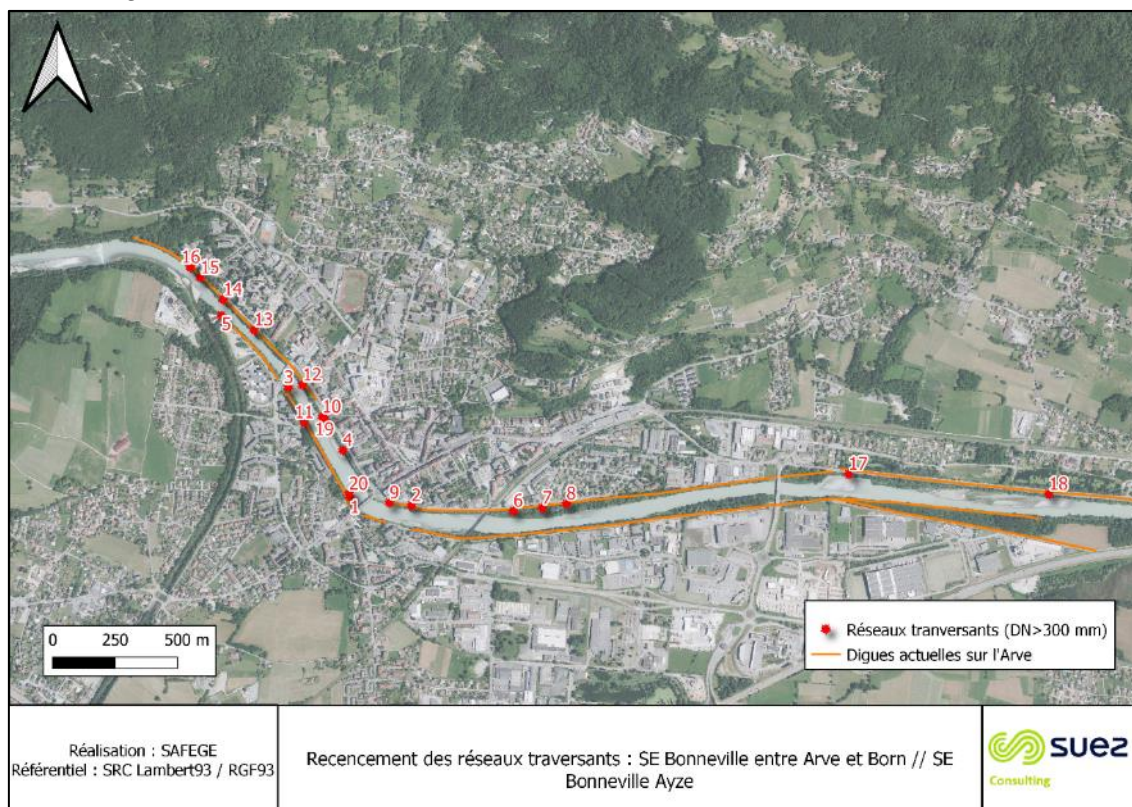


Figure 50 : Réseaux traversants sur les digues de l'Arve

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

On retrouve ci-dessous une liste des principaux réseaux dans lesquels l'Arve peut potentiellement remonter et inonder la zone protégée par le système d'endiguement. Ces réseaux sont équipés actuellement de vannes manuelles et ont fait l'objet d'une modélisation de défaillance fonctionnelle dans la suite de l'EDD.

Tableau 12 : Gros réseaux en rive droite de l'Arve

N°	Ouvrages	Rivière	PK	Caractéristiques	Zamont [m NGF]	Zaval [m NGF]
18	Buse sous RD19 Castorduc	Arve	29.97	Section rectangulaire (1.1x0.55m=0.6m <sup>2</sup> ) Longueur : 40m	447.73	447.73
17	Buse sous RD19 Castorduc	Arve	29.17	Section rectangulaire (1.1x0.55m = 0.6 m <sup>2</sup> ) Longueur : 40m	447.70	447.70
2	Ruisseau de la Madeleine	Arve	27.38	Diamètre : 1m (Section = 0.79 m <sup>2</sup> )	444.88	444.19

Il est à noter que les réseaux traversants seront équipés dans la mesure du possible de clapets anti-retour. Pour rappel, les réseaux déjà équipés sont les réseaux 2, 17 et 18.

**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 dévié de l'emprise projet avant les travaux de confortement.**

### 5.1.1 Description des sources d'agression

#### 5.1.1.1 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.

#### 5.1.1.2 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

### 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

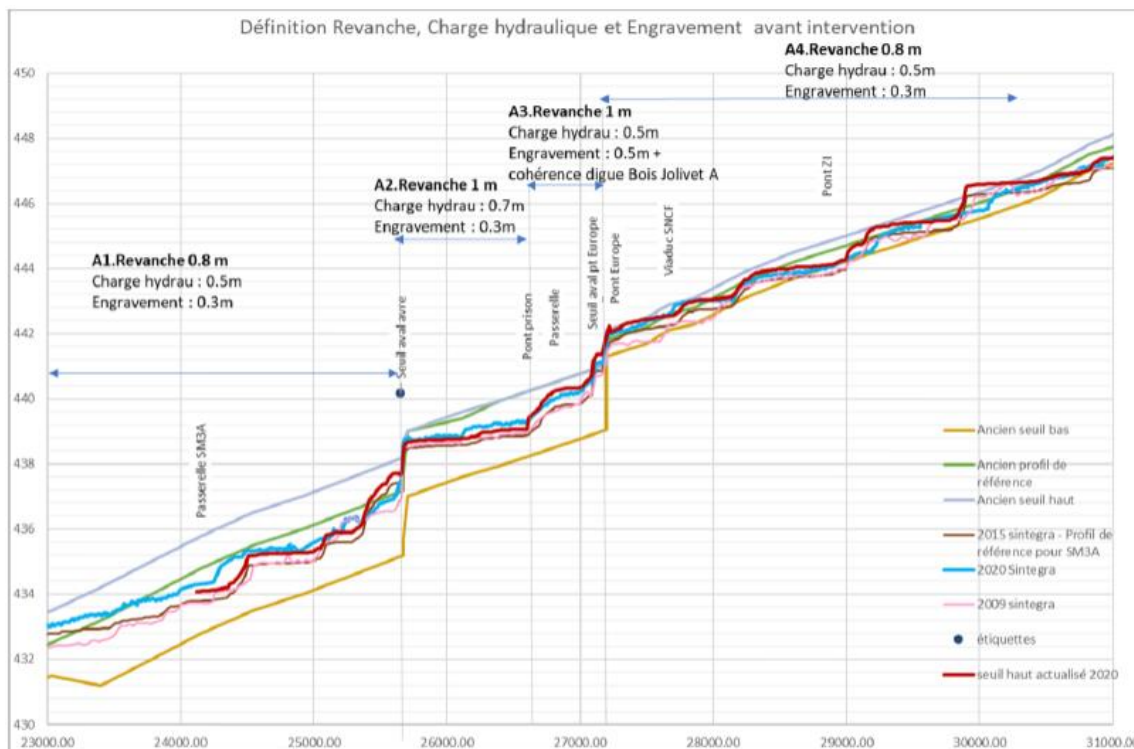


Figure 51 – profil en long - définition des crêtes de digue

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  $Q_{10}$ ) : enrochements 60/300 kg, épaisseur 1,30m,
  - Partie supérieure ( $Q_{10}$  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  $Q_{10}$  (sauf Trésor public T02 et merlon Prison, jusqu'en sommet de talus),
- Matelas Reno ou géogrilles tridimensionnelles au-dessus du niveau de  $Q_{10}$  (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 :

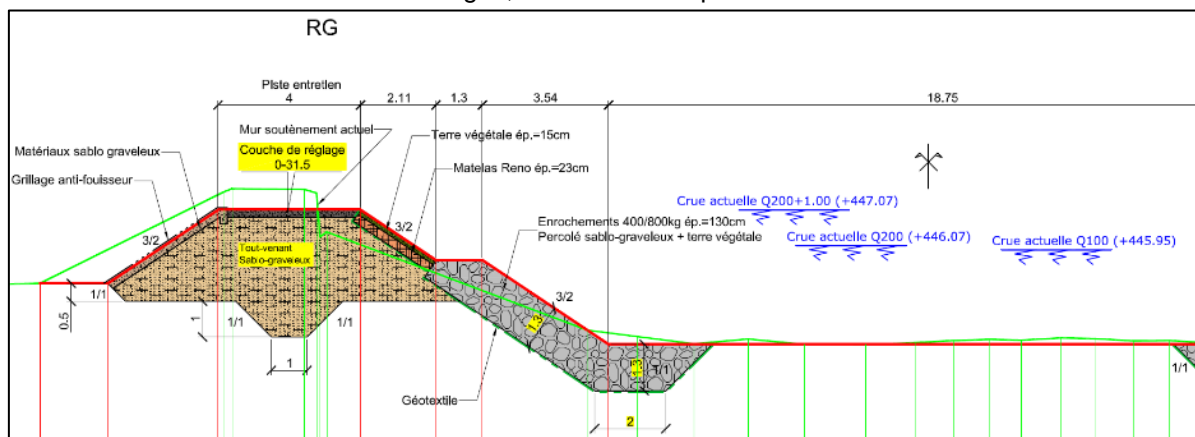


Figure 52 : Profil type de l'AVP structurel de 2018.

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

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 structurelle des ouvrages (géométrie, constitution, etc.) proposée au stade AVP.

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 structurelle des ouvrages (géométrie, constitution, etc.) proposée au stade AVP.

**Il est à noter que les tronçons suivants ne font pas l'objet de travaux de confortement (hors mission de maîtrise d'œuvre de confortement des digues de l'Arve lancé par le SM3A). Ces secteurs sont considérés en bon état avec un niveau de sûreté centennal (voir recommandations du document B) :**

- RD19
- Le Bouchet T02
- Centre – T01 POSTE
- Centre - T02 JP REY
- La Lisière du Clos (en aval du PK 26.06)

### 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 de l'Arve :

**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 m<sup>3</sup>/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. Les tronçons homogènes sur les digues de l'Arve rive droite sont donnés dans le tableau ci-après.

**Tableau 13 : 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
<b>Rive droite</b>					
RD19	RD19	30.30	29.10	1200	Sans travaux
T02 – Digue du Bouchet	Bouchet T02	29.10	28.90	300	Sans travaux
T01 – Digue du Bouchet	RD-T1	28.870	28.770	100	Reprise intégrale de la digue
	RD-T2	28.770	28.490	280	Reprise intégrale de la digue (mur béton)
	RD-T3	28.490	28.340	150	Reprise intégrale de la digue
	RD-T4	28.340	27.775	565	Confortement interne (palplanches)
	RD-T5	27.775	27.710	65	Reprise intégrale de la digue
Centre T02 JB Rey	Centre T02 JB Rey	27.70	27.40	260	Sans travaux
Centre T01 Poste	Centre T01 Poste	27.40	27.28	126	Sans travaux
T02 – Digue du Trésor public	RD-T6	26.750	26.580	170	Confortement par l'aval (mur béton)
T01 – Digue des Révées	RD-T7	26.580	26.440	140	Reprise intégrale de la digue
	RD-T8	26.440	26.125	315	Reprise intégrale de la digue (mur béton)
La Lisière du Clos	Lisière du Clos	26.125	26.060	25.79	Sans travaux

La localisation des tronçons homogènes faisant l'objet de travaux est donnée dans la figure suivante :

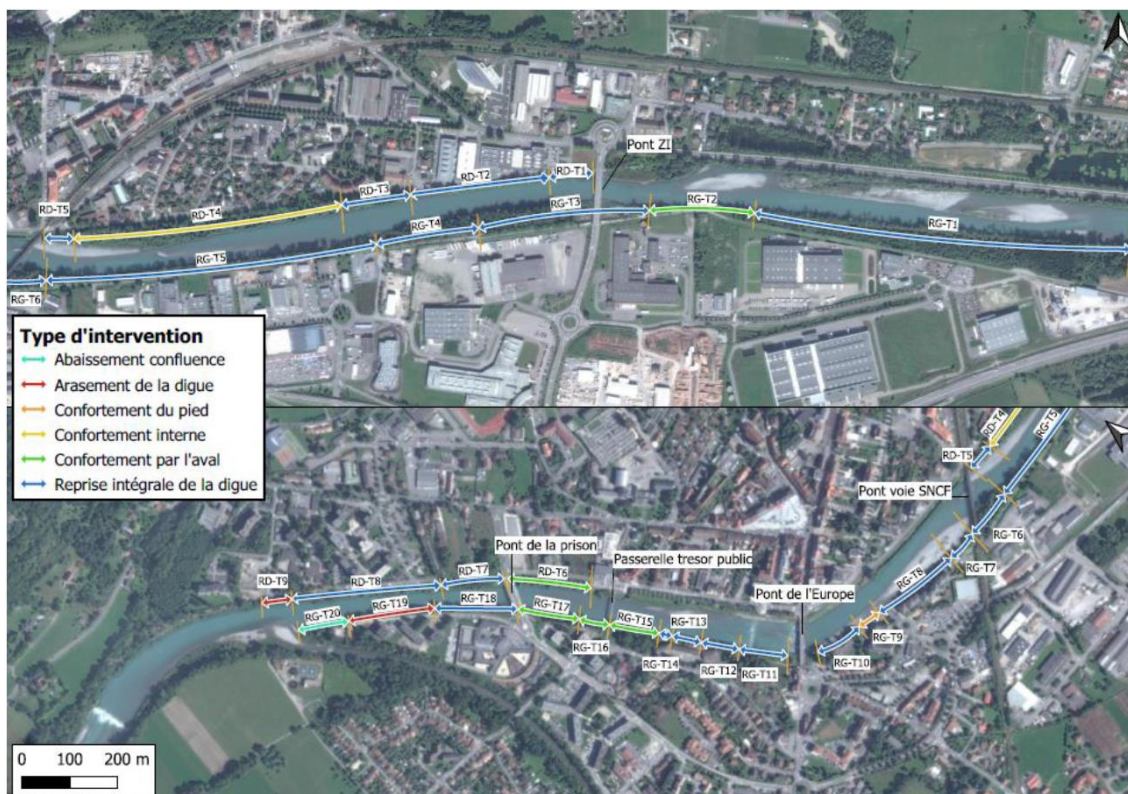


Figure 53 : Vues en plan de la sectorisation des digues en tronçons homogènes (RG et RD de l'Arve)

#### 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 droite – RD-T1 à RD T3, et RD-T5 (T01 – Digue du Bouchet)

Linéaire d'application : 595 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce secteur est situé au droit du quartier du Bouchet. Il s'agit ici d'une reprise intégrale de l'ouvrage. Par rapport à l'AVP structural de 2018, le profil type est optimisé sur le plan environnemental, par l'emploi sur le talus amont d'une technique mixte pour assurer la protection vis-à-vis de l'érosion externe. Ceci permet 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 (pas de plantations ligneuses au-dessus du TN).
- Talus aval :
  - Pentes de talus (le cas échéant) : 2.0H/1V,
- 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.

Une piste d'exploitation est réalisée en crête de l'ouvrage (cf. § 5.2.2.5) à l'exception du tronçon RD-T5 où elle n'est pas nécessaire (voirie existante en pied, absence de débouché vers l'aval, la digue s'interrompant sur le pont de la voie ferrée).

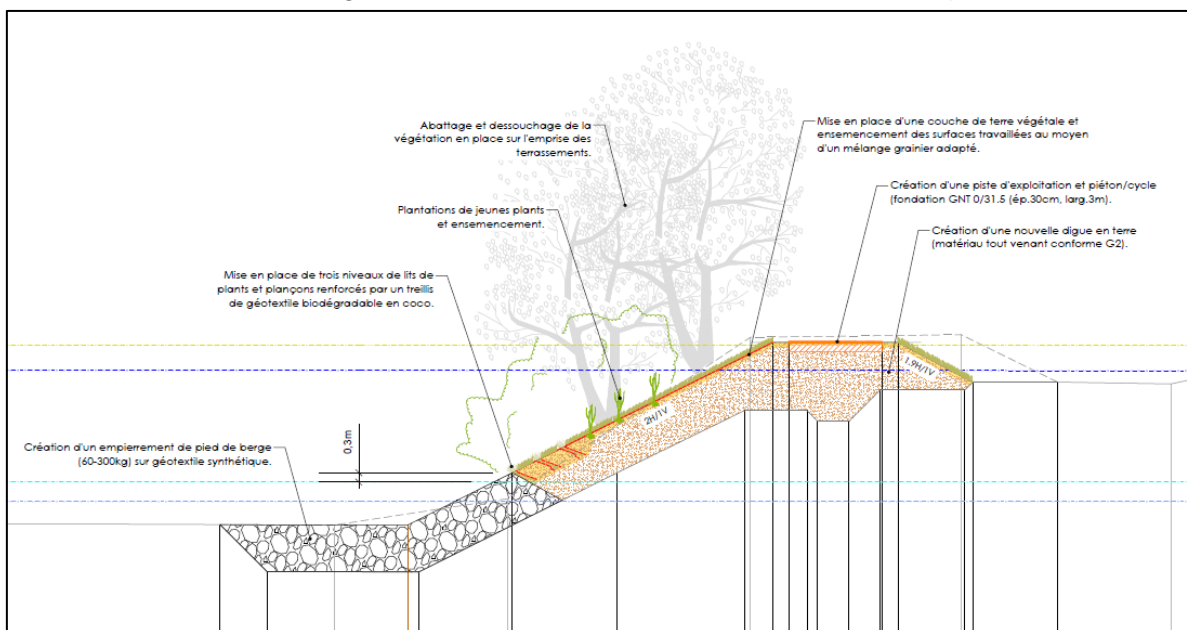


Figure 54 : Profil type RD-T1

Au droit du tronçon RD-T2, compte-tenu de l'emprise disponible plus réduite au droit de la zone industrielle, l'endiguement est reconstruit sous la forme d'un mur digue côté val :

- Mur préfabriqué de type T renversé,
- Hauteur totale : 1.3 à 2.5 m,
- Largeur de la semelle : 1.5 m,
- Semelle positionnée hors gel, reposant sur un béton de propreté.

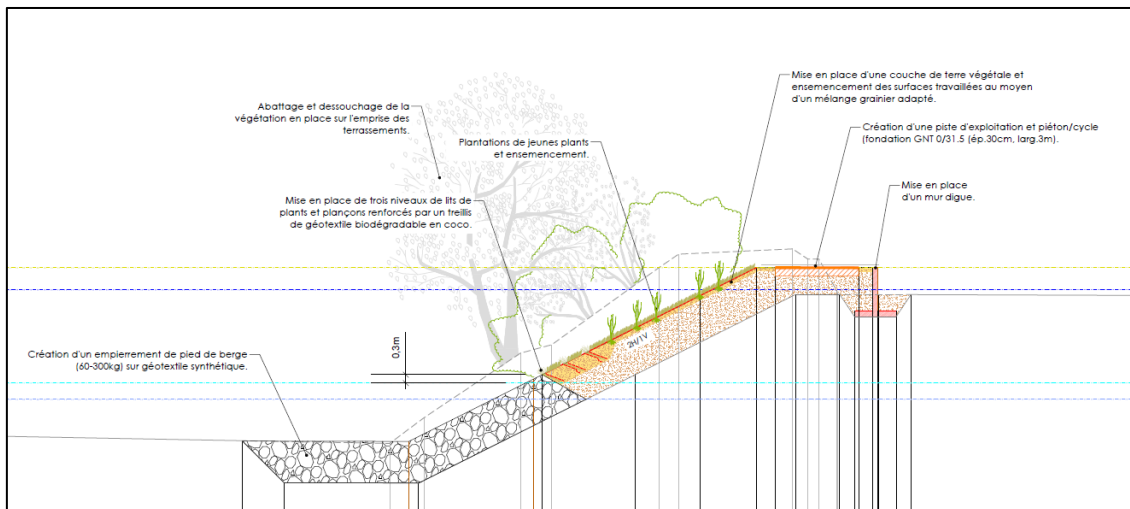


Figure 55 : Profil type RD-T2

Concernant le tronçon RD-T3, situé dans la partie amont du banc alluvial du Bouchet (largeur du banc inférieure à 20 m et nécessitant une protection contre l'érosion externe), le banc alluvial sera reconstitué en remblais par-dessus la bèche et le talus enroché, et végétalisé avec des espèces typiques des milieux alluviaux de l'Arve sous la forme d'un ensemencement adapté des surfaces travaillées, voire avec un complément de boutures et pieux de salicacées.

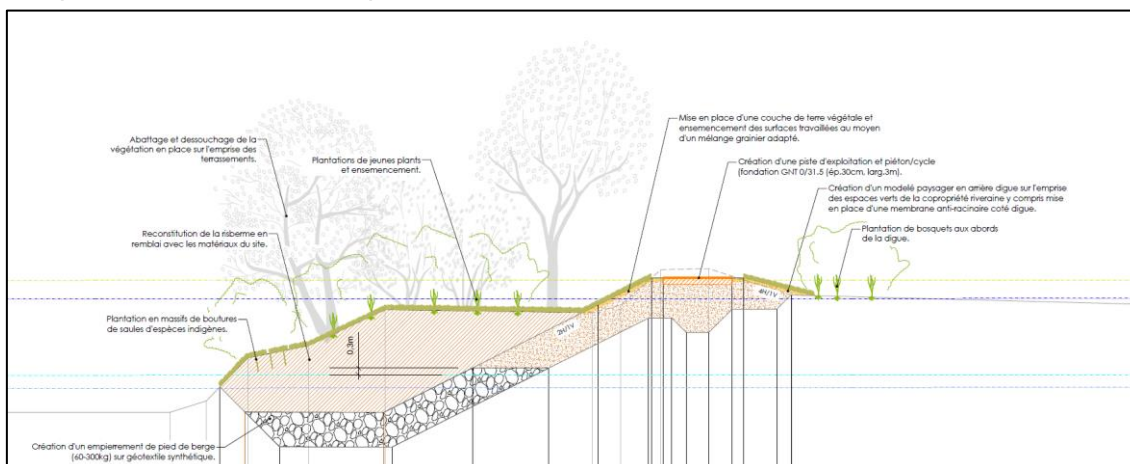


Figure 56 : Profil type RD-T2

### Réflexion paysage :

Sur ce tronçon amont, il n'existe pas de chemin, la restauration de la digue permettra de créer de nouvelle continuité entre le secteur du Bordet et l'Arve amont vers Ayze.

Les vues sur l'Arve seront vite refermées après les travaux, par les techniques végétales qui garantissent la solidité de la protection. Le chemin n'offrira donc pas de vues sur l'Arve, mais sera ombragé sous un couvert végétal dense. Le talus côté val sera raide et surplombera des accès et stationnements appartenant aux entreprises construites à proximité de la digue.

Un remblai/modelé en pente douce s'appuiera sur le talus aval de l'ouvrage. Afin de limiter les vues sur la résidence, depuis le chemin, qui sera probablement plus fréquenté qu'en situation actuelle, un cordon végétal sera implanté sur le remblai,

constitué de bosquets arbustifs ponctuels qui garantiront cette intimité. La mise en œuvre d'un géotextile anti-racinaire et le respect d'une distance de sécurité d'au moins deux mètres entre les plantations arbustives et le corps de digue devront être respectés. Plus loin, dans l'espace privé de la résidence, des arbres de hautes tiges pourront être implantés afin de recréer un sous-bois ombragé, compensant la suppression des arbres sur la digue. Cette proposition devra être concertée avec les résidents et les propriétaires.

#### 5.2.2.4.2 Digue rive droite RD T4 (T01 – Digue du Bouchet)

Linéaire d'application : 565 m,

Type d'intervention : confortement interne (rideau de palplanche).

Un confortement interne de l'ouvrage est préconisé, par la mise en œuvre d'un rideau de palplanche. Cette solution permet, malgré l'étroitesse de la digue actuelle et la raideur des talus, d'atteindre les objectifs de sûreté hydraulique et de stabilité de l'ouvrage, tout en maintenant la végétation sur le banc rive droite de l'Arve et le talus amont sous forme d'ancien perré.

Compte-tenu du caractère fixe du banc alluvial, la stabilité du rideau de palplanche est à vérifier uniquement en cas de glissement du talus amont de la digue actuelle (talus perreyé instable). Au stade AVP, une longueur moyenne de fiche de 13.5 m est considérée en considérant le glissement du talus amont comme effectifs, ce qui réduit la butée de pied à 4 m en dessous de la crête de digue. Ce dimensionnement sera à affiner au stade PRO.

Les palplanches doivent rester stables même si le talus amont de la digue ne présente pas de facteur de stabilité au glissement acceptable de manière à assurer la protection à long terme. Elles doivent aussi permettre une étanchéité via la mise en place de serrures étanches.

Pour mémoire, le banc est végétalisé d'essences ripicoles adaptées et montre une cote relativement basse inondable par les crues de fréquence biennale, raison pour laquelle il n'a pas été proposé d'intervention sur ce banc ni de protection de digue sous la forme d'un enrochement du talus amont de la digue qui aurait entraîné la suppression d'une épaisse largeur de végétation. Le maintien de la végétation existante sur le talus amont de la digue permet de conserver un ombrage et donc une fraîcheur agréable pour la promenade piétonne en crête de digue.

L'altimétrie de la crête de digue actuelle, supérieure ou égale à la cote  $Q_{100} +$  revanche, est conservée. La largeur en crête de la digue restituée est égale à 4 mètres afin de permettre un accès de service au droit des lotissements existants puis égale à 2 mètres sur la partie aval en tant que voie piétonne, la rue du Quai du Bargy en contrebas de la digue pouvant faire office de voie de service.

En partie amont, le talus côté val et les banquettes de part et d'autre du futur cheminement sont ensemencés avec un mélange grainier indigène adapté.

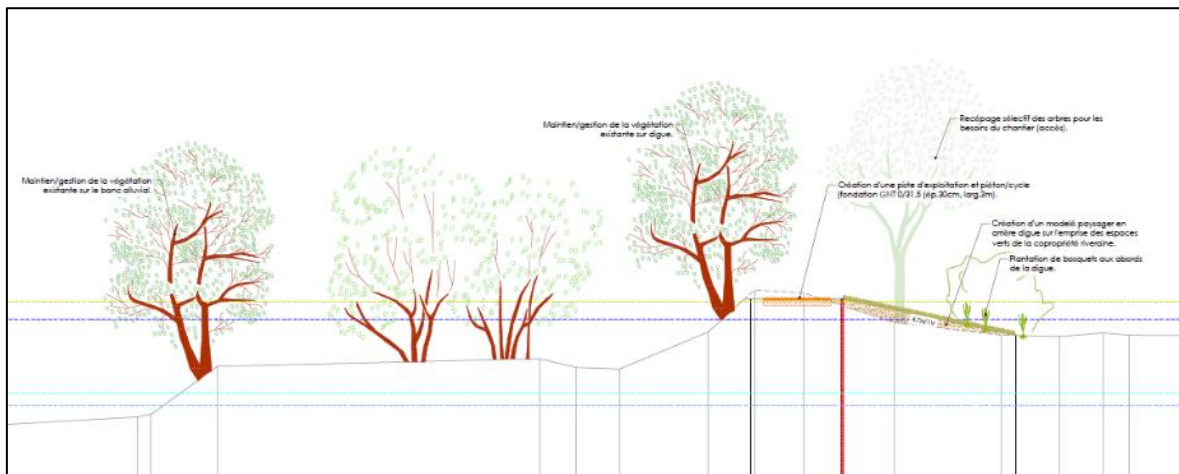


Figure 57 : Profil type RD-T4.

### Réflexion paysage :

La conservation du boisement installé durablement sur le banc alluvial est une plus-value non négligeable pour le maintien d'un paysage qualitatif aux abords de l'Arve dans la traversée urbaine de Bonneville. De nombreuses sentes pénètrent ce boisement au-delà de l'ancien perré, ce qui témoigne d'une appropriation importante des riverains qui se promènent, cherchent la fraîcheur du sous-bois ou pratiquent des activités de loisirs, telle que la pêche. En effet, la préservation de milieux naturels et plus particulièrement d'îlots de fraîcheur dans les centres-villes est un objectif essentiel à la préservation d'un cadre agréable pour les citoyens.

Le rideau de palplanche sera invisible, dissimulé sous la digue actuelle et le futur chemin. Le long du quai du Bargy le chemin en crête sera réservé aux piétons, les cyclistes et voitures d'entretien resteront en contrebas. Le talus côté val, séparant le chemin de la voirie pourra être végétalisé (au dos de la palplanche) avec des espèces arbustives basses afin d'améliorer l'ambiance paysagère depuis le chemin et marquer une limite franche entre voie piétonne et voirie partagée.

À l'amont du quai du Bargy, au droit des lotissements, le chemin en crête s'élargira pour laisser passer un véhicule d'entretien. La crête de digue pourra néanmoins être végétalisée avec une strate herbacée, le chemin piéton de 2 mètres de large, en stabilisé renforcé, sinuera sur cette crête. Le talus côté val présentera des pentes variables afin de créer de la diversité. L'emprise du remblai dépendra des arbres à maintenir ou à supprimer. Le pied du talus côté val, sera également sinueux. **Cette diversité de formes, de pentes, d'espaces plantés (bosquets arborés, arbustifs ou prairie) participera à la création d'un cadre paysager diversifié et qualitatif.**

#### 5.2.2.4.3 Digue rive droite – RD-T6 (T02 – Digue du Trésor public)

Linéaire d'application : 100 m,

Type d'intervention : confortement par l'aval (mur digue).

L'objectif est de réaliser un confortement via un muret/digue disposé en pied de talus aval, tout en maintenant la digue actuelle, dont l'altimétrie est au moins égale à la cote d'arasé projetée ( $Q_{100} + \text{revanche}$ ), afin de conserver la végétation présente sur le talus amont.

Le mur de soutènement, dont l'arasé supérieure est positionnée à l'altimétrie de  $Q_{100} + \text{revanche}$ , est étanche et constitue l'ouvrage de protection. Les caractéristiques prises en compte à ce stade sont les suivantes :

- Mur préfabriqué de type T renversé
- Hauteur totale : 1.7 à 2.2 m,
- Largeur de la semelle : 1.8 m,
- Semelle positionnée hors gel, reposant sur un béton de propreté.

Le remblai, réalisé en tout venant, permettra l'élargissement de l'espace public existant sur la digue sans pénaliser les racines de l'alignement d'arbres existant.

Côté amont, six épis seront disposés en pied 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 § 7.2.3. La végétation du talus amont sera conservée tel que susmentionné mais entretenue de manière ciblée (recépage et élagage sélectif) afin de limiter la trop forte présence d'arbres de hauts jets et le risque de déchaussement des substrats de berge par effet de bras de levier sur les racines.

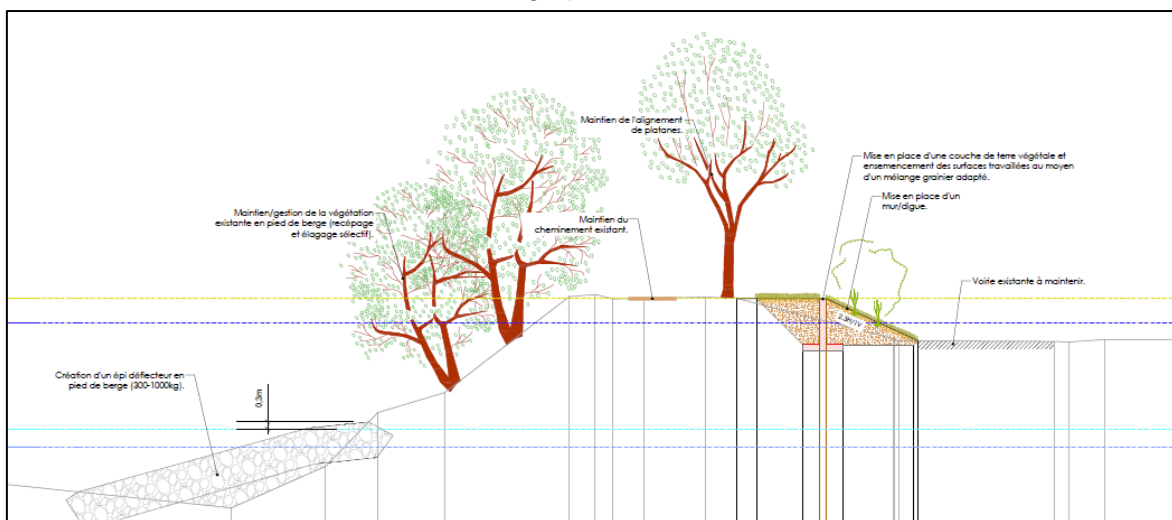


Figure 58 : Profil type RD-T6

### Réflexion paysage :

L'aménagement d'un muret-digue le long de la voirie est intéressant sur le plan paysager, car il permet de conserver l'alignement d'arbres déjà en place ainsi que les arbres implantés sur la berge. Comme sur le secteur du Bouchet, il nous apparaît essentiel, lorsque cela est possible, de maintenir le maximum de végétation arborée. Cette strate arborescente apporte un ombrage de qualité et permet de réduire les températures déjà importantes dans les centres-villes. La rivière et ses berges végétalisées seront probablement dans quelques années des lieux de ressourcement indispensables lors des fortes chaleurs estivales et printanières. La sur largeur gagnée pour l'espace public permettra de décaler les bancs existants du chemin existant, qui est maintenu, sous les arbres. Pour éviter la chute, le muret-digue pourra être rehaussé de 0,40 mètre environ par rapport au niveau du remblai. Au droit du parking existant, le muret séparera les places de stationnements et le chemin piéton.

Il apparaît important de soigner la qualité du muret qui sera largement visible depuis la route. Une bande de 1,50 m à 2 m minimum en pente, entre la route et le muret, permettrait de planter une strate arbustive basse afin de dissimuler l'aspect rigide et rectiligne du muret. Cette haie basse devra être entretenue pour ne pas réduire la visibilité depuis la voirie. Si cette haie dépasse en hauteur le muret, elle assurera une limite plus franche entre l'espace public ombragé et la route.

Sur ce secteur, au droit des bâtiments, aucun passage piéton n'est indiqué, et ce malgré la construction d'immeubles récents. Il n'apparaît donc pas nécessaire d'aménager un escalier ou une pente douce pour franchir le muret et rejoindre l'espace piéton.

#### 5.2.2.4.4 Digue rive droite – RD-T7 à RD T9 (T01 – Digue des Rêvées / T01 – Lisière du Clos)

Linéaire d'application : 520 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ce secteur est situé au droit du Quai d'Arve. Il s'agit ici d'une reprise intégrale de l'ouvrage dont la cote supérieure actuelle est supérieure à la cote Q100+revanche. La reprise de l'ensemble du talus amont permet également de supprimer l'ancien mur existant de haut de berge puis d'adoucir le profil de pente à quelques 2.2H/1V, ce qui donne une légère surlargeur au lit mineur de l'Arve dans un secteur particulièrement étroit. 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 § 7.2.3.

Les caractéristiques communes à l'ensemble des ouvrages du tronçon sont les suivantes :

- Pente du talus amont : 2.2H/1V,
- Enrochement 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.

Sur les 140 m les plus à l'amont (RD-T7) l'espace disponible permet de recréer une digue en terre :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pentes du talus aval : 2H/1V,
- Talus amont :
  - Enrochements 300/1000 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de juillet surélevé de 30 cm,
- Bèche de stabilisation :
  - Epaisseur : 1.5 m,
  - Largeur en partie supérieure : 6 m.

La piste d'exploitation, en crête de l'ouvrage, sert également de piste pour les modes doux.

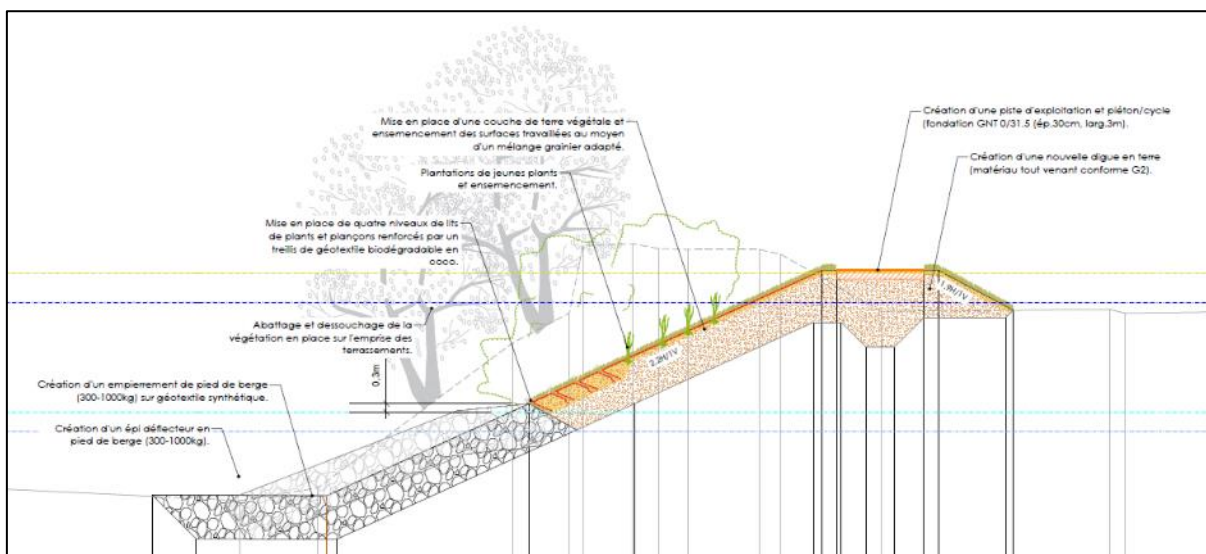


Figure 59 : Profil type RD T7

Sur les 315 m suivant (RD-T8), l'ouvrage de protection est constitué par un mur béton du fait de l'espace contraint par la voirie existante au droit du quartier des îles, et par la nécessité d'assurer la continuité vers l'aval de la piste modes doux.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Mur en L,
- Hauteur totale : 1.6 à 2 m,
- Largeur de la semelle : 1.2 m,
- Semelle positionnée hors gel, reposant sur un béton de propreté.

Le talus est traité de la façon suivante :

- Enrochements 1000/3000 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de juillet surélevé de 30 cm,
- Bèche de stabilisation :
- Epaisseur : 2 m,
- Largeur en partie supérieure : 6 m.

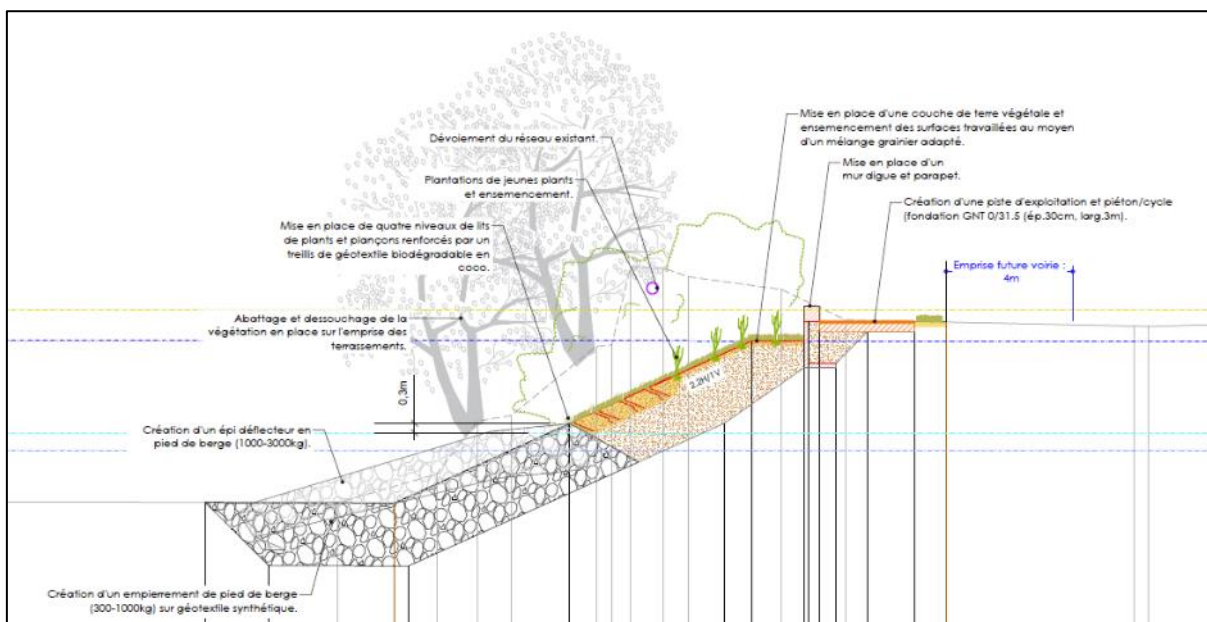


Figure 60 : Profil type RD T8.

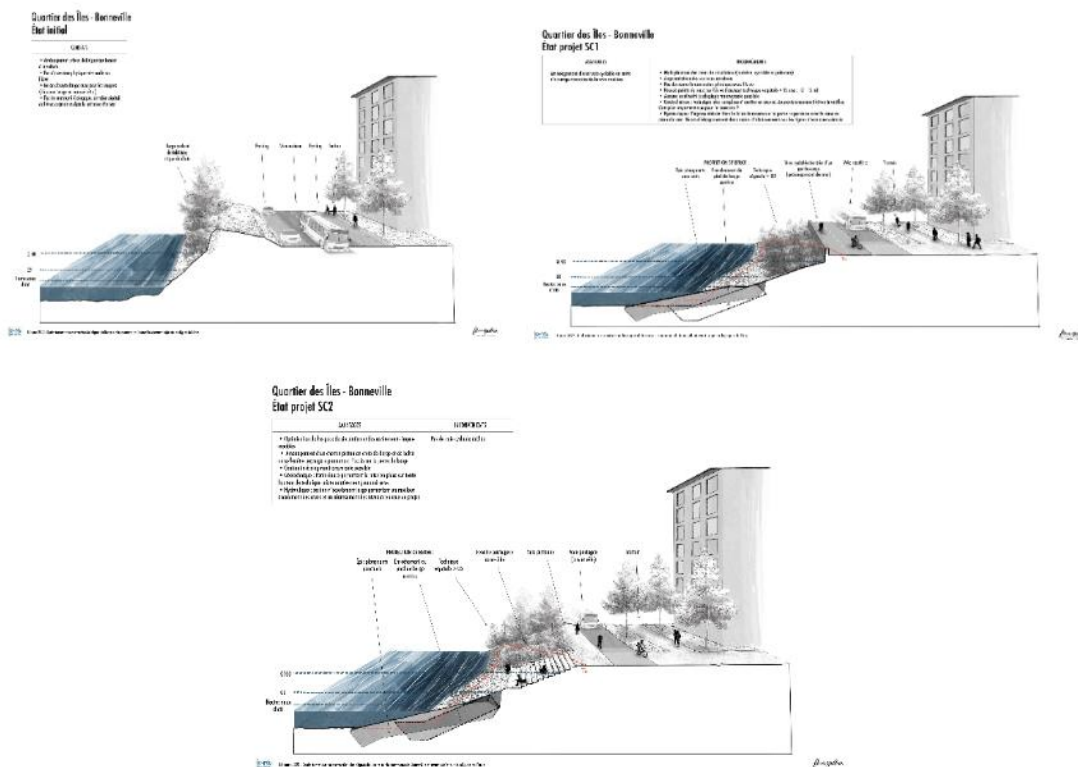
Le tronçon suivant (RD-T9) constitue le raccordement entre la digue du RD-T8 et la berge de la Lisière du clos laissée en l'état. Le TN y est supérieur au niveau de  $Q_{100} +$  revanche. Le talus de la berge est traité de façon identique à celui du RD-T7. Un mur béton pourra être mis en place en crête de berge à des fins paysagère (pas de rôle de protection contre les inondations).

### Réflexion paysage

L'objectif paysager est d'assurer sur ce tronçon une continuité piétonne entre le centre-ville et le chemin de l'Arve en aval (via les quais). Ici, l'altimétrie du chemin est variable. Il est par endroit nécessaire de créer un muret-digue. Afin de conserver une cohérence sur ce linéaire, depuis le pont de la prison jusqu'au quartier des îles, le muret sera prolongé à hauteur identique par rapport au chemin, même si celui-ci ne fait pas office de digue. Lorsque le muret n'est pas nécessaire, il sera possible de créer une ouverture de 3 mètres environ, telle une porte, afin que les usagers puissent rejoindre le chemin sans avoir à enjamber le muret.

Le muret béton devra être soigné sur le plan esthétique. Un revêtement en pierres serait souhaitable. Si la largeur le permet, un parterre arbustif bas, entre le mur et la voirie serait également approprié afin de limiter l'impact d'une nouvelle construction très anthropique aux abords de l'Arve, qui se veulent plus naturels.

Trois scénarios de projets ont été proposés en amont de la rédaction de cet AVP. Pour des raisons foncière et pratiques pour les circulations dans le quartier des îles, le scénario 1 a été retenu. Une bande enherbée devra néanmoins être étudiée entre la voie routière et la voie verte. Le revêtement de la voie verte ne sera pas obligatoirement en enrobé, mais pourra être du stabilisé renforcé.



### 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 :

- 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,

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).

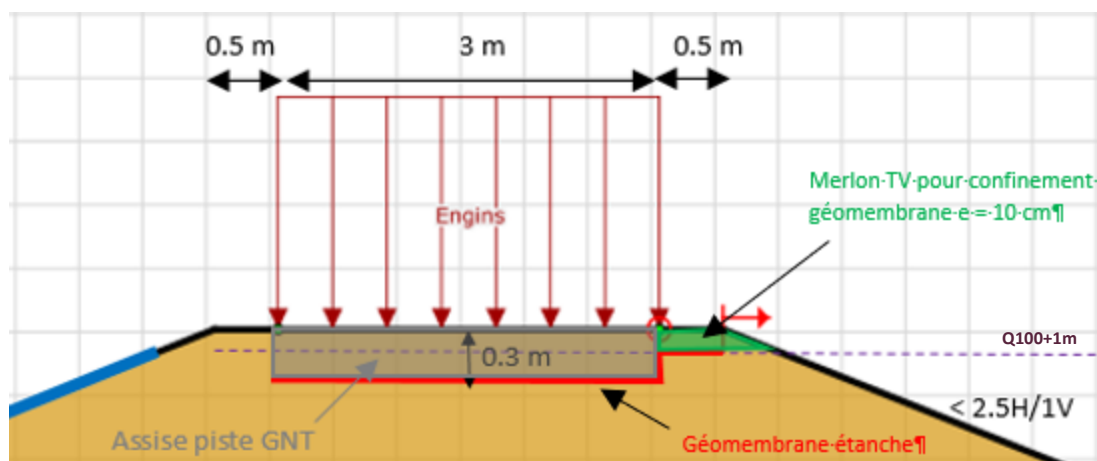


Figure 61 - Etanchéité au droit des pistes d'exploitation.

### 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 héliophytique, 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 droite sont représentées avec la couleur orange sur la figure suivante :

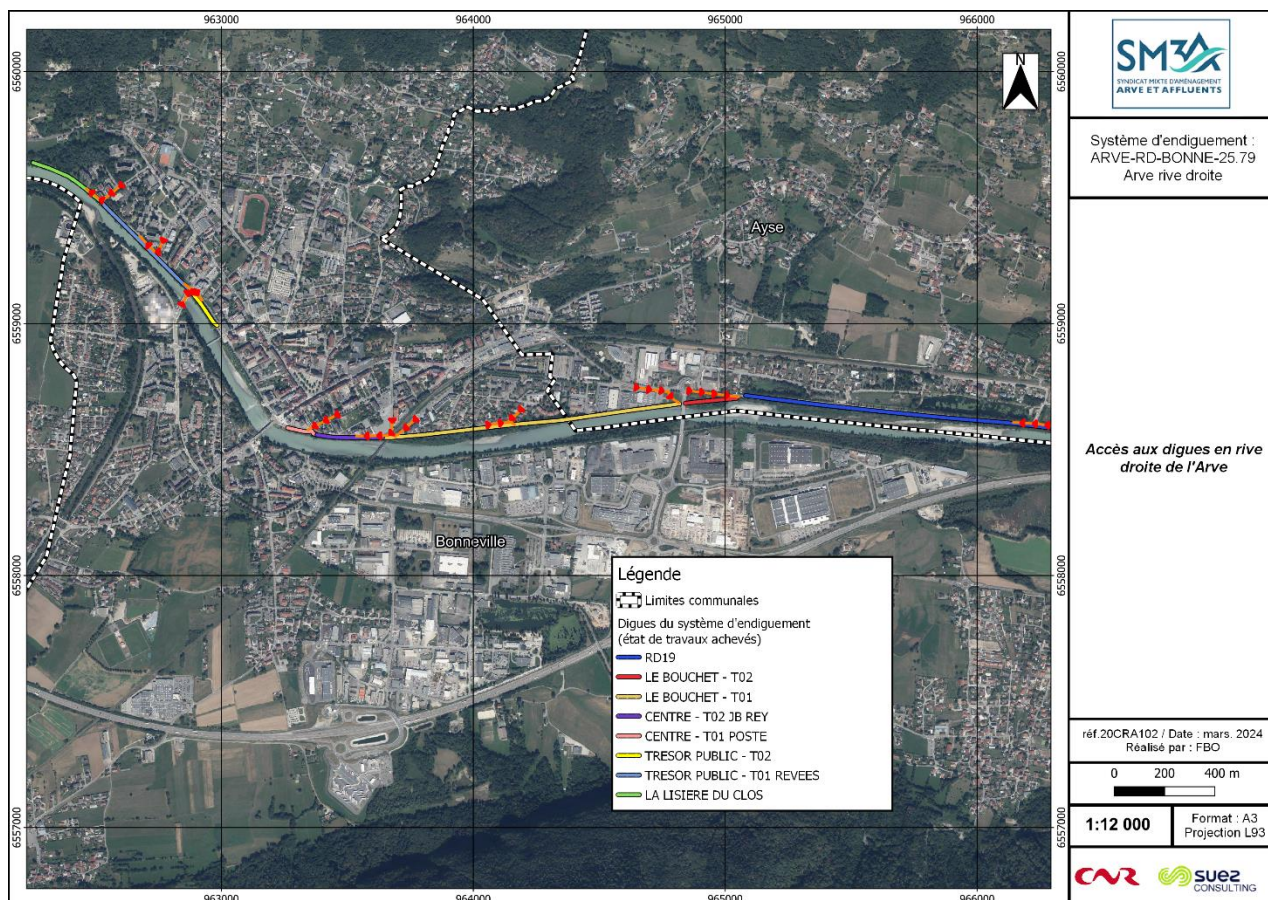


Figure 62 : Voies d'accès au système d'endiguement – digues de l'Arve rive gauche

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 droite de l'Arve, on retrouve la réalisation des différents tronçons homogènes par phase suivante :

- Phase 1 : Tronçons RD-T1 à RD-T5 ;
- Phase 4 : Tronçons RD-T6 à RD-T9.



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'enjeu au droit des digues dont les travaux sont prévus lors de la phase 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 :

SYSTÈME	IDENTIFIANT_SIRS	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
BONNEVILLE AYZE ARVE-RD-BONNE-25.79	ARVE-RD-AYZE-28.89	RD19				Q100 Cas 2	Q200 Cas 2	>Q500 Cas 2
	ARVE-RD-BONNE-28.89	LE BOUCHET -T02	Q10 525 m3/s Cas 1	Q30 691 m3/s Cas 1	Q100 870 m3/s Cas 1	Q100 870 m3/s Cas 1	Q100 870 m3/s Cas 1	Q200 Cas 1
	ARVE-RD-BONNE-27.68	LE BOUCHET -T01						
	ARVE-RD-BONNE-27.41	CENTRE - T02 JEAN BAPTISTE REY	Q100 Cas 2	Q200 (972 m3/s) Cas 2	>Q500 (1107 m3/s) Cas 2	Q100 Cas 2	Q200 Cas 2	>Q500 Cas 2
	ARVE-RD-BONNE-27.23	CENTRE - T01 POSTE						
	ARVE-RD-BONNE-26.59	TRESOR PUBLIC-T02	Q10 Cas 1	Q30 Cas 1	Q100 Cas 1			
	ARVE-RD-BONNE-26.09	TRESOR PUBLIC-T01 LES REVEES						
	ARVE-RD-BONNE-25.79	LISIÈRE DU CLOS	>Q200 Cas 1	>Q200 Cas 1	>Q500 Cas 1	>Q200 Cas 1	>Q200 Cas 1	>Q500 Cas 1

Figure 65 - 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 du SE à l'aval du pont de l'Europe 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.

Dans cet état subsiste donc un risque de rupture pour ces tronçons à l'aval du pont de l'Europe. Une brèche a été modélisée lors d'une crue centennale. Cette modélisation permet de modéliser les venues d'eau derrière les tronçons de digues existantes.

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.Bis 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 brusque du niveau de l'eau 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. (+ rapport en annexes). Les simulations hydrauliques 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 suivante 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 secteur Trésor Public.

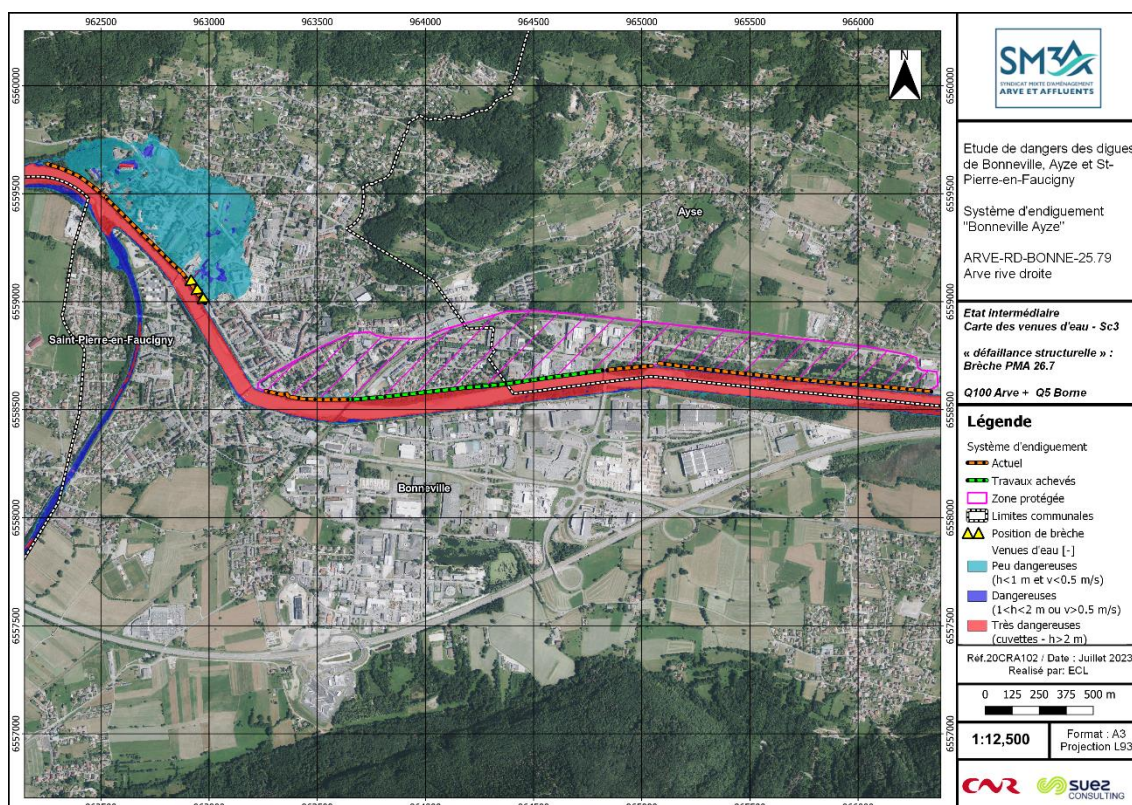


Figure 66 - Cartographie d'une brèche sur les tronçons à l'état actuel pour un état intermédiaire au cours de la réalisation des travaux (Phase 1 et 2 réalisées)

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 « Bonneville Ayze » en situation de travaux achevés.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

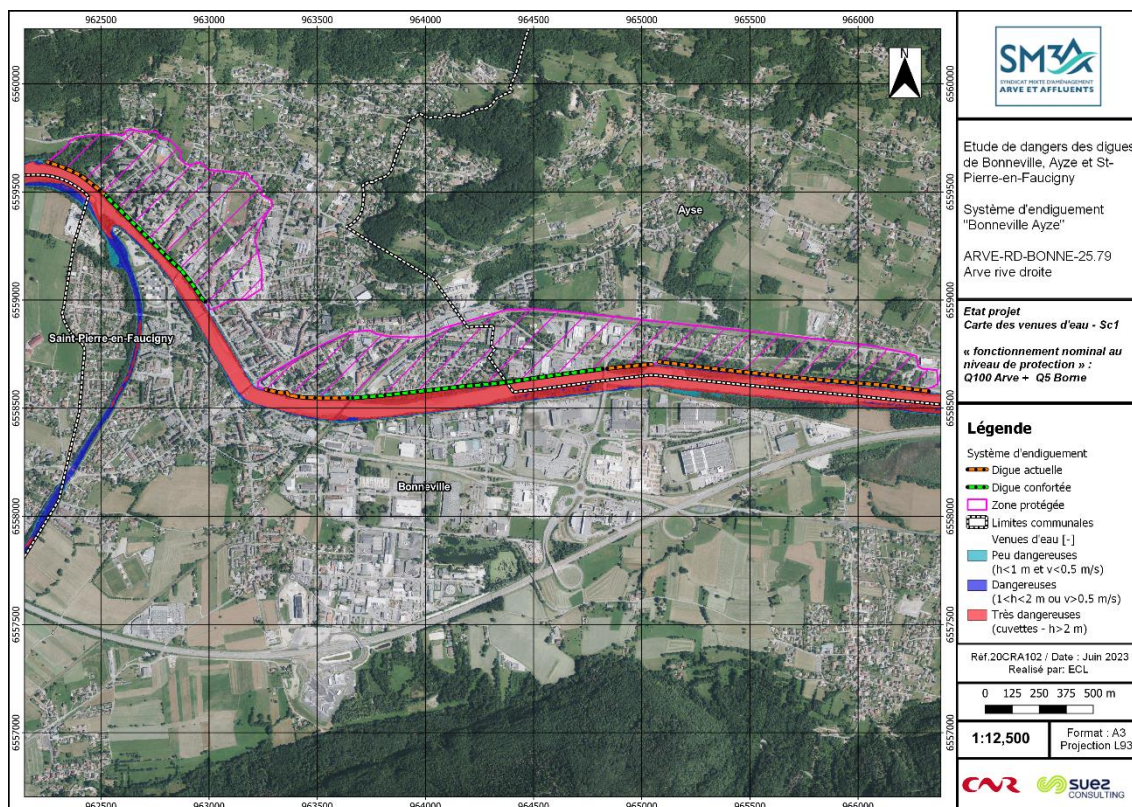


Figure 67 : Cartographie des venues d'eau en Q100 Arve à l'état final

## 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 [5]. 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 XVIII<sup>e</sup> 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 Ayze 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 5, tiré de l'étude historique fait état des crues ayant eu le plus d'impact.

Durant ces différentes crues ainsi que d'autres survenues récemment (2015). 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 <sup>3</sup> /s	912-1000 m <sup>3</sup> /s	777m <sup>3</sup> /s*
Confluence avec le Borne	1250 m <sup>3</sup> /s	-	-
Amont du modèle hydraulique (Borne)	-	-	100m <sup>3</sup> /s*

Tableau 14 : 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 m<sup>3</sup>/s au droit de Bonneville.

La carte en Figure 68 localise les crues en fonction de leur siècle d'occurrence sur un ortho photoplan.

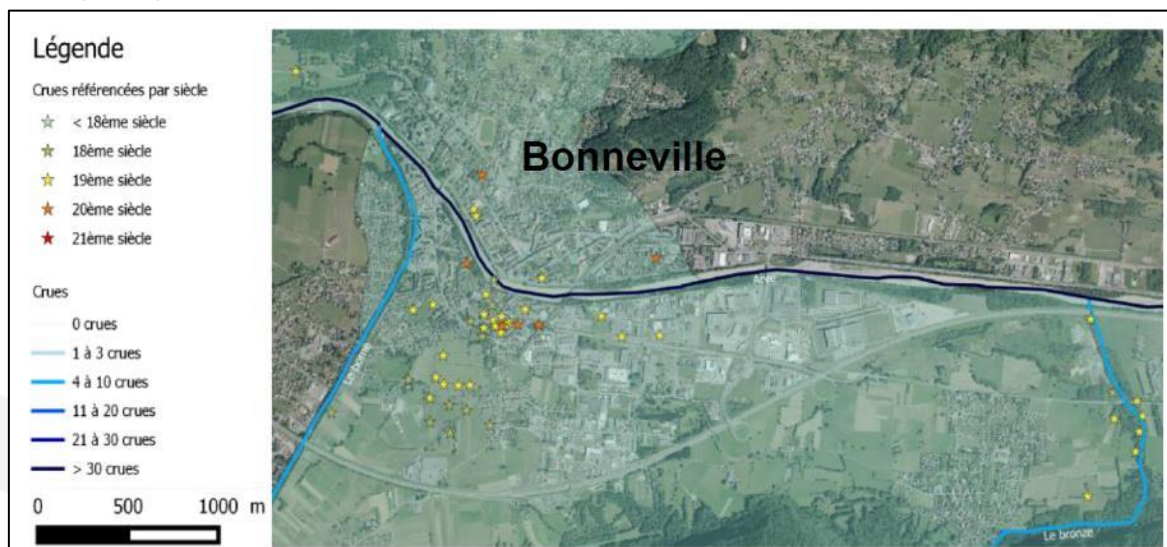


Figure 68 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude - Source S.M.3.A.

## 6.2.2 Synthèse des observations – typologie des désordres (VTA)

### 6.2.2.1 VTA 2017 (CNR)

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

Les désordres observés sur les secteurs ne faisant pas l'objet de travaux sont décrits dans la VTA de 2017, que l'on peut retrouver en annexe de la présente étude.

### 6.2.2.2 VTA 2020/2021 (CNR/SAFEGE)

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.

**Cette VTA a été réalisée sur les digues qui font l'objet de travaux. Le rapport VTA de 2021 sur les digues de l'Arve est présent en annexes.**

La figure ci-après présente les linéaires visités en 2020/2021 (Arve rive gauche et Arve rive droite).

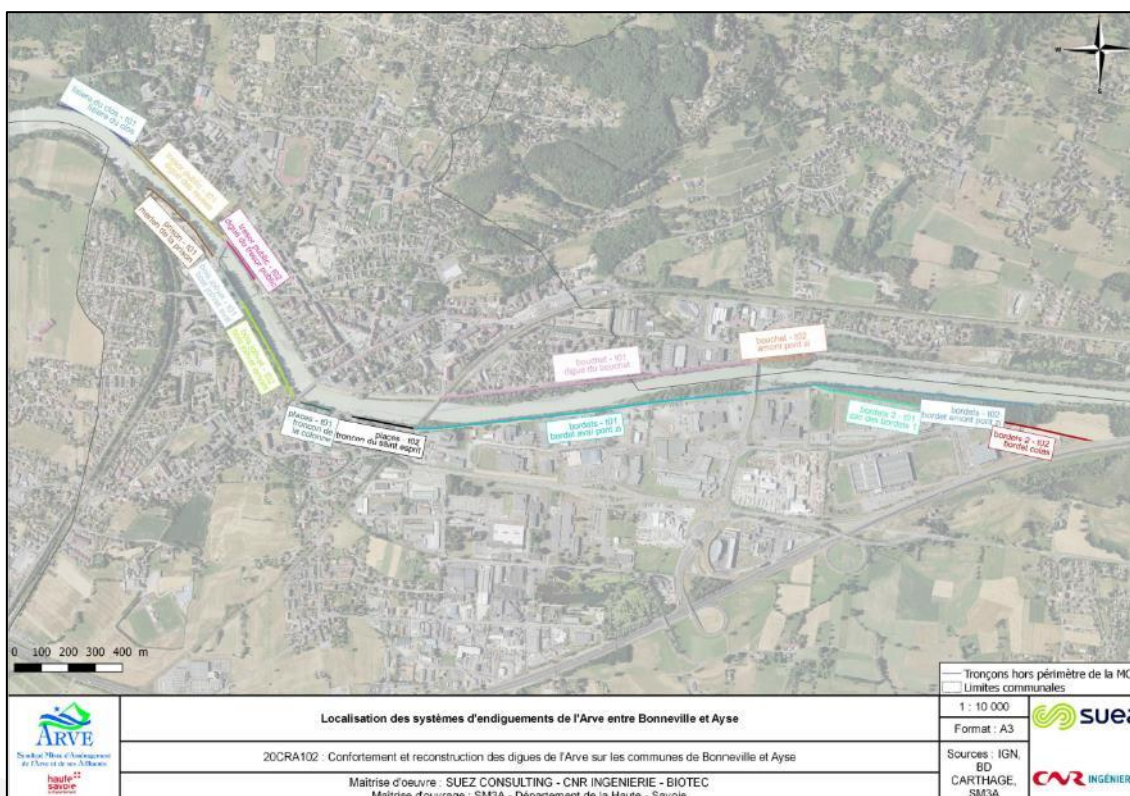


Figure 69 : Localisation des linéaires de digue de l'Arve concernés par la VTA

Les éléments synthèse de VTA en rive droite de l'Arve appartenant au système ARVE-RD-BONNE-25.79 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.

### Hierarchisation 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 15 : 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 défailants 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](http://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<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> mai 14 h, le gradient d'environ 55 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s – apparaît comme étant supérieur au pic de crue de la crue de mars 2001 mais inférieur aux 980 m<sup>3</sup>/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 décliné jusqu'à 600 m<sup>3</sup>/s dimanche 3 mai à 12 h 30, puis il est remonté jusqu'à 729 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s. Après un premier fléchissement à 785 m<sup>3</sup>/s, le niveau s'est à nouveau élevé jusqu'à 961 m<sup>3</sup>/s lundi 4 mai avant d'amorcer une nouvelle baisse durable. Le débit d'une crue décennale à Saint-Gervais étant de 1 600 m<sup>3</sup>/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<sup>er</sup> 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 Vigicruces. Les seuils d'alerte de niveau 1 et 2 sur l'Isère amont ayant été atteints respectivement vendredi 1<sup>er</sup> 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 70 : 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.





Figure 71 : Rupture de la digue en rive gauche



Figure 72 : 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 rupture 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.

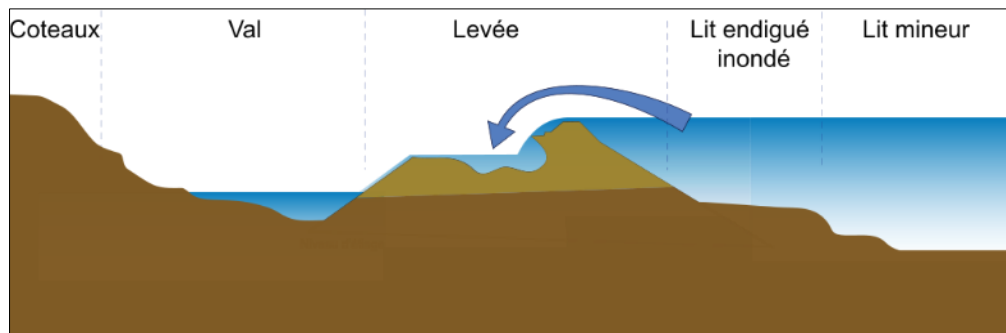


Figure 73 : Schéma de principe d'une rupture par surverse

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.

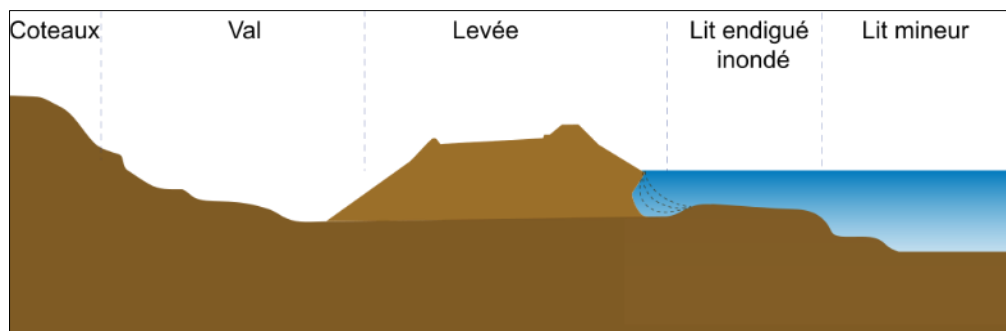


Figure 74 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe

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.

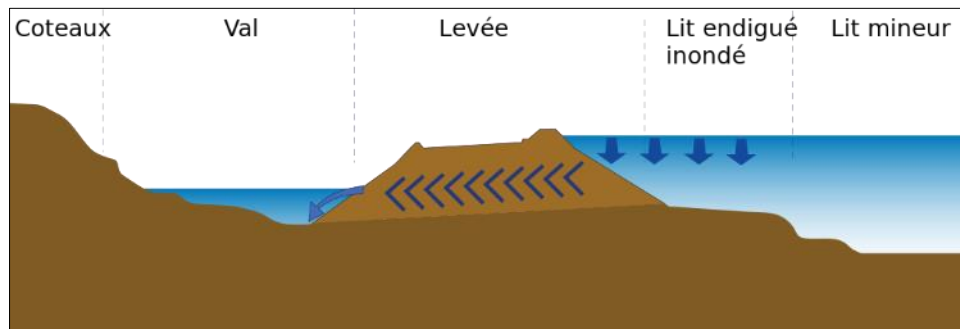


Figure 75 : Schéma de principe d'une rupture par effet de renard hydraulique

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 ;
- Présence de réseaux traversants ;
- 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.

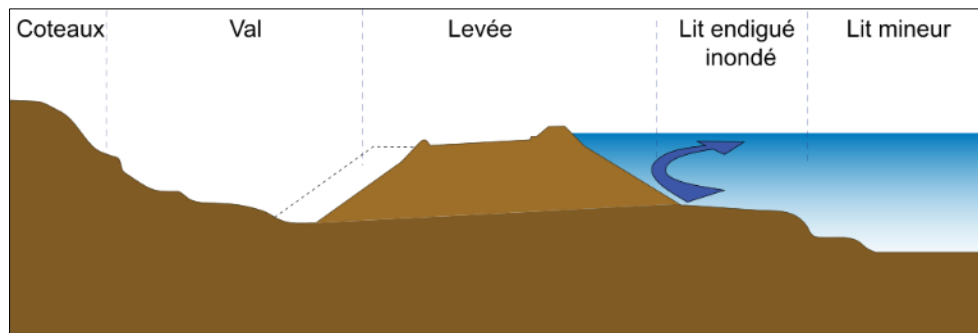


Figure 76 : Schéma de principe de rupture d'ensemble

#### 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 les réseaux traversants : ruisseau de la Madeleine et Castorducs à la suite d'une défaillance des vannes de fermeture (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 événements redoutés centraux suivant :

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

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

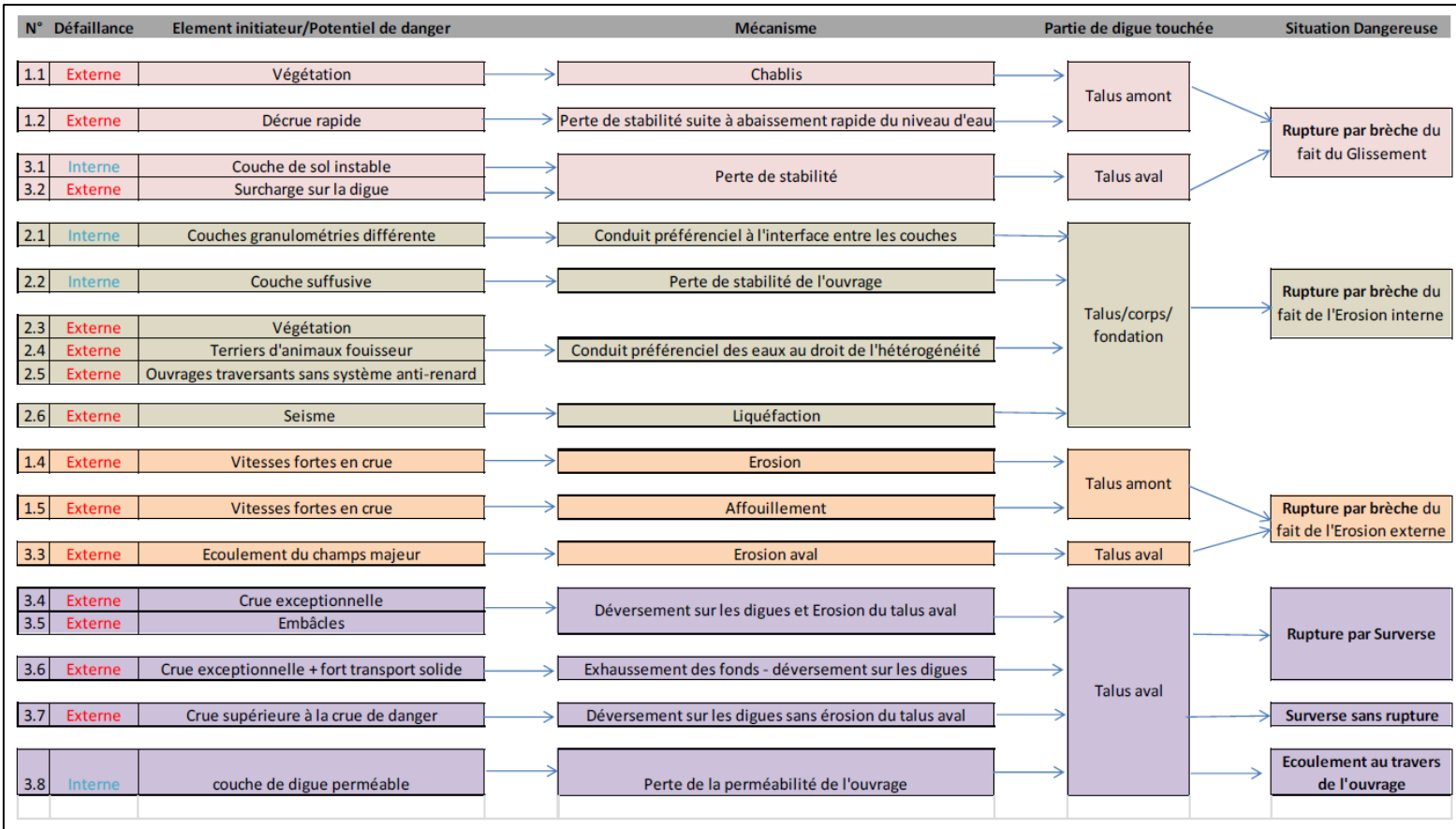


Tableau 16 : Identification des Situations dangereuses et Potentiels de danger pouvant intervenir sur une digue de protection contre les inondations (source : CNR, 2019)

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

#### 7.1.1 Reconnaissances géophysiques

##### 7.1.1.1 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 suivante la localisation des reconnaissances géophysiques réalisées sur le secteur d'étude :

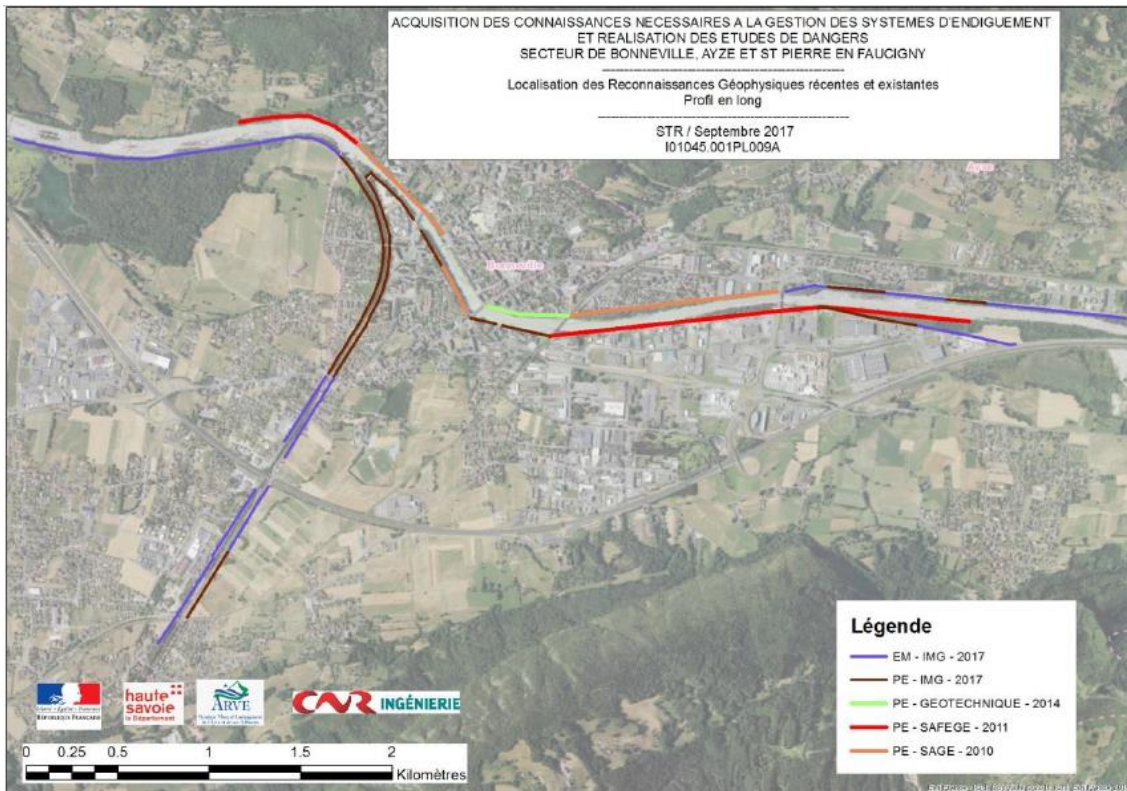
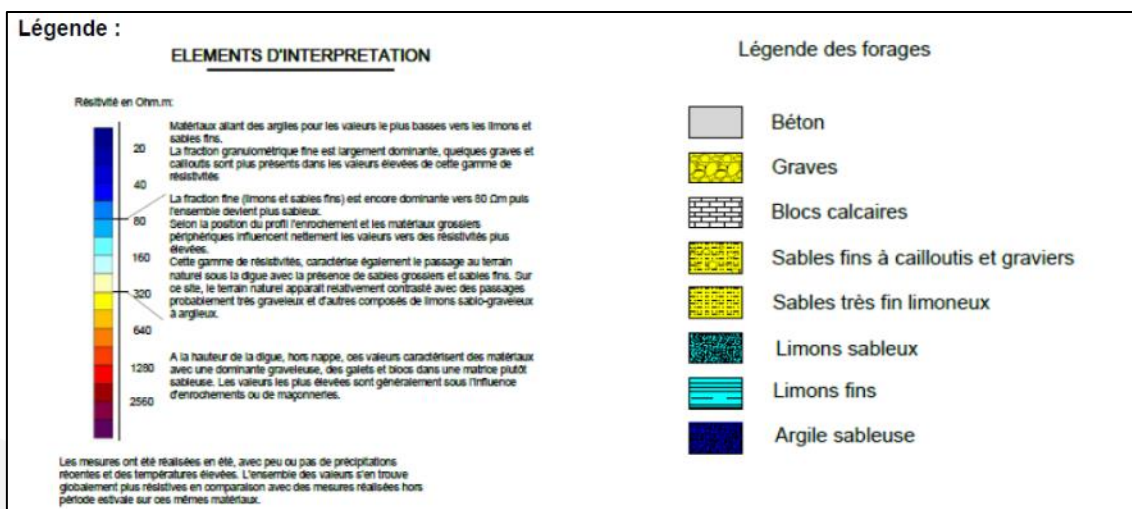


Figure 77 - Localisation des campagnes de reconnaissances géophysiques

### 7.1.1.2 Reconnaissances géophysiques en rive droite de l'Arve

Les figures suivantes sont légendées comme suit :



## Arve

### RD19 :

Zone investiguée : Profil en long Dual EM ou Panneaux Electriques (si influence glissière). Profils en travers en Panneaux Electriques. Linéaire de 1.7 km aval sur les 3.7 km de RD19. Le reste de la digue est constituée par la route très large (**très peu de risque d'instabilité**).

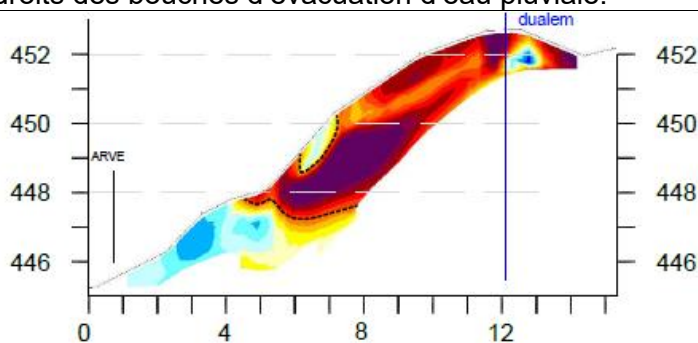
Composition : 2 types de digues :

Corps limoneux recouvert en tête par des graviers ou enrochement. Fondation sous une couche graveleuse, matériaux plus fins.

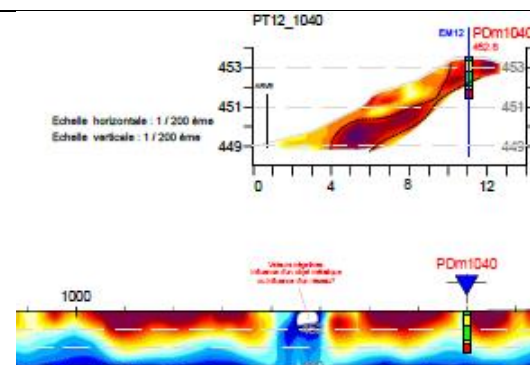
Corps et fondation très graveleuse sur toute la hauteur du PM1120 au PM1320.

Enrochement en protection jusqu'à mi-talus.

Réseaux - singularité : PM385, PM1025, PM1420, PM1450 et PM1540 Très probablement aux droits des bouches d'évacuation d'eau pluviale.



Coupe PM830- RD19  
IMG 2017



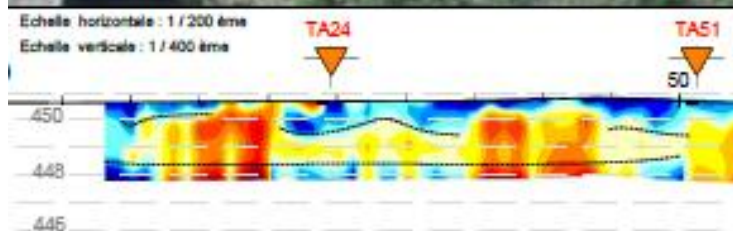
Coupe PM1040 + extrait profil en long  
– RD19  
IMG 2017

### Les Bouchets T02 :

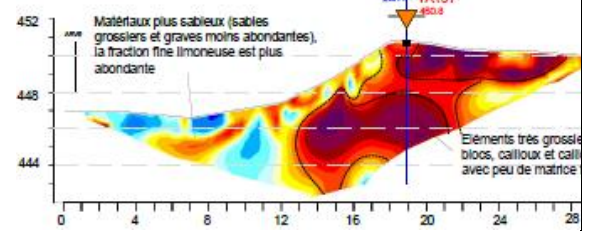
Zone investiguée : Profil en long Dual EM ou Panneaux Electriques / Profil en travers Panneaux Electriques

Composition : Surface sableuse (non visible sur le panneau électrique puis corps et fondation graveleuse ou enrochement. Fondation profonde plus fine. Protection du parement amont en enrochement pas toujours présente.

Réseaux - singularité : Influence de bloc béton ferrailé du PM 100 au PM120



Extrait Profil en long – IMG2017

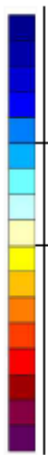


Profil en travers – PM151 – IMG 2017

Légende :

**ELEMENTS D'INTERPRETATION**

Résistivité en Ohm.m:



Matériaux allant des argiles pour les valeurs le plus basses vers les limons et sables fins.  
La fraction granulométrique fine est largement dominante, quelques graves et cailloutis sont plus présents dans les valeurs élevées de cette gamme de résistivités

La fraction fine (limons et sables fins) est encore dominante vers 80 Ohm puis l'ensemble devient plus sableux.  
Selon la position du profil l'enrochement et les matériaux grossiers périphériques influencent nettement les valeurs vers des résistivités plus élevées.  
Cette gamme de résistivités, caractérise également le passage au terrain naturel sous la digue avec la présence de sables grossiers et sables fins. Sur ce site, le terrain naturel apparaît relativement contrasté avec des passages probablement très graveleux et d'autres composés de limons sablo-graveleux à argileux.

A la hauteur de la digue, hors nappe, ces valeurs caractérisent des matériaux avec une dominante graveleuse, des galets et blocs dans une matrice plutôt sableuse. Les valeurs les plus élevées sont généralement sous l'influence d'enrochements ou de maçonneries.

Les mesures ont été réalisées en été, avec peu ou pas de précipitations récentes et des températures élevées. L'ensemble des valeurs s'en trouve globalement plus résistives en comparaison avec des mesures réalisées hors période estivale sur ces mêmes matériaux.

**Légende des forages**

- Béton
- Graves
- Blocs calcaires
- Sables fins à cailloutis et graviers
- Sables très fin limoneux
- Limons sableux
- Limons fins
- Argile sableuse

**Les Bouchets T01 :**

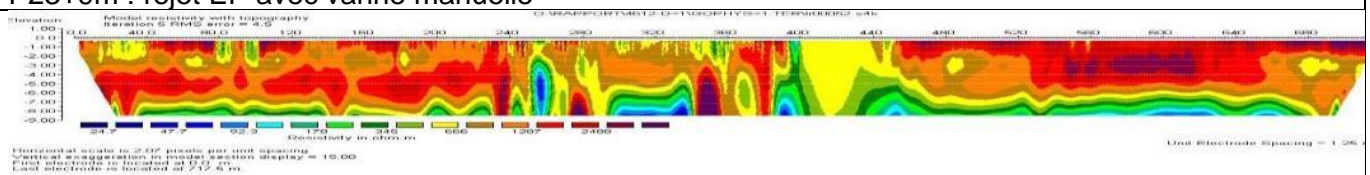
Composition : Suivant diagnostic SAGE

Un corps de digue composé essentiellement de graves sableuses moyennement compactes (Rd = 5 à 10 MPa) présentant des résistivités relativement fortes (> 1300 m) et contenant des blocs (refus des sondages pénétrométriques obtenus à 2,6 m en SPD5, à 2,2 m en SPD7)

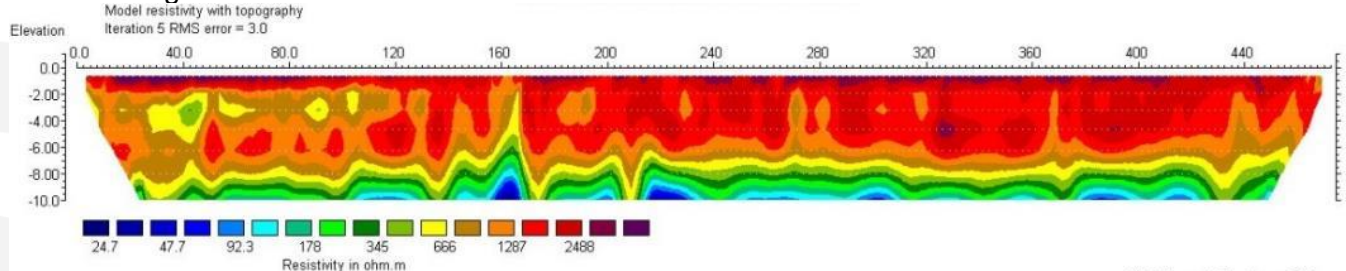
Des terrains de fondation humides voire saturés présentant des résistivités faibles à élevées (70 à 1200 m). Ces terrains sont constitués d'alternance de graves sableuses et de matériaux fins sablo-limoneux pouvant contenir ou non des galets.

Réseaux - singularité :

- P2+35m : buse avec enrochements autour
- P7 : buse EP
- P18+45m : rejet EP avec vanne
- P20+43m : rejet EP avec vanne manuelle
- P23+9m : rejet EP avec vanne manuelle



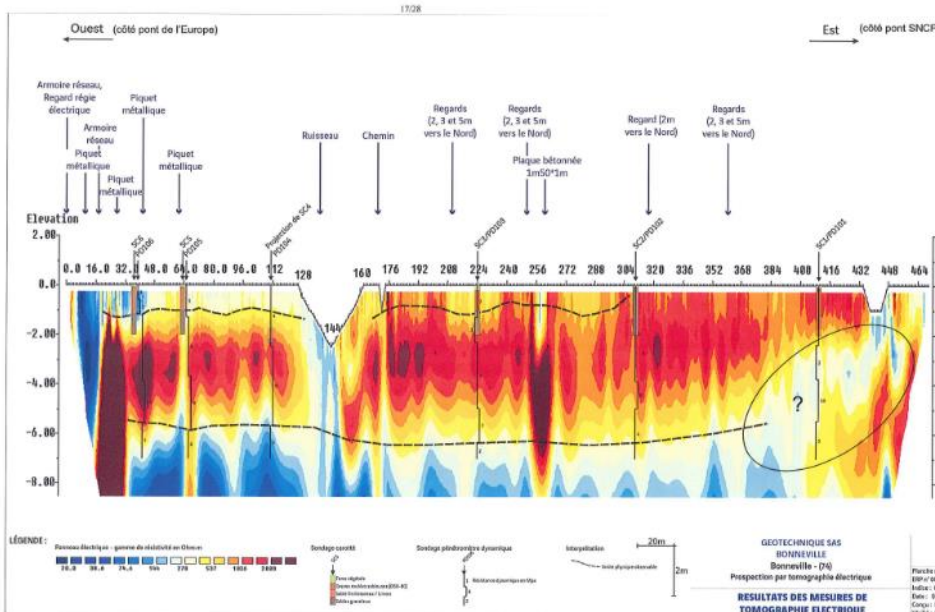
Profil en long PE2 – SAGE 2010



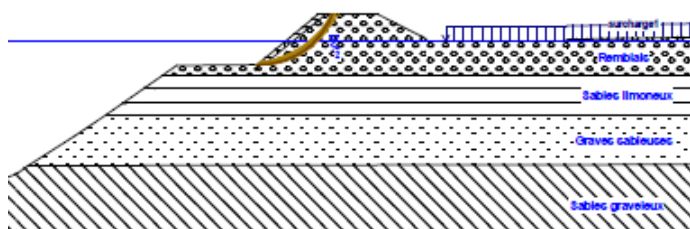
Profil en long PE3 – SAGE 2010

**J.-B. Rey et Poste :**

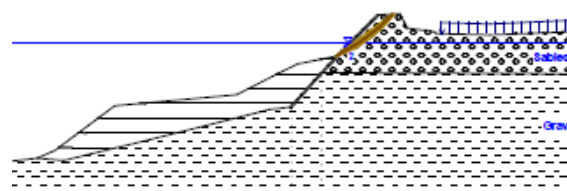
**Composition :** 4 profils types identifiés par GEOTECHNIQUE RA. 2 premiers mètres sablo graveleux. Corps gravelo-sableux et fond sablo-graveleux à limono-sableux.  
**Réseaux – singularités :** 4 Regards détectés, 1 plaque bétonnée et 4 piquets métalliques.



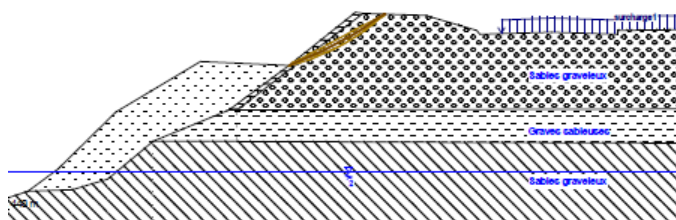
Profil en long – Vue en coupe  
 GEOTECHNIQUE RA 2014



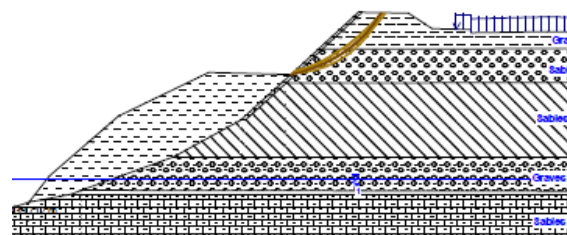
Profil type 1 : GEOTECHNIQUE RA 2014



Profil type 2 : GEOTECHNIQUE RA 2014



Profil type 3 : GEOTECHNIQUE RA 2014



Profil type 4 : GEOTECHNIQUE RA 2014

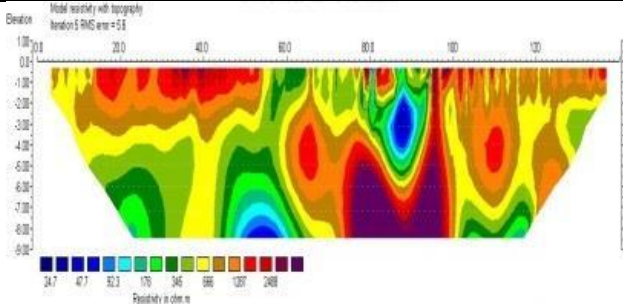
**Trésor Public T01 et T02 :**

**Composition :**  
 Un corps de digue composé essentiellement de sables limoneux à galets et graviers (localement en remblais et matériaux anthropiques divers) moyennement compacts.  
 Des terrains de fondation humides puis saturés. Ces terrains sont constitués d'alternance de sables graveleux à galets et de matériaux fins sablo-limoneux.

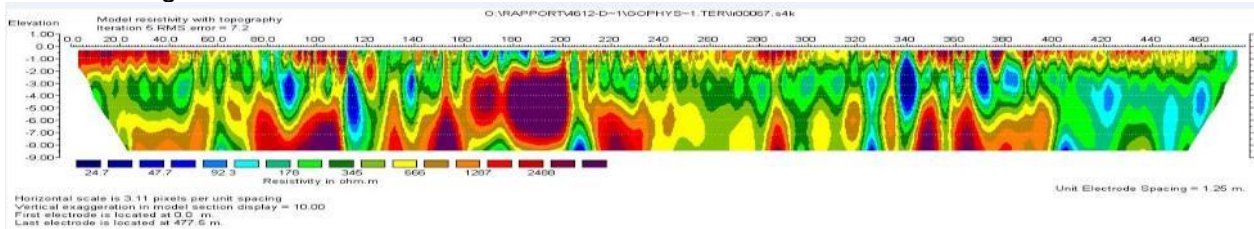
**Réseaux – singularités :** Nombreux réseaux.

Côté val P36+47m : ouvrage béton EU

Côté rivière P37+15m : ouvrage de vannage en béton pour EU avec rejet au niveau du P38 via une buse diamètre 500 mm  
 P39+51m : buse EP avec vanne métallique  
 P41+39m : buse  
 P42+45m : buse  
 P49+12m : buse EP diamètre 600 mm + buse métallique diamètre 100 mm



Profil en long PE 4 – SAGE 2010

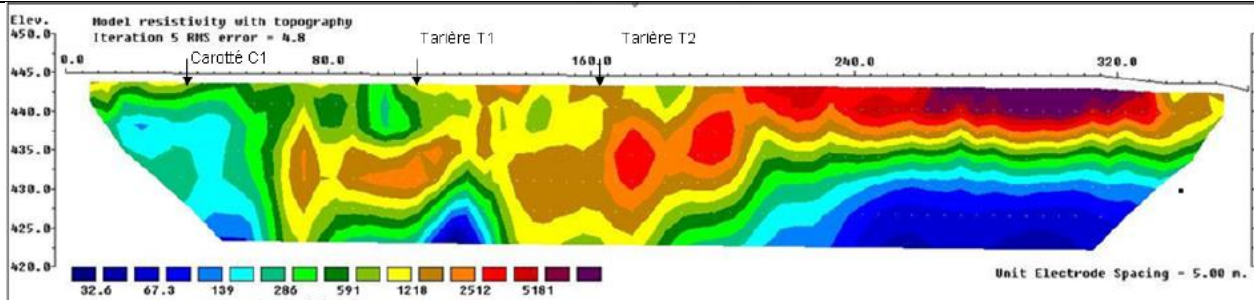


Profil en long PE 5 – SAGE 2010

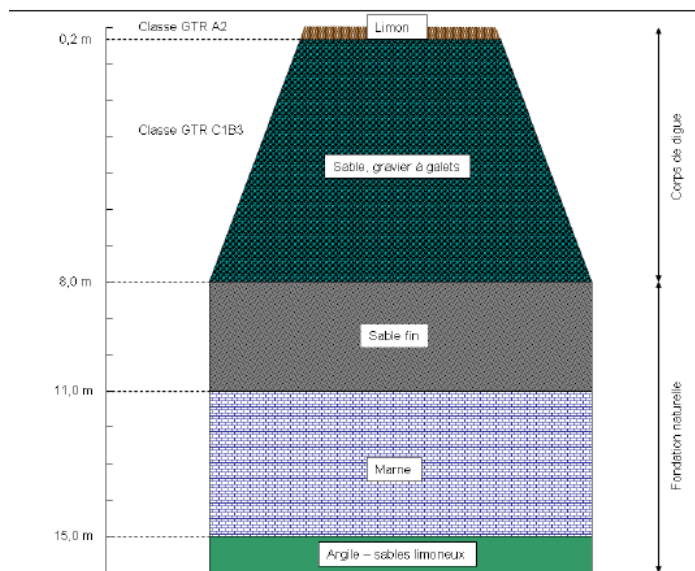
**Lisière du Clos**

Composition : Corps de digue sable grossier puis sable fin, Marne et argile.

Réseaux – singularités : problème d'interprétation du PM0 au PM220 potentiellement lié à un réseau en fonte.



Profil en long – SAFEGE 2011



Coupe –Profil type  
SAFEGE 2011

### 7.1.2 Historique des reconnaissances géotechniques

L'étude de dangers de 2019 (CNR) nous renseigne sur l'historique des reconnaissances géotechniques réalisées sur les digues en rive droite de l'Arve :

- **Les Bouchets et Trésors public (T01 et T02)** : Etude SAGE Ingénierie 2010 ;
- **Lisère du Clos** : Etude SAFEGE 2011 ;
- **J.-B. Rey et Poste** : Diagnostic réalisé par GEOTECHNIQUE RA de juillet 2014 ;
- **RD19 et les Bouchets T02** : Reconnaissances géotechniques réalisées par Hydrogéotechnique de septembre 2017 et reconnaissances géophysiques réalisées par IMG de septembre 2017.

Ces données sont utilisées dans notre diagnostic actualisé.

### 7.1.3 Evaluation de la stabilité des digues existantes (Arve rive droite)

#### 7.1.3.1 Rappel du diagnostic de 2018

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 (par CNR).

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 (hypothèses, application des principes, etc.) restants semblables à celles du diagnostic, elles sont disponibles dans les rapports de diagnostic.

Tableau 17 : 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	Préconisations
RD19	Arve RD	Q10	7.1	>Q1000	Non Testé	Oui	Non Testé car très large	3	Castorduc à fermer Erosion de berge pour la sécurisation RD19
LE BOUCHET T02		Q10	9.7 (20 m à 5)	>Q1000	Non Testé	Non	Talus rivière Instable <i>Hypothèse identique à Bouchet T01</i>	3	Traitement point bas éventuel
LE BOUCHET T01		Q10	2.8	Q1000 PK227.8 à PK27.7	Instable potentiellement + très boisée	Oui	Talus rivière Instable et Talus terre sur 1 profil	4	Abaissement la digue et élargissement ou maintien en fonction des emprises foncières
CENTRE T02 - JBREY		Entre Q10 et Q100	3.8	Entre Q200 et Q1000 PK27.66 + PK27.6 à PK27.4	Instable Potentiellement	Non	Talus terre non testé Talus rivière globalement stable	3	Entretien maçonnerie
CENTRE T01 - POSTE		Q100	3.8	>Q1000	Instable Potentiellement	Non	Non testé car faiblement sollicité	2	Entretien maçonnerie
TRESOR PUBLIC T02		Q10	4.5	Q1000 PK26.7	Instable Potentiellement + boisée	Oui très fortes vitesses	Talus rivière instable	4	Option 1 : exhaussement route et aires de stationnement
TRESOR PUBLIC T01		Entre Q10 et Q100	4.5	>Q1000	Instable Potentiellement + boisée	Oui très fortes vitesses	Talus rivière instable	4	Option 2 : Recalibrage complet de la berge. Faisabilité technico éco très incertains à ce stade A valider hydrauliquement
LA LISIERE DU CLOS		Q200	5.8	Q200 PK25.75	Non Testé	Partie aval non protégée	Non testé car charge à Q200	2	Berge à reprendre sur extrémité aval

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 droite de l'Arve permettait de justifier un niveau de protection correspondant à 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 droite de l'Arve à l'état actuel, il correspond à une crue de période de retour centennale de l'Arve.

### 7.1.3.2 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 sera réalisé en utilisant les paramètres géomécaniques retenus pour l'établissement du diagnostic de 2018.

## 7.2 Mission G2 – Avant-Projet de confortement de l'Arve

Ci-dessous est présenté le prédimensionnement du confortement des digues de l'Arve rive droite 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.**

**Il est à rappeler que les tronçons suivants ne font pas l'objet de travaux de confortement (hors mission de maîtrise d'œuvre de confortement des digues de l'Arve lancée par le SM3A) :**

- RD19
- Le Bouchet T02
- Centre – T01 POSTE
- Centre - T02 JP REY
- La Lisière du Clos (en aval du PK 26.06)

### 7.2.1 Reconnaissances géotechniques de 2021

#### 7.2.1.1 Programme des reconnaissances réalisées

Une campagne de reconnaissance géotechnique/géophysique a été réalisée en 2021 par l'entreprise Hydrogéotechnique. La campagne comprend des essais *in-situ* et des essais de laboratoire sur des échantillons prélevés sur site.

Le programme de reconnaissance a été établi en fonction des solutions de confortement initialement pressenties après un travail d'analyse de l'état et des exigences techniques pour chaque tronçon : des essais au pressiomètre au droit des rideaux de palplanches, des essais de cisaillement pour la stabilité des talus .... Depuis, sur certains secteurs les solutions de confortements ont évolué mais le programme réalisé, avec la multitude et la variété des essais permet de répondre aux différentes attendues en termes de description des sols rencontrés et des caractéristiques mécaniques pour justifier la stabilité des ouvrages.

Les secteurs concernés sont :

- En rive droite (ARD) : La Lisière du Clos, Trésor public et Le Bouchet,
- En rive gauche (ARG) : Merlon prison, Bois Jolivet, Colonne, Saint-Esprit et Les Bordets.

Le rapport G2AVP synthétise les résultats de cette campagne de reconnaissance.

Pour une meilleure caractérisation de sols rencontrés, les conclusions tirées de cette campagne de reconnaissances sont confrontées aux éléments de synthèses tirés de la

campagne de reconnaissance de 2017. Les caractéristiques obtenues des deux campagnes sont comparables.

#### 7.2.1.1.1 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, la profondeur sont données dans le tableau ci-après :

- 9 sondages carottés (SC) suivant la norme NF-EN-ISO-22475-1,
- 15 sondages destructifs (SD), dont 13 accompagnés d'essais de chargement *in situ* de type pressiométrique (PM) suivant la norme NFP 94-110-1 : avec mesure du module de compressibilité  $E_m$ , de la pression de fluage  $p_f$  et de la pression de rupture  $p_l$ ,
- 17 sondages à la pelle mécanique,
- 21 essais de perméabilité de type Lefranc ou Nasberg,
- 3 essais d'infiltration en grand de type MATSUO,
- Prospections géophysiques électriques :
  - Panneau électrique : Les Bordets (RG) : un profil longitudinal sur 382m et de deux profils transversaux de 54 et 63m de longueur

Secteur / type de sondage	Profondeur	Z du TN (mNGF)	Essai d'infiltration/ perméabilité (k)
<b>Secteur La Lisière du Clos</b>			
<b>Sondage carotté</b>			
SC25.990ARD	10.00	445.95	2 LEFRANC
<b>Secteur Trésor Public</b>			
<b>Sondage à la pelle mécanique</b>			
PEL26.250ARD	4.00	446.37	1 MATSUO
<b>Sondages pressiométriques</b>			
PM26.490ARD	27.00	446.29	
PM26.600ARD	21.00	446.77	
<b>Sondage carotté</b>			
SC26.720ARD	10.00	447.35	2 NASBERG
<b>Secteur le Bouchet</b>			
<b>Sondages à la pelle mécanique</b>			
PEL28.040ARD	2.50	446.04	
PEL28.850ARD	2.00	448.80	
PEL28.850ARDbis	3.20	448.15	
<b>Sondages pressiométriques</b>			
PM27.860ARD	12.00	448.00	
PM28.100ARD	12.00	448.48	
PM28.680ARD	10.30	449.76	
<b>Sondages carottés</b>			
SC27.760ARD	10.00	447.97	2 LEFRANC ou NASBERG
SC28.300ARD	10.00	449.75	
SC28.780ARD	10.42	451.08	2 LEFRANC ou NASBERG

Figure 78 : Liste des essais in-situ réalisés en rive droite

#### 7.2.1.1.2 Essais de laboratoire

Les essais de laboratoire réalisés permettent de caractériser la nature des sols rencontrés, leurs paramètres de résistance mécanique, leur déformabilité et leurs conditions de mise en place sur chantier.

Les essais réalisés au laboratoire sont listés ci-dessous, et les résultats de ces essais sont donnés dans la synthèse des reconnaissances ci-dessous. Au global, les essais réalisés sont les suivants :

- 36 Analyses GTR comprenant : teneurs en eau (NFP 94-050), essais au bleu de méthylène (NFP 94-068),
- Et analyses granulométriques (NFP 94-056),
- 13 Analyses sédimentométriques (NFP 94-057)

- 33 Analyses de densité (NFP 94-093)
- 8 Essais de cisaillement à la boîte de Casagrande (NFP 94-071-1), boîte de 50 mm\*50 mm
- 7 Essais de cisaillement à la grande boîte, boîte de 500 mm\*500 mm
- 14 Mesures de l'Indice Portant Immédiat (IPI) (NFP 94-078) – en remplacement des essais Proctor (ces derniers étant impossibles compte tenu de la classe de sol et / ou par manque de matériaux)
- 3 Essais Proctor (NFP 94-093 et NFP 94-078)
- 14 Analyses de pollution ISDI
- 1 Essai œdométrique sur échantillon intact (NFP 94-090-1)

## 7.2.1.2 Synthèse des reconnaissances - Profil géotechnique

### 7.2.1.2.1 Essais in-situ

#### 7.2.1.2.1.1 Nature des sol rencontrés

La variété et la multitude des sondages sur place permettent d'accéder à la nature des sols constituant les digues et les berges de l'Arve sur ces deux rives, ainsi que celle en profondeur (fondations).

Les sondages carottés, qui permettent d'avoir un visuel direct sur les sols rencontrés, montrent que ces sols sont « homogènes dans leur hétérogénéité ». En effet, comme l'illustre, à titre d'exemple, les coupes ci-dessous, on note une succession de couches d'épaisseur variable et de natures relativement différentes.

En analysant les carottes sur toute leur hauteur, et en se basant sur les sondages à la pelle mécanique, on note à l'échelle macroscopique, la superposition de deux couches principales : la couche supérieure dont le sol est constitué d'éléments de sable fin parfois silteux (limoneux) et contenant des sables et graviers à des proportions variables, ces sols peuvent être des sols en place et des remblais mis en œuvre lors des différentes période de construction ou de renforcement des berges de l'Arve. En fonction des sondages, l'épaisseur de cette couche varie de 1 à 4-5m. Au-dessous de cette couche, se distingue une couche de sol constitué d'éléments plutôt grossiers (sable grossier et graviers) à cailloux, galets et blocs, avec parfois des éléments fins.

En synthèse, on retiendra que la couche supérieure est constituée d'éléments fins à grossiers, et la couche inférieure est constituée d'éléments grossiers à fins. Il n'y a donc pas de distinction franche et un changement net de nature de sol sur la hauteur des forages. C'est ce que confirme les caractéristiques mécaniques obtenus des essais de cisaillement.

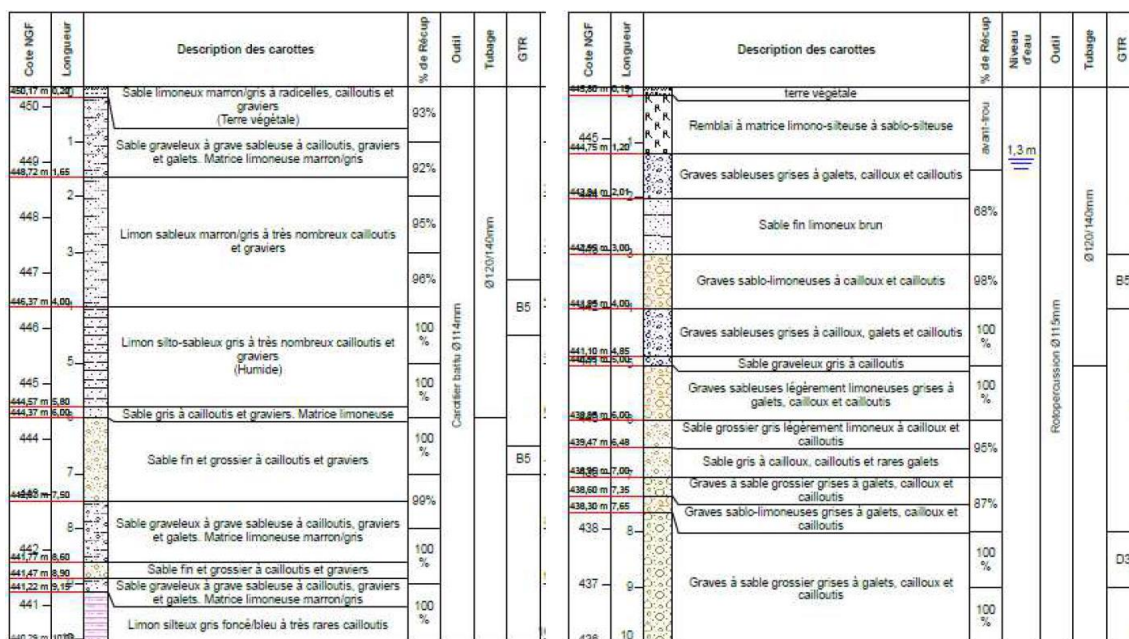


Figure 79 : Description des carottes : SC28.540 ARG (à gauche) et SC.25.990RD à droite

### 7.2.1.2.1.2 Essais pressiométriques

Les essais pressiométriques ont été réalisés dans les secteurs où il a été envisagé, au moment du lancement de la campagne de reconnaissance géotechnique, la mise en place de rideaux de palplanches pour soutenir les talus en cas d'affouillement en pied de berge (côté Arve).

Les résultats de ces essais sont synthétisés dans le Tableau ci-dessous.

En analysant les valeurs de EM et PI, on note que les valeurs de frange supérieure sont relativement plus faibles que celles de franges inférieures. La partie supérieure s'apparente à des remblais ou des sols de type sable/limon/silt. La partie inférieure s'apparente plus à des sols grossiers (sablo-graveleux).

Le rapport EM/PI est de l'ordre de 10 pour les différentes profondeurs investiguées, ce qui rend compte d'un état de compacité relativement homogène.

Tronçon	Sondage (s)	Z tête sondage	Profondeur	Lithologie	Limite Inf.	Épaisseur	EM	PI	EM/PI
<b>Rive droite</b>									
T07	PM26490	446.3	27	Remblai graveleux limoneux à blocs/ et sable gravier à blocs lgt limono-sableux	440.7	5.6	8.15	0.6	13.4
				Sable fin silteux gris à graviers et galets	435.1	5.6	16.5	2	8.25
				Sable silt gris /noir à cailloutis	426.3	8.8	15.5	0.8	19.2
				Silt gris noir	419.3	7	12.3	0.9	14
T05	PM26600	446.8	21	Remblai graveleux limoneux à blocs	442.4	4.4	7.7	0.63	12
				Sable, gravier et silt marron gris	439.4	3	40	2	20
				Silt gris	428.5	10.9	16	1.2	13.3
					425.8	2.7	2	0.2	10
T04	PM27860	448	12	Remblai graveleux à blocs	444.5	3.5	10	1	10
				Sable graveleux gris	436	8.5	40	4	10
T04	PM28100	448.5	12	Remblai graveleux légèrement sableux limoneux	444.3	4.2	5	0.5	10
				Grave légèrement sableuse limoneuse grise	436.5	7.8	25	2.5	10
T02	PM28680	449.8	10.1	Remblai sablo-graveleux à blocs	444.1	5.7	6	0.5	≈10
				Sable graveleux	439.7	4.4	40	4	10

Figure 80 : Résultats des essais pressiométriques

### 7.2.1.2.1.3 Essais de perméabilité

Les résultats des essais de perméabilité réalisés in-situ sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Sondage	Profondeur	Lithologie	k (m/s)
SC25.990 ARD	2-3	Sable fin limoneux brun	6.00E-07
SC25.990 ARD	5-6	Grave sableuse	3.00E-05
SC26.720 ARD	3-4	Grave sableuse	1.00E-05
SC26.720 ARD	6-7	Grave sableuse	1.00E-06
SC27.760 ARD	2-3	Sable graveleux à matrice limoneuse	1.00E-07
SC27.760 ARD	5-6	Limon sablo graveleux	1.00E-05
SC28.780 ARD	3-4	Sable fin silteux	7.00E-07
SC28.780 ARD	4-5	Grave sablo-limoneuse	4.00E-06
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

Figure 81 : Résultats des essais de perméabilité in-situ

Les valeurs de perméabilité mesurées restent inférieures à 10<sup>-5</sup>m/s. Pour rappel, ces essais permettent de mesurer localement la perméabilité à proximité immédiate du forage. Les valeurs mesurées restent donc sensibles à la qualité et au mode de forage et ne rendent pas compte d'éventuelles hétérogénéité qui pourraient exister sur la hauteur du sondage. En se basant sur les valeurs mesurées, on peut dire que les sols sont à dominante fines (sables fins limoneux, sable limoneux au limon sableux) sur la globalité des forages.

#### 7.2.1.2.2 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).

### 7.2.1.2.2.1 Essais d'identification-granulométrie

Les granulométries des sols issus des sondages carottés et des sondages à la pelles mécanique sont données sur les Figure 82 et Figure 83ci-dessous.

Sur la plupart des sondages on note une frange de sols plus fins sur les 2 premiers mètres surmontant des sols plus grossiers en profondeur. Sur certains sondages, bien qu'on se situe sur la couche supérieure, les granulométries relèvent plus un sol grossier (PEL28.750 ARG\_1.70, PEL28.850 bis ARD\_1.70, PEL28.540 ARG\_1.4).

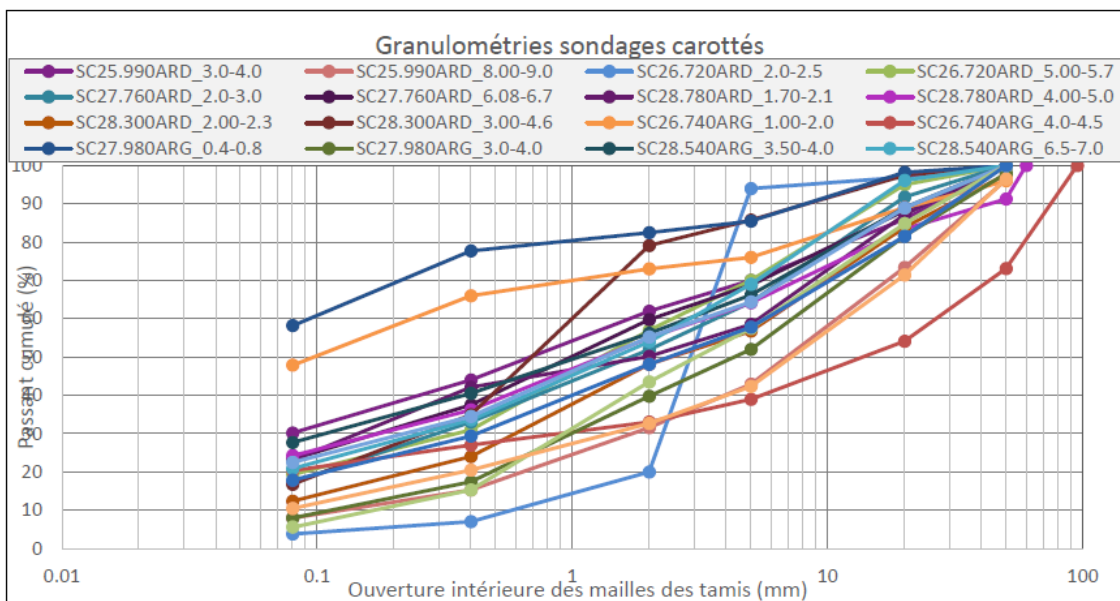


Figure 82 - Courbes granulométriques des échantillons issus des sondages carottés

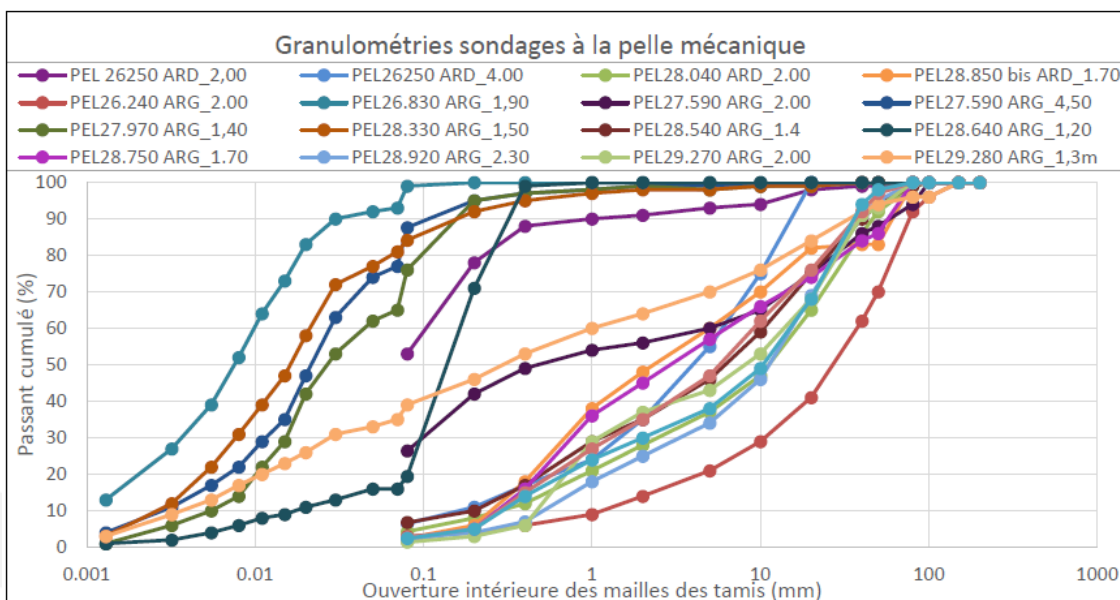


Figure 83 - Courbes granulométriques des échantillons issus des sondages à la pelle mécanique

### 7.2.1.2.2.2 Essais de cisaillement à la boîte

Au total 15 essais de cisaillement ont été réalisés : 5 essais à la grande de boîte 500 mm\*500 mm, désignés par « G » dans la colonne essais du tableau suivant, sur 7 de

prévus, les 2 autres ont été remplacés par des essais à la petite boîte car sols fins désignés par « P/G », et 10 essais à la petite boîte (50 mm\*50 mm), désignés par « P ».

Les essais de cisaillement sont réalisés dans les conditions drainées permanentes d'obtenir les caractéristiques effectives de résistance mécanique ( $c'$  et  $\varphi'$ ).

Les paramètres avec l'indice « p » correspondent aux caractéristiques de résistance au pic de la courbe et les paramètres avec l'indice « r » correspondent aux caractéristiques dites résiduelles.

Les résultats de ces essais sont synthétisés dans le Tableau 9 ci-dessous.

Sur la rive droite, les sols ne présentent pas ou peu de cohésion et l'angle de frottement dépasse les 35°. Pour les études de stabilité au glissement, il a été retenu un angle de frottement de 35° et une cohésion nulle pour tous les tronçons de cette rive, ce qui est conservatif.

#### Nota 1 :

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.

#### Nota 2 :

Pour les tronçons présentant des caractéristiques de résistances supérieures aux caractéristiques moyennes, les calculs de stabilité ont été, tout de même, d'abord menés avec ces caractéristiques moyennes. Si les résultats de calculs montrent que la stabilité n'est pas assurée avec des marges suffisantes, les calculs sont refaits avec les caractéristiques obtenus sur les tronçons concernés.

Tableau 18 - Caractéristiques mécaniques obtenues sur les sols testés sur les boîtes de cisaillement

Tronçon	Sondage	Prof	Nature	Essais	$c'_p$	$c'_r$	$\varphi'_p$	$\varphi'_r$
Aval RD-T9	SC25.990 ARD	8.5	Grave sableuse gris foncé	P	0	0	43.2	40.9
RD-T6	SC26.720 ARD	5.35	Sables limono-argileux à cailloutis et rares cailloux	P	1	1	38.8	38.8
RD-T5	SC27.760 ARD	7	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	P	3	3	35	35
RD-T4	SC28.300 ARD	3.75	Sable limoneux gris à cailloutis et cailloux	P	0	4	39.7	35.8
RD-T1	SC28.780 ARD	2.5	Sable fin gris foncé à cailloutis et cailloux	P			33.7	34.8
RD-T8	Pel26.250	<4.00	Grave roulée sableuse (0/50mm)	G	0	0	39.6	39.6
RD-T4	Pel28.040	<2.50	Grave roulée sableuse (0/50mm)	G	0	0	40	39.9
RD-T1	Pel28.850	<2.00	Grave roulée sableuse (0/80mm)	G	0	0	38	38.3

## 7.2.2 Stabilité au glissement

### 7.2.2.1 Méthodologie

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 (oct. 2015).

Pour cette méthode la stabilité est assurée quand le coefficient de sécurité est supérieur ou égal à 1.

**Tableau 19 - Coefficients partiels et de modèle - ELU stabilité d'ensemble (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 (décru 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 (ou charges d'exploitation) appliquées sur les pistes de circulation en crête sont également celles issues des recommandations CFBR de 2015, à savoir une surcharge de 10 kPa en situation normale (permanente) et une charge d'exploitation correspondant aux poids des engins lors des travaux de confortement ou à des travaux d'urgence en crue, on adopte alors une intensité rare de  $q = 30$  à  $80$  kPa. Il a été retenue une surcharge de 30 kPa et 50 kPa sur les digues de l'Arve. Dans les faits, les pistes de crête des digues de l'Arve ne sont pas soumises à un fort trafic en générale, et elles sont loin de l'être pour les surcharges lourdes. Pendant les travaux, une surcharge de 30 kPa sur la largeur de piste est très représentative. La surcharge de 50 kPa a été simulée pour vérifier la capacité de ces digues. Les charges d'exploitation relèvent alors de la catégorie des situations rares.

Ces charges d'exploitations sont appliquées sur une largeur de 3m dans l'axe de la piste qui fait généralement 4m de largeur sur la globalité des tronçons.

### 7.2.2.2 Profils étudiés

Pour éviter des calculs répétitifs sur des configurations semblables, une première analyse des profils de tous les tronçons a été menée en prenant en compte les paramètres ci-dessous :

- La hauteur des digues (coté amont et coté aval)
- Pente coté amont et coté aval
- Mise en place ou pas de protection en enrochement coté amont
- Talus reprofilé ou talus laissé dans son état actuel (en s'assurant qu'en cas de glissement la digue maintient toujours sa capacité de rétention d'eau)

Une correspondance entre les autres profils représentant des similitudes à partir des critères ci-dessus a été réalisée.

Quand la solution proposée est une reconstruction totale de la digue, les pentes adoptées sur le talus amont sont soit à 2H/1V soit à 2.2H/1V pour les talus les plus hauts. Du côté aval, les digues les plus hautes sont celles du secteur du Bordet T01. Les pentes du talus aval adoptées sur ce secteur sont de 2H/1V.

Les caractéristiques géométriques de tous les tronçons sont synthétisées sur le Tableau 12 pour la rive gauche et le Tableau 13 pour la rive droite.

Les tronçons retenus pour les calculs sont indiqués en bleu sur les deux tableaux précités. Ces tronçons sont choisis en fonction de type de solution retenue tout en s'assurant une représentativité des différentes coupes sur tout le linéaire.

**Tableau 20 - Caractéristiques géométriques des digues/berges de la rive droite**

Tronçon	Talus amont			Talus aval		
	Hauteur Amt/Arve	Pente de talus	Profil calculé	Hauteur aval/TN	Pente aval	Profil calculé
RD-T1	6.85	2/1	RD-T2	1.52	2/1	RG-T5
RD-T2	7.1	2/1	RD-T2	1.72	mur	so
RD-T3	2.4	2/1	RD-T2	1.4	Talus adouci	so
RD-T4	<=4.5m	Palplanche 3*h	So	1.65	Talus adouci	so
RD-T5	5.9	2/1	RD-T7	1.5	2/1	RG-T5
RD-T6	8.7	Glissement toléré: jusqu'à 6m du bord	RD-T6	2	2/1	RG-T5
RD-T7	8.1	2.2/1	RD-T7	1.5	2/1	RG-T5
RD-T8	6	2.2/1 + muret pour élargir la piste ?	RD-T7	-	-	so
RD-T9	6.7	2.2/1	RD-T7	-	-	so

### 7.2.2.3 Caractéristiques géotechniques retenues

Comme indiqué plus haut, les calculs sont d'abord réalisés avec les caractéristiques moyennes, soit une cohésion nulle et un angle de frottement de 35°. En fonction des résultats obtenus et pour certains tronçons présentant de faibles angles de frottement par rapport à la moyenne des vérifications de ont été menées sur les tronçons présentant des caractéristiques moindres. On retient donc les caractéristiques suivantes :

- Pour le tronçon RD-T2, le calcul avec  $\varphi' = 35^\circ$  et  $c'=0$  donne un coefficient de sécurité de 0.97 dans le cas de niveau d'eau bas (Q\_module) pour un coefficient de sécurité requis de 1. Un deuxième calcul a été mené avec  $\varphi' = 36^\circ$  et  $c' = 0$  en fondation (berge) (pour 38° mesuré) et un corps de digues avec  $\varphi' = 33^\circ$  et  $c' = 3$  kPa
- Tous les autres tronçons :  $\varphi' = 35^\circ$  et  $c' = 0$
- 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/m<sup>3</sup> pour les sols de berge et 20 kN/m<sup>3</sup> 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 21 - 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 <sup>1</sup> 28725	RD-T6 26600	RD-T7 26510	RG-T4 28525	RG-T5 28125	RG-T5 <sup>2</sup> 28125	RG-T9 27305	RG-T10 27260	RG-T11 27110	RG-T14 26910	RG-T15 26825	RG-T15 <sup>2</sup> 26825	RG-T17 26825	RG-T18 26510	RG-T5 28125	RG-T5 <sup>2</sup> 28125	
Niveaux Arves / surcharges																		
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

### 7.2.2.4 Lignes de saturation

Trois niveaux d'eau dans l'Arve sont considérés pour les calculs :

- Situation normale : niveau module qui correspond au niveau bas calculé. S'agissant de l'étude de la stabilité de talus côté Arve, cette situation est la plus critique. En crue, l'eau apporte une certaine pression sur le talus qui va dans le sens de la sécurité d'autant la marge de sécurité exigée en crue est plus faible étant donné que l'occurrence est plus faible également (coefficients partiels plus faibles) ;
- Niveau en crue : qui correspond au niveau de la crue centennale de l'Arve (Q100)
- Limite de surverse : qui correspond au niveau de la crête de digue. Ce niveau est calé pour avoir une revanche par rapport à la crue centennale de 80 cm en amont du pont de l'Europe (≈PM 27220) et 1m à l'aval ;

Pour le cas de baisse rapide du niveau de l'Arve : il a été supposé une baisse du niveau de l'Arve de 2m, avec deux scénarios : le premier en supposant que le corps de digue reste complètement saturé. Cette hypothèse est très conservatrice, au vu des éléments de conclusions de l'aspect hydrogéologique (§ 5.5). Le deuxième, en tirant un trait droit entre le pied de digue côté aval et le niveau d'eau à Q100 abaissé de 2 m.

Les recommandations CFBR de 2015 préconise d'étudier le cas de vidange rapide uniquement lorsqu'une telle situation est justifiée par l'hydrogramme de crue (diminution rapide de la ligne d'eau). Le limnigramme de crue montre que la décrue se produit de façon plus lente que la phase crue (en moyenne, le temps de décrue est plus élevé de moitié). Les résultats donnés ci-dessous sont à titre indicatif étant donné que les hypothèses prises sont fortement conservatrices. La conception de la digue/berge n'a pas été modifiée lorsque les facteurs de sécurité ne sont pas atteints.

### 7.2.2.5 Résultats et interprétations

Les résultats des calculs de stabilité au glissement sont synthétisés dans le ci-dessous.

Comme indiqué ci-dessus, les calculs sont d'abord réalisés avec les caractéristiques moyennes, puis des vérifications spécifiques ont été menées quand cela est jugé nécessaire.

On note que la stabilité au glissement est assurée pour la globalité des tronçons pour des caractéristiques géotechniques moyennes.

Tableau 22 - Synthèse des calculs de stabilité au glissement (Talus amont)

Conditions de calcul				
Niveaux Arves / surcharges	RD-T2 28725	RD-T2 <sup>1</sup> 28725	RD-T6 26600	RD-T7 26510
Q_module	0.97	1.01	1.04	1.05
Qmodule+10kPa (RN)	0.97	1.01	1.02	1.05
Qmodule+30 kPa (Transitoire)	1.06	1.10	1.12	1.16
Qmodule+50 kPa (Transitoire)	1.01	1.04	1.09	1.11
Q100 (crue)	1.23	1.30	1.23	1.35
Limite de surverse	1.57	1.65	1.53	1.51
Décru rapide (Q100-2m) condition défavorable	0.88	0.93	0.88	0.99
Décru rapide (Q100-2m) condition plus favorable	1.09	1.14	1.00	1.17
Moy. favorable / défavorable	0.99	1.04	0.94	1.08

### 7.2.3 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 :

$D_{50}$  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,
- $\Delta$  : la masse volumique déjaugé des enrochements : la masse volumique apparente (densité de la matière de l'enrochement) est prise à 2,6 t/m<sup>3</sup>, ce qui donne une masse volumique déjaugé ( $\Delta$ ) de 1.6 t/m<sup>3</sup>,
- $k_{t2}$  : le coefficient Isbach : en considérant que l'écoulement est faiblement turbulent, le coefficient Isbach  $k_t^2$  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,
- $\alpha$  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,
- $\varphi$  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/s<sup>2</sup>)

Nous pouvons retrouver les dimensions des enrochements par tronçon dans le

**Tableau 23 - Dimensionnement des enrochements de protection et des épis pour les différents tronçons de l'Arve**

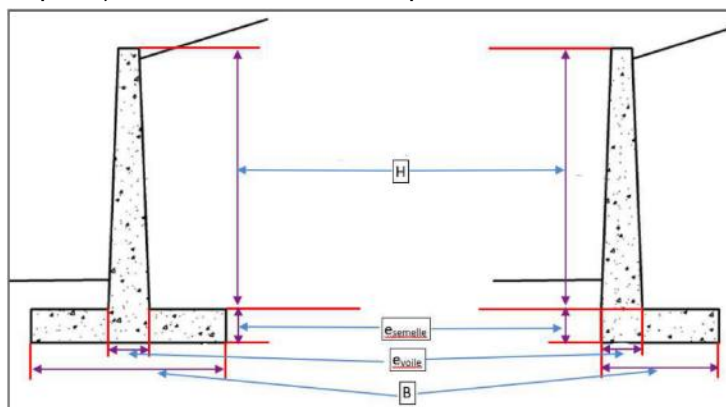
Tronçon	Ouvrages	Repère/ Ponts	Vmax en pied [m/s]	Pente talus amont (H/V)	D_50 pente [m]	M_50 (Cube- sphère) [kg]	Vmax pied +6m [m/s]	D_50 pied [m]	M_50 (Cube- sphère) [kg]	M_50- Maxi [kg]	D_50- Maxi [m]	Classe d'enrochement (NF-EN 13383)	D50/ classe enroch	Épaisseur à 3*D50
RD-T9	Digue des Révées / Lisière du Clos		2.1	2.2	0.2	10.9	3.7	0.4	170.2	170.2	0.4	300/1000	0.68	1.35
RD-T8	Digue des Révées		4.3	2.2	0.7	826.0	5.0	0.8	1115.0	1115.0	0.8	1000/3000	0.99	1.97
RD-T7	Digue des Révées	Pont de la Prison	3.1	2.2	0.4	107.3	4.3	0.6	422.3	422.3	0.6	300/1000	0.68	1.35
RD-T6	Digue du Trésor public	Pont de la Prison	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RD-T5	Digue du Bouchet	Pont SNCF	1.4	2.0	0.1	1.2	1.9	0.1	3.4	3.4	0.1	60/300	0.43	1.28
RD-T4	Digue du Bouchet		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RD-T3	Digue du Bouchet		2.2	2.0	0.2	16.1	3.1	0.3	58.3	58.3	0.3	60/300	0.43	1.28
RD-T2	Digue du Bouchet		2.2	2.0	0.2	17.9	2.9	0.3	39.8	39.8	0.3	60/300	0.43	1.28
RD-T1	Digue du Bouchet	Pont ZI	2.6	2.0	0.3	48.5	3.0	0.3	55.0	55.0	0.3	60/300	0.43	1.28

## 7.2.4 Prédimensionnement des solutions de soutènement

### 7.2.4.1 Murs 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 84 - 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  $e_{voile} = H/12$  ;
- 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 24.

**Tableau 24 - 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)
Droite	T01 – Digue du Bouchet	RD-T2	Mur	28770	28490	2.5	280	Voirie accès usine	1.5	0.21	0.2
Droite	T01 – Digue du Bouchet	RD-T5	Mur	27775	27710	2.5	65	Accès amont pont SNCF	1.5	0.21	0.2
Droite	T02 – Digue du Trésor public	RT-T6	Mur	26750	26580	2.8	170	Érosion tolérée (mur en retrait)	1.68	0.23	0.25
Droite	T01 – Digue des Révées	RD-T7	Mur	26580	26440	2.3	140	Voirie, accès parking ?	1.38	0.20	0.2
Droite	T01 – Digue des Révées	RD-T8	Mur	26440	26125	2,0	315	Voirie	1,2	0,20	0,2

#### 7.2.4.2 Rideau de palplanches auto-stable

Pour rappel, le rideau de palplanche sont projetés dans les secteurs avec un banc boisé (côté Arve) d'au moins 20 m de largeur. Cette largeur est considérée comme importante pour se prémunir d'un affouillement qui peut éroder le banc sur toute sa hauteur pour atteindre la côte du fond de l'Arve. Avec ce critère, seul le tronçon RDT4 est concerné. La hauteur maximale côté Arve en cas d'érosion du banc est de 4.5m.

Le profilé de palplanche retenu est PU 32. Pour simuler une éventuelle fuite à travers le rideau de palplanches, il a été imposé une hauteur d'eau derrière le rideau correspondant à la moitié de la charge d'eau retenue côté Arve, soit 2.25m.

La vérification de la stabilité du rideau de palplanches est réalisée avec le logiciel K-Rea (de la société TERRASOL), qui utilise la méthode des coefficients de réaction à partir des résultats des essais pressiométriques.

Les vérifications sont faites en s'intéressant aux aspects suivants :

- ELS : déplacement tolérée en tête pour assurer la continuité du rideau de palplanche et éviter le déclipsage des palplanches : 3cm.
- ELU : vérification du défaut de butée : la fiche permettant d'éviter un défaut de butée est de  $2 \cdot H$ , ce qui donne une hauteur totale de palplanche de  $3 \cdot H$ , soit 13.5 m,

#### Nota :

Les calculs sont menés par itération en modifiant la hauteur à soutenir jusqu'à avoir un déplacement en tête de 3cm. Par conséquent, seuls les résultats pour une hauteur de 4.5 m sont présentés en annexe de la note de G2 AVP.

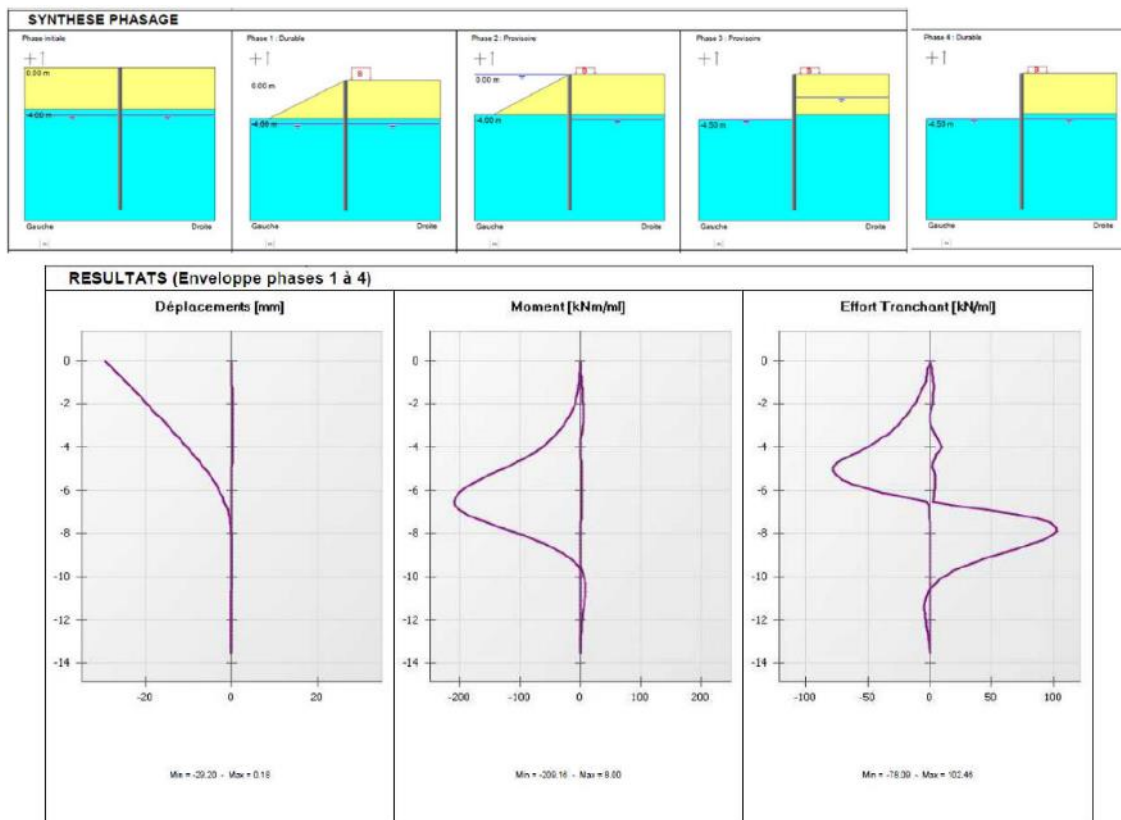


Figure 85 - Phasage de calcul et synthèse des résultats dans le cas d'un affouillement de 4,5m et d'une palplanche dégagée sur tout la hauteur affouillée

La fiche hydraulique n'a pas été vérifiée à ce stade. Hors crue, le niveau de l'Arve est en-dessous du niveau du terrain naturel côté aval, il n'y a donc pas de vérifications à faire.

En crue, le niveau d'eau le plus haut sera toujours du côté de l'Arve et étant donné que le niveau des terres côté aval atteigne la crête, on aura au plus des niveaux d'eau des deux côtés de la palplanche qui s'équilibrent (dans le cas d'une crue qui dure suffisamment pour saturer tout le terrain coté aval). De ce fait, il n'y aura pas de souspressions sous les terrains coté aval qui risqueraient de les déstabiliser.

En supposant l'existence d'infiltrations à travers le rideau de palplanche, et si on suppose qu'en décrue le niveau coté aval reste au-dessus du niveau de l'Arve, on peut s'attendre à des sous-pressions sous le fond de l'Arve, mais cela reste temporaire et transitoire, étant donné que le niveau coté aval baissera au progressivement (pas d'alimentation en continue).

En se référant à la modélisation ci-dessus avec un niveau d'eau côté aval qui montre de la moitié de la charge retenue, soit 2.25m, et étant donné que la fiche est deux fois la hauteur soutenue, soit 9m, le gradient descendant le long de la palplanche est de 0.2 (2.25/9) ce qui reste en-deçà du gradient de la boulangue, proche de l'unité.

Il conviendra tout de même en phase projet de vérifier les conditions d'écoulement le long de la palplanche pour vérifier de manière plus poussée cet aspect.

### 7.2.5 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 25 - 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 <sup>-3</sup>	k= 10 <sup>-4</sup>	k= 10 <sup>-3</sup>	k= 10 <sup>-4</sup>
								V=k*i (m/s)	V=k*i (m/s)	T-perco (L/v) (h)	T-perco (L/v) (h)
RD-T1	2882 5	448.1 5	448.8 7	0.72	8.64	0.08	8.7	8.33E-05	8.33E-06	28.90	289.00
RD-T5	2671 0	444.5 4	445.5 8	1.03	16.1	0.06	16.1	6.40E-05	6.40E-06	70.05	700.49

L'évolution temporelle des niveaux d'eau dans l'Arve en crue pour les profils considérés est illustrée sur la Figure ci-dessous.

On note que globalement, pour les profils considérés, le temps de crue (montée de niveau d'eau) est plus court que le temps de la décrue. Autrement dit, la décrue se fait à une vitesse plus faible que la crue.

Pour chacun des profils considérés, le Tableau 19 synthétise le temps de crue et de la décrue, en s'intéressant à la partie de la digue située au-dessus de niveau de pied aval de la digue. En dessous, il n'y a pas d'exutoire aux infiltrations même si le sol se sature, ce qui est en soit une hypothèse très forte au regard de l'étendue de l'horizon.

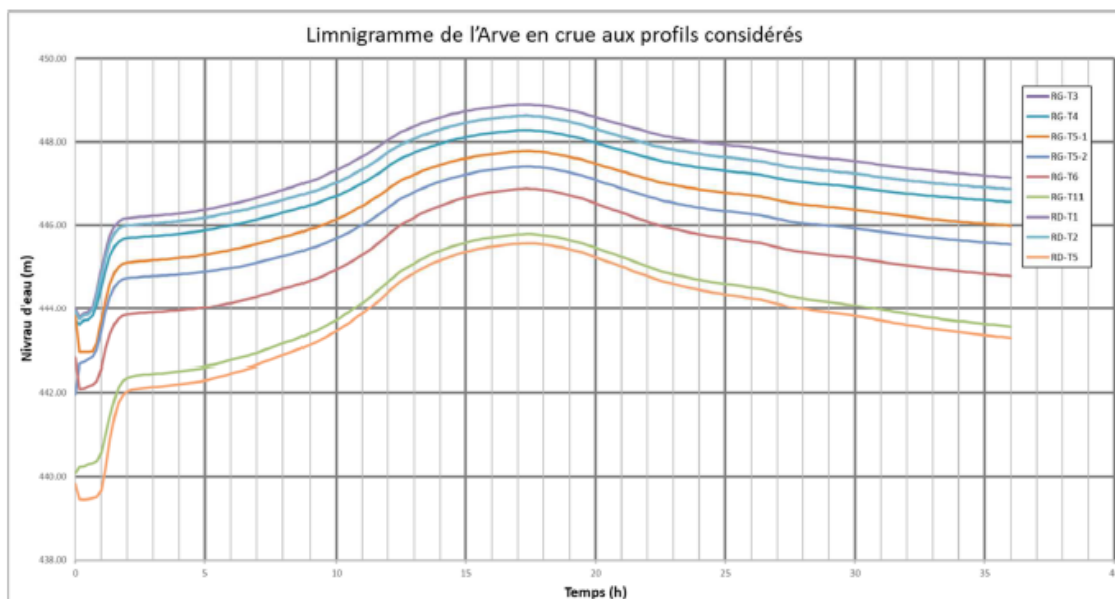


Figure 86 - évolution temporelle des niveaux d'eau dans l'Arve en crue pour les profils considérés

Tableau 26 - 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)
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.

### 7.2.6 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).

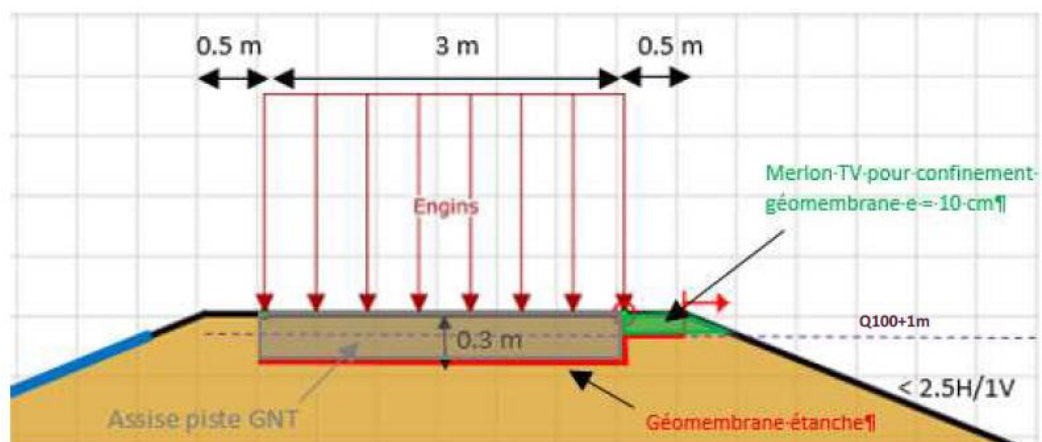


Figure 87 - dispositions constructives au droit des pistes d'exploitation

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 de la G2AVP, 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.

## 7.3 Arve RD – vérification de la tenue des ouvrages

### 7.3.1 Principes généraux

Etant données les conclusions du diagnostic, un avant-projet de confortement des digues 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 définis ; i.e. corps de digue et protection des talus. Les tronçons concernés sont décrits dans la Figure 88 :

Digue	Tronçons homogène	PK-Amont	PK-Aval	Linéaire-(m)	Type d'intervention
T01 – Digue du Bouchet	RD-T1	28.870	28.770	100	Reprise intégrale de la digue
	RD-T2	28.770	28.490	280	Reprise intégrale de la digue (mur-béton)
	RD-T3	28.490	28.340	150	Reprise intégrale de la digue
	RD-T4	28.340	27.775	565	Confortement interne (palplanches)
T02 – Digue du Trésor public	RD-T5	27.775	27.710	65	Reprise intégrale de la digue
	RD-T6	26.750	26.580	170	Confortement par l'aval (mur-béton)
T01 – Digue des Rêvées	RD-T7	26.580	26.440	140	Reprise intégrale de la digue
	RD-T8	26.440	26.125	315	Reprise intégrale de la digue (mur-béton)
T01 – Digue des Rêvées/T01 – Lisière du Clos	RD-T9	26.125	26.060	65	Arasement de la digue existante, confortement de la berge

Figure 88 - Ouvrages concernés par l'étude, et type d'intervention - Arve RD

### 7.3.2 Objectif de protection

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

Tableau 27 : Objectifs de protection du système d'endiguement

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

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

### 7.3.3 Digues en état actuel

Les digues suivantes ne font pas l'objet de travaux :

- RD19
- Le Bouchet T02
- Centre – T01 POSTE
- Centre - T02 JP REY
- La Lisière du Clos (en aval du PK 26.06)

### 7.3.4 Méthode de vérification de la tenue des ouvrages

#### 7.3.4.1 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.

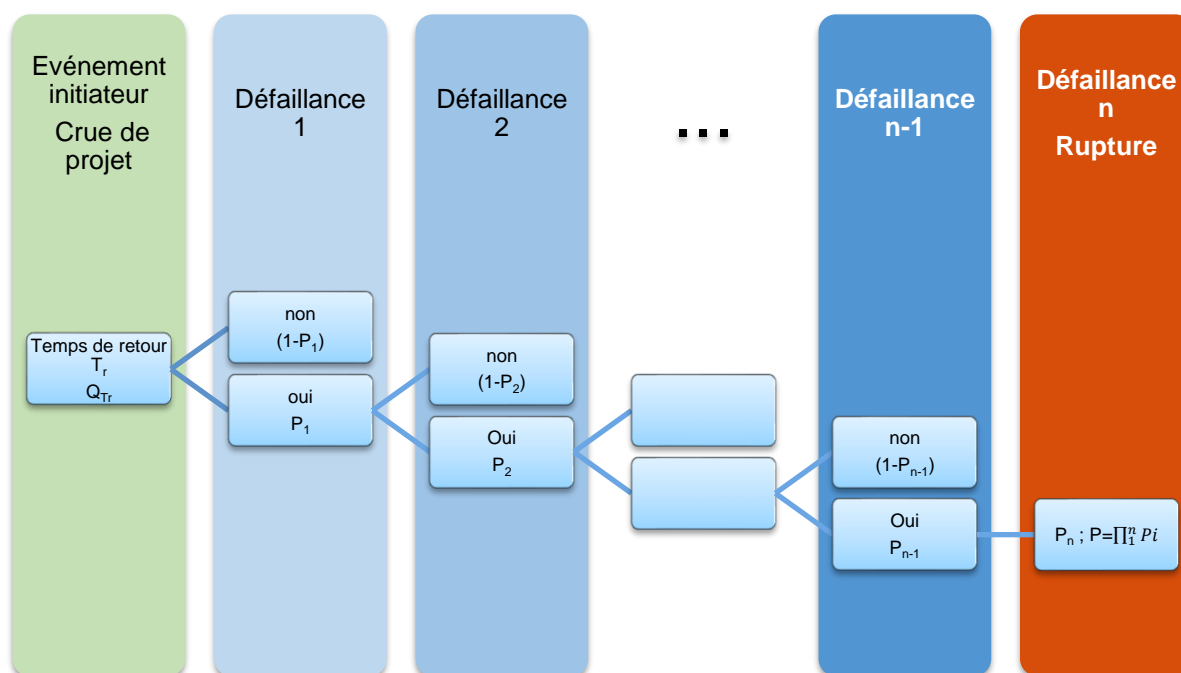


Figure 89 - Arbre type de probabilité

#### 7.3.4.2 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.

#### 7.3.4.3 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 (cf. §7.2.1) 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 [6] 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) [7]. 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) [6] 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 [7] 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) [6]	Gamme de probabilités Reagan et al (1989) [7]
<b>Très improbable</b> En raison de conditions physiques connues ou des procédés qui peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance		0.01	0 - 0,05
<b>Improbable</b> Bien que la possibilité ne puisse être écartée		0.1	0,002 – 0,15
<b>Neutre</b> Avec aucune raison de croire qu'un résultat est plus ou moins probable que l'autre		0.5	0,45 - 0,55
<b>Probable</b> Mais sans être complètement certain		0.9	0,75 - 0,90
<b>Très probable</b> 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 28 - Probabilité conditionnelle proposée par Vick (2002)

Ces probabilités conditionnelles seront affectées directement à chaque élément de chaque scénario de rupture identifié.

### 7.3.5 Caractérisation des probabilités de rupture des digues

#### 7.3.5.1 Calcul de sollicitations hydrauliques

Les sollicitations hydrauliques sont issues des modèles CNR.

### 7.3.5.2 Sensibilité au séisme

Selon les recommandations du groupe de travail barrage et séismes d'octobre 2014, l'étude du cas d'une rupture sous séisme est recommandée compte tenu de la classe de la digue (classe B) et de la zone de sismicité (zone 4 : sismicité modérée, cf. §4.4).

**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	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$
2	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$
3	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$
4	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$
5	$\alpha$	$\beta$	$\beta$	$\beta$

*Tableau 7-28 - Recommandations pour les études graduées - digues*

$\alpha$  : vérification de la conformité aux règles du génie civil  
 $\beta$  : vérification de la stabilité par méthode pseudo-statique

Figure 90 - vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [8])

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 [8])

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 [8])

- Le coefficient d'importance  $\gamma_I$ . 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  $\gamma_I$  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 [8])

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 :

- $\sigma_h = \frac{1}{r} * \gamma_l * \frac{a_{gr}}{g} * S = 0,5 * 1,2 * \frac{1,6}{9,81} * 1,5 = 0,147$
- $\sigma_v = \pm 0,5 * \sigma_h = \pm 0,073$

Afin de vérifier la stabilité au séisme, ces coefficients seront appliqués dans le modèle de stabilité de la digue lors de la phase PRO.

Pour les ouvrages sans travaux, la vérification n'a pas été réalisée lors de l'EDD 2019 mais le protocole de veille et d'intervention post-séisme obligatoire depuis août 2022 permettent d'assurer que lors des épisodes de crue post séisme, les fragilités potentielles auront été traitées ne réduisant pas le niveau de protection.

**Pour les ouvrages projetés les justifications AVP n'ont pas pris en compte le séisme mais, à l'image du projet du Borne, dans le cadre de la G2PRO les justifications de stabilité seront apportées et les matériaux choisis en conséquence.**

### 7.3.5.3 Modes de rupture considérés

Le schéma ci-dessous synthétise tous les modes de rupture considérés dans notre étude :

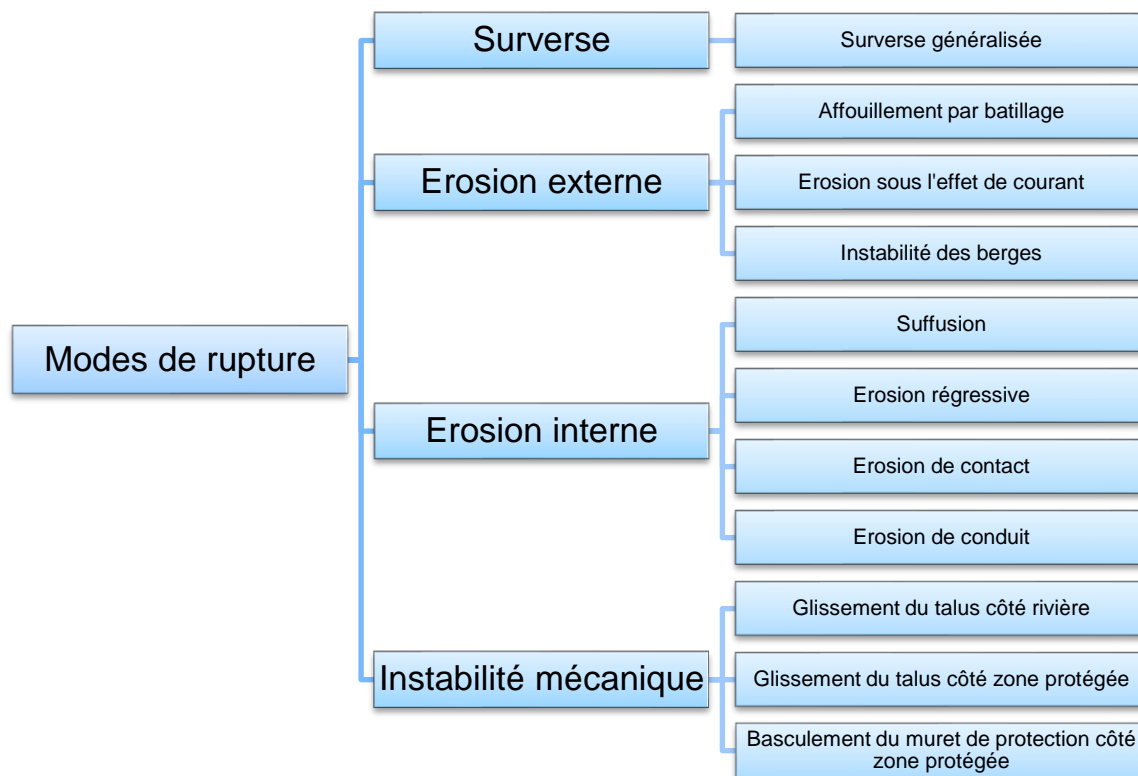


Figure 94 - Modes de rupture considérés

### 7.3.5.4 Rupture par surverse

#### 7.3.5.4.1 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  $Z_{Q_{100}+1}$  m.

#### 7.3.5.4.2 Arbre de défaillance

L'arbre de défaillance suivant est proposé pour la surverse.

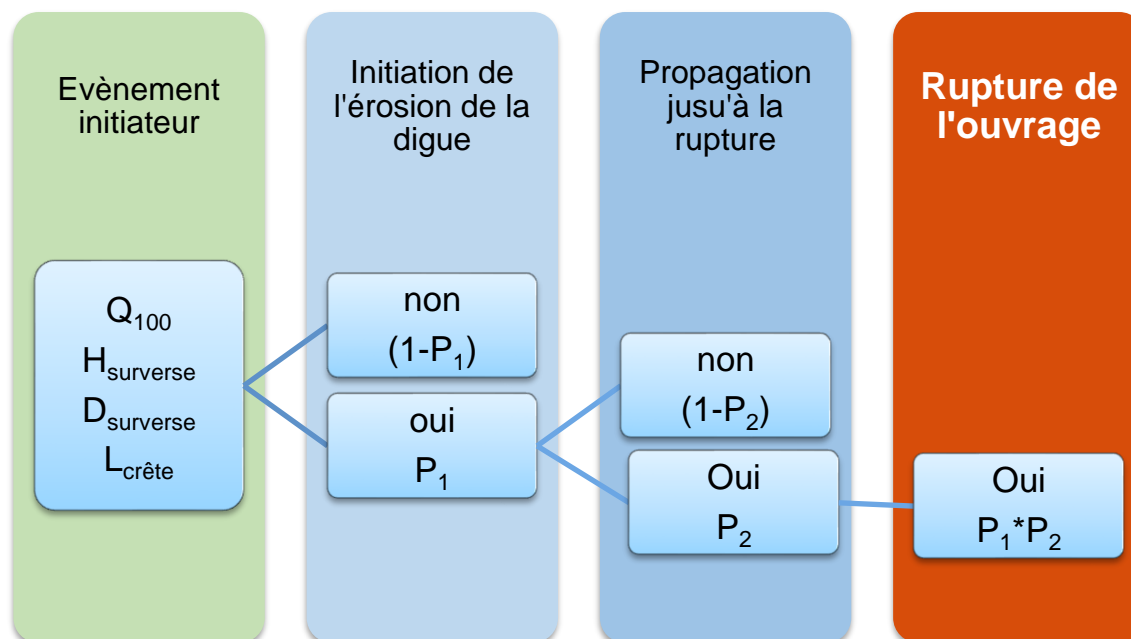


Figure 95 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par surverse

#### 7.3.5.4.3 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 [9] :

- 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 par la revanche.

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 (m<sup>2</sup>/s)

μ Coefficient de débit

H<sub>surverse</sub> : 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 conservatrice 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 [10], 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 définie comme suit :

$$v_b = \left( \frac{\sqrt{\sin \beta}}{n} \right)^{0.6} q_s^{0.4} \quad (8.34)$$

où :

- β = l'angle de la pente côté terre
- q<sub>s</sub> = le débit critique en situation permanente (m<sup>3</sup>/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 [10]**

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 §5.2.

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 :

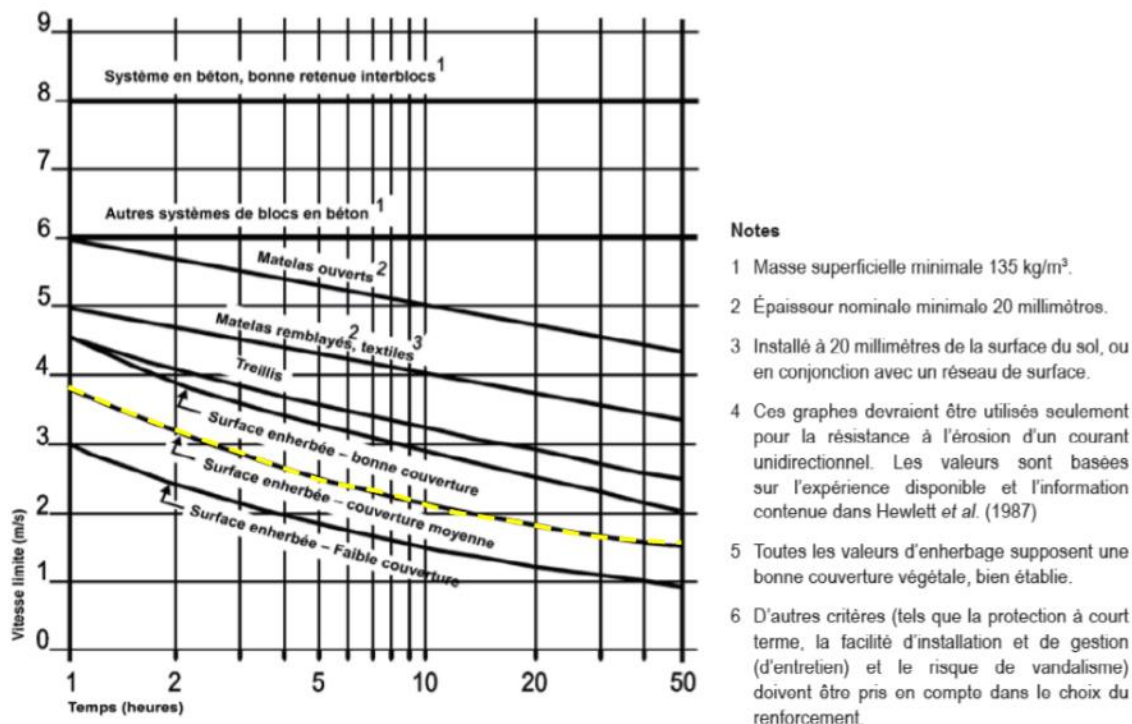


Figure 97 - valeurs limites de dimensionnement de la résistance à l'érosion pour des mesures anti-érosions sélectionnées (source : Hewlett et al. – 1987 [11])

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 : P<sub>2</sub>

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.

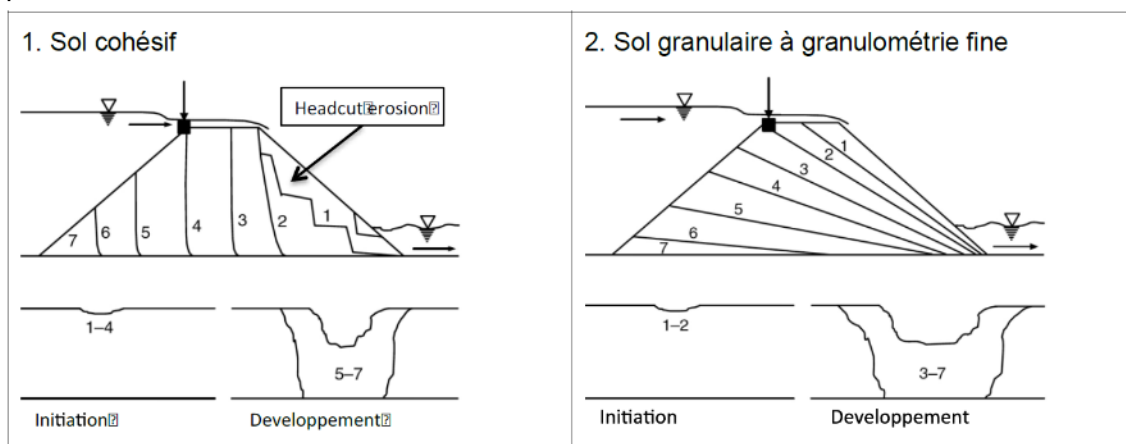


Figure 98 - mécanisme d'érosion par surverse en fonction des matériaux de la digue

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 29 : Grille de probabilités conditionnelles pour la progression de l'érosion par surverse jusqu'à la rupture

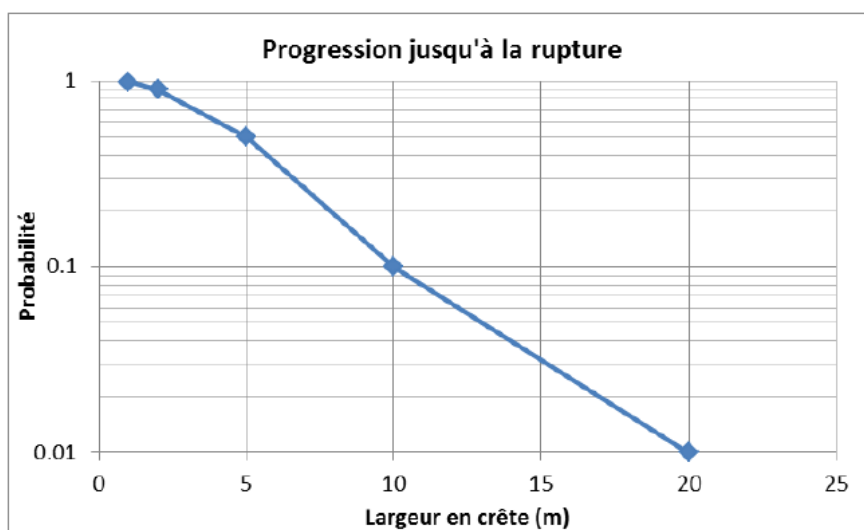


Figure 99 : Largeur en crête et probabilité conditionnelle associée

#### 7.3.5.4.4 Analyse par tronçon

##### Ligne d'eau

La cote de submersion projetée, définie lors de l'AVP, correspond à la cote de  $Z_{Q_{100}}+0,8$  m. Pour une crue de projet  $Q_{100}$ . En amont du pont de l'Europe et de 1m en aval du pont de l'Europe pour les tronçons sur lesquels des travaux sont réalisés.

Sur les tronçons conservés à l'état actuel, l'EDD de CNR nous renseigne sur le fait qu'aucune surverse ne survient pour des occurrences inférieures à  $Q_{200}$  sur le centre T02, et  $Q_{1000}$  pour les autres tronçons.

Il apparaît ainsi qu'aucune zone de submersion n'est présente sur le linéaire en rive droite de l'Arve.

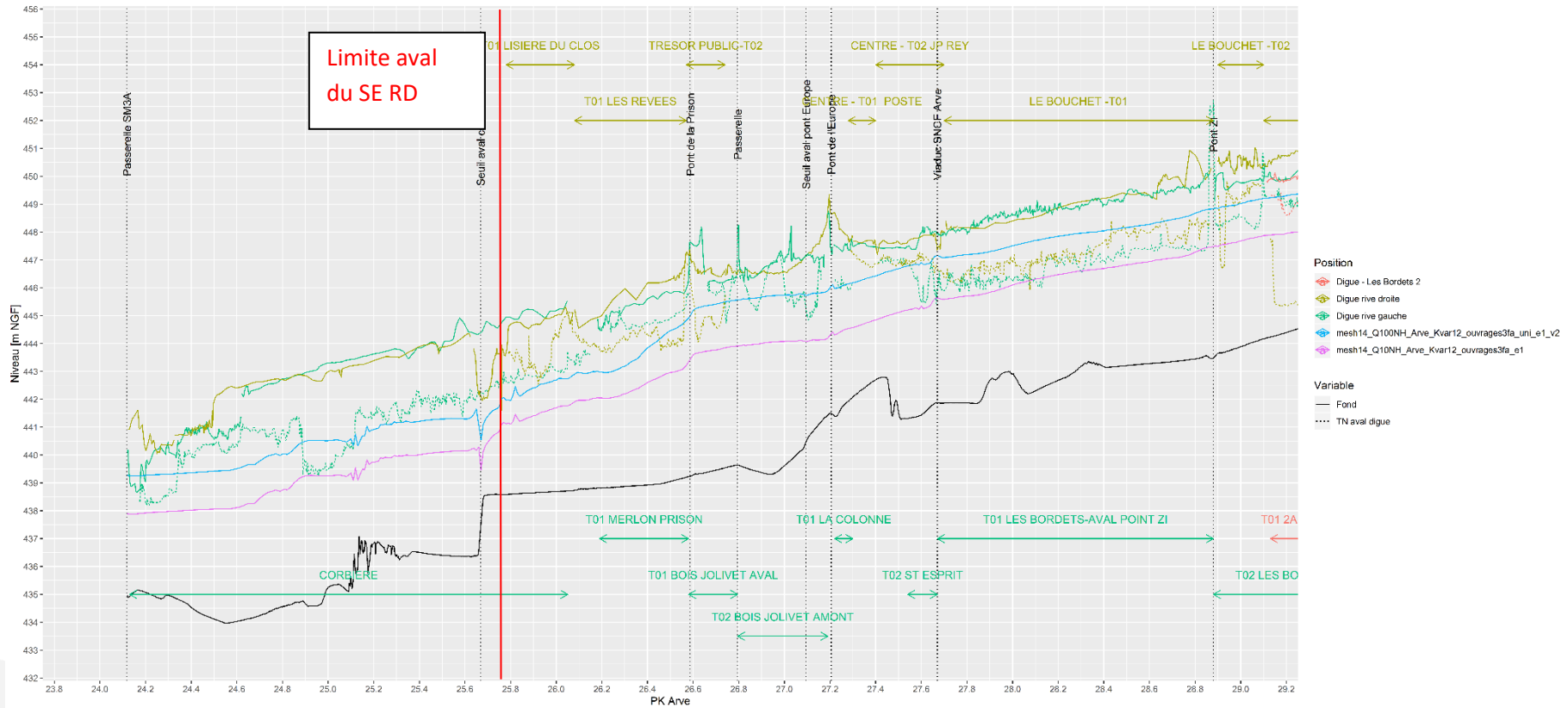


Figure 100 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 1 - état actuel

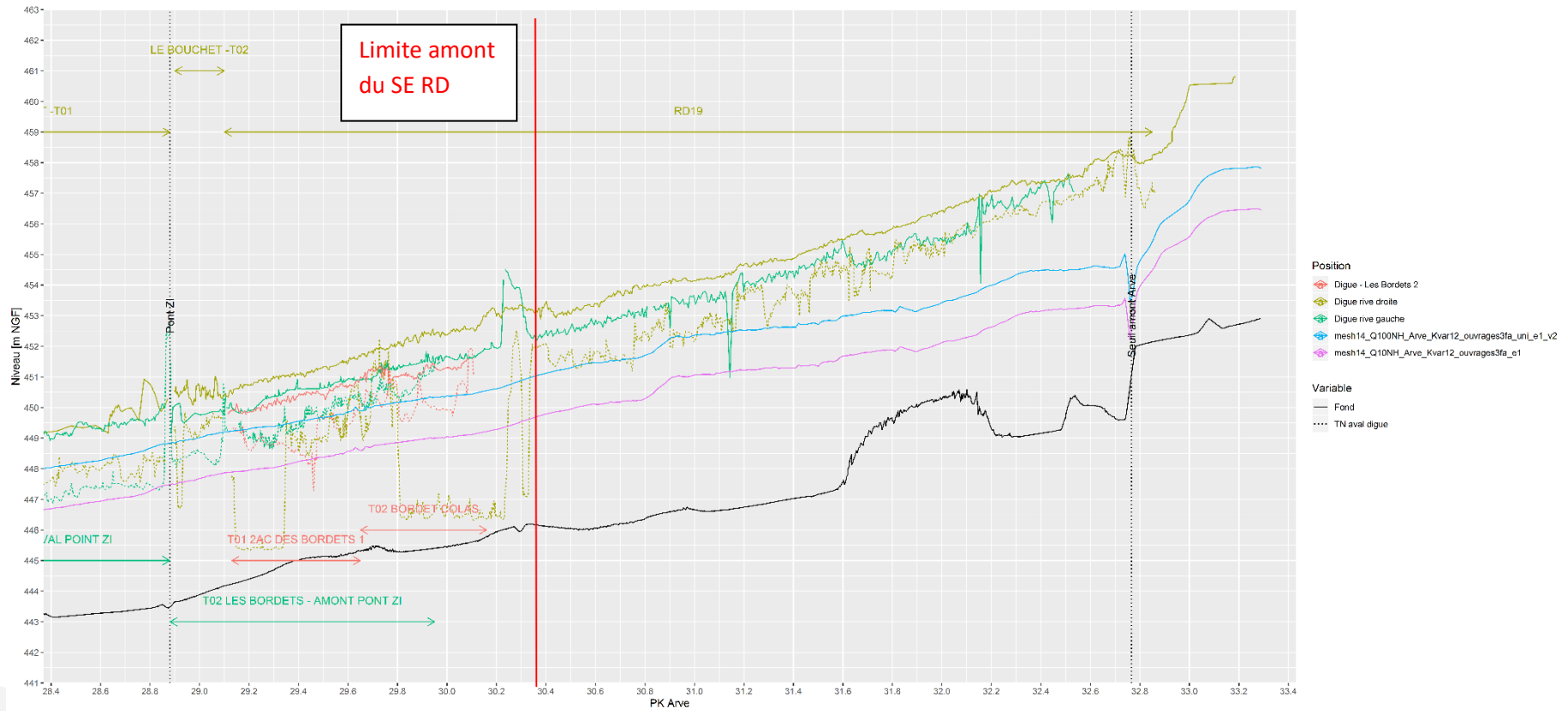


Figure 101 : Profil en long de l'Arve (Source : CNR) – partie 2 – état actuel

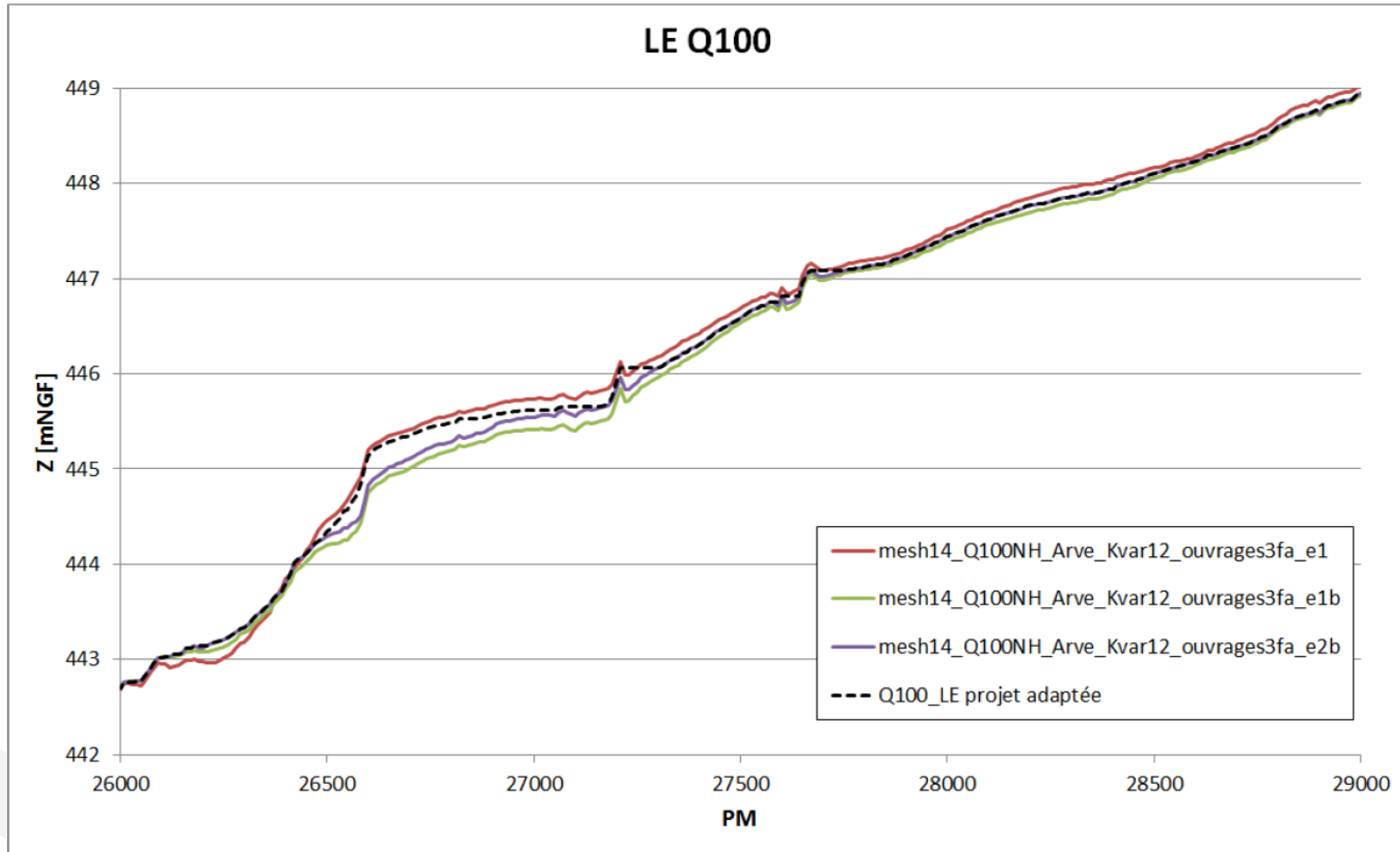


Figure 102 : Profil en long Arve (Source : CNR) – calage des digues projetée (1 m ou 0.8 m au-dessus de la ligne Q100 retenue)

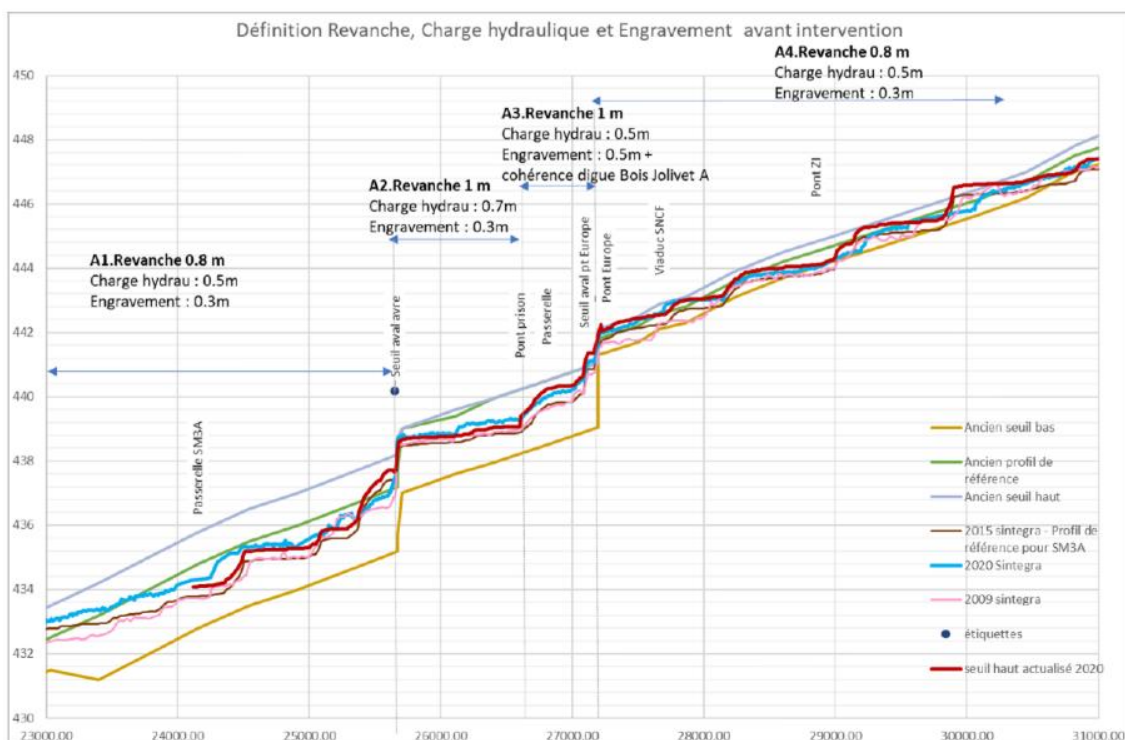


Figure 103 : Profil en long à l'état projet

Le profil en long du tronçon de la RD19 n'est pas modifié, celui-ci reste donc le suivant :

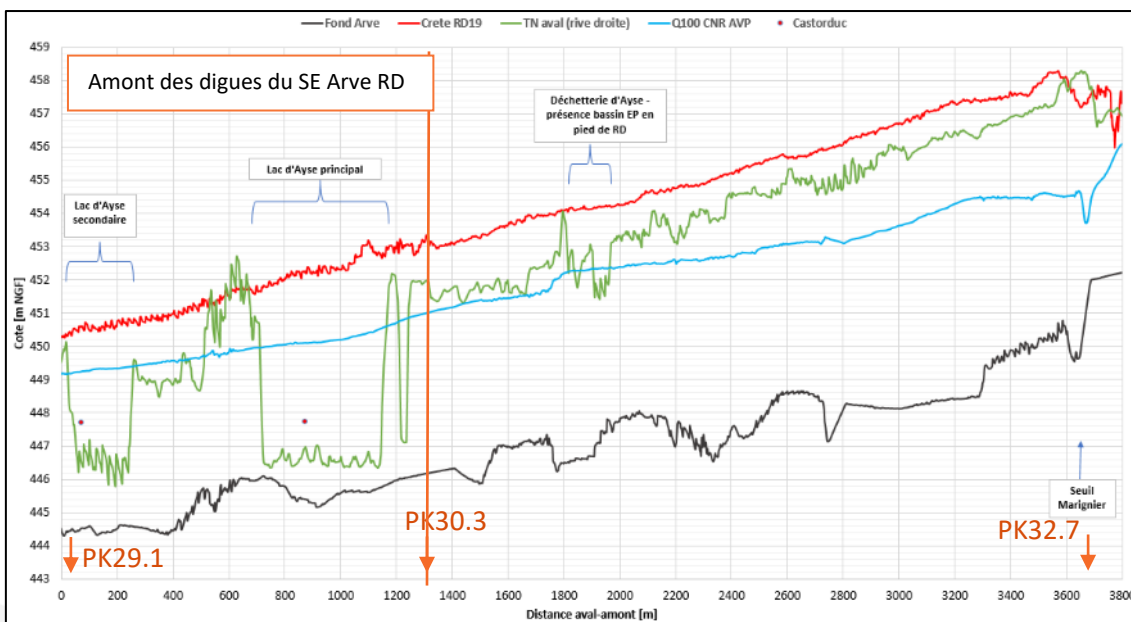


Figure 104 : Profil en long du tronçon de la RD19

On obtient donc dans les cas intermédiaire et final les probabilités suivantes :

Tableau 30 : Probabilité de rupture à la surverse

Tronçon	Occurrence de crue	Revanche [m]	P <sub>1</sub> Final Q100	P <sub>1</sub> Final Q400	P <sub>1</sub> xP <sub>2</sub> Q100	P <sub>1</sub> xP <sub>2</sub> Q400
RD19	Q <sub>100</sub>	>1	0	0	0	0
Bouchet T02*	Q <sub>100</sub>	>1	0	0	0	0
RD-T1	Q <sub>100</sub>	0,8	0	0	0	0
RD-T2	Q <sub>100</sub>	0,8	0	0	0	0
RD-T3	Q <sub>100</sub>	0,8	0	0	0	0
RD-T4	Q <sub>100</sub>	0,8	0	0	0	0
RD-T5	Q <sub>100</sub>	0,8	0	0	0	0
Centre T02 JB Rey	Q <sub>100</sub>	1	0	0	0	0
Centre T01 Poste	Q <sub>100</sub>	>1	0	0	0	0
RD-T6	Q <sub>100</sub>	1	0	0	0	0
RD-T7	Q <sub>100</sub>	1	0	0	0	0
RD-T8	Q <sub>100</sub>	1	0	0	0	0
Lisière des clos	Q <sub>100</sub>	>1	0	0	0	0

\*La digue Bouchet T02 n'est pas mise en charge en Q100 (niveau de protection réglementaire fixé par le SM3A) et présente une largeur en base de plus de 50 m en moyenne. Elle peut être considérée comme terre. Néanmoins, elle est conservée dans le système d'endiguement car elle fait le raccordement entre la RD19 et le pont de la ZI. Les autres phénomènes ne sont pas étudiés sur cet ouvrage car le risque de rupture est nul pour le niveau de protection.

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 ZQ<sub>100</sub>+0,8 m à l'état projet en amont du pont de l'Europe et de ZQ<sub>100</sub>+1 m en aval. Il apparaît ainsi que l'évaluation de la probabilité P2 n'est pas nécessaire pour évaluer la probabilité de rupture par surverse pour le niveau de protection.

### 7.3.5.5 Rupture par instabilité du talus

#### 7.3.5.5.1 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.

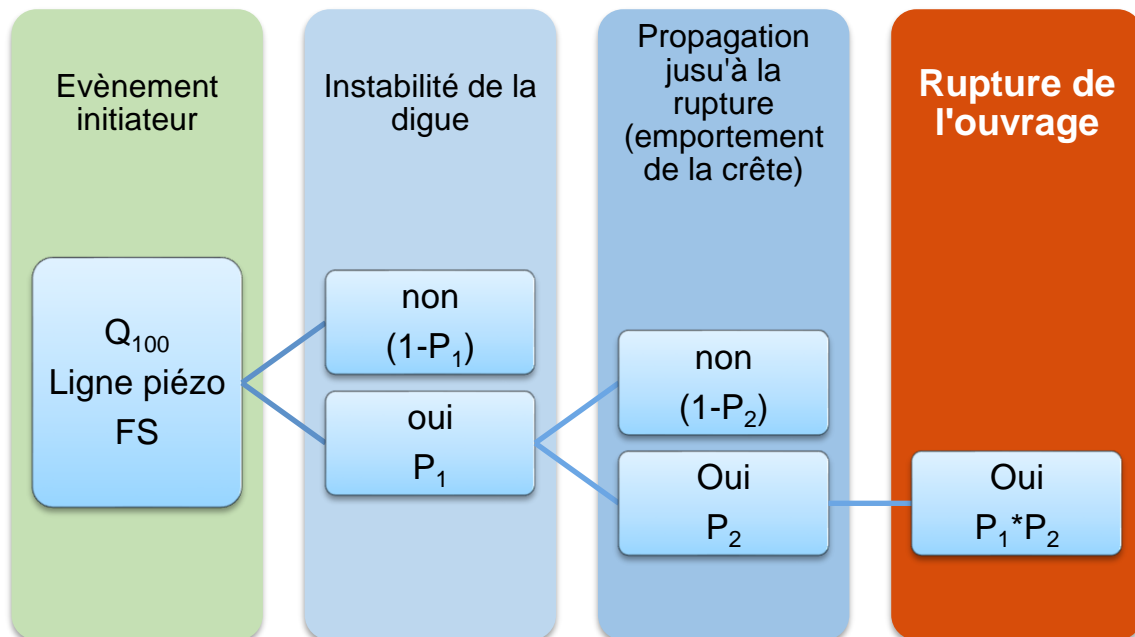


Figure 105 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai)

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 (coté val) et conduire ainsi à la ruine complète de l'ouvrage.

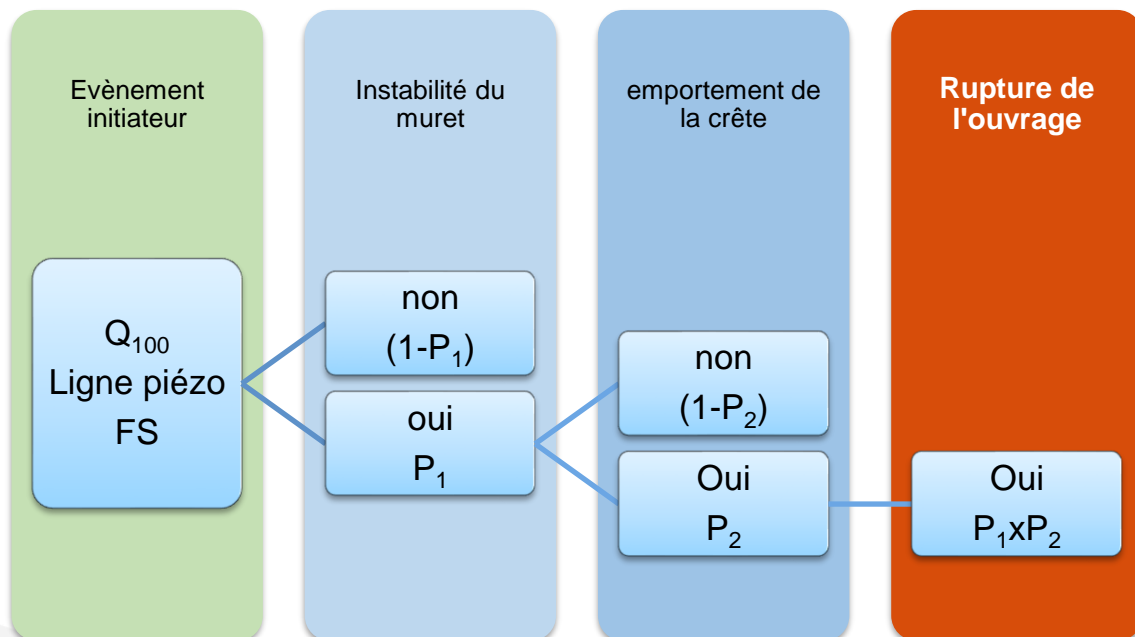


Figure 106 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai)

### 7.3.5.5.2 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 à la 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 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 $\gamma_m$ sur $c'$ et $\tan \phi'$	Coefficient partiel $\gamma_m$ sur le poids volumique	Coefficient de modèle $\gamma_d$
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 107 - Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source: CFBR, 2015 [12])

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
<b>Normale</b>	$F_S=1,50$ (1,25x1,20)	1	$10^{-4}$
<b>Rare de crue</b>	$F_S=1,44$ (1,20x1,20)	$10^{-1}$	$10^{-3}$
<b>Exceptionnelle de crue</b>	$F_S=1,32$ (1,2x1,10)	$10^{-2}$	$10^{-2}$
<b>Extrême de crue</b>	$F_S=1,10$ (1,1x1,00)	$10^{-3}$	$10^{-1}$

**Tableau 31 : 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
<b>Aucune raison de croire qu'un résultat est plus probable qu'un autre</b>	$F_S=1$	0,50	Neutre
<b>Une certaine confiance dans la probabilité d'occurrence mais la probabilité inverse ne peut être écartée</b>	$F_S=0,9$	0,90	Probable
<b>Les conditions physiques connues et/ou les procédés peuvent être décrits et peuvent qualifier l'occurrence avec une entière confiance</b>	$F_S=0,8$	0,99	Très probable

**Tableau 32 : 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 33 - 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).

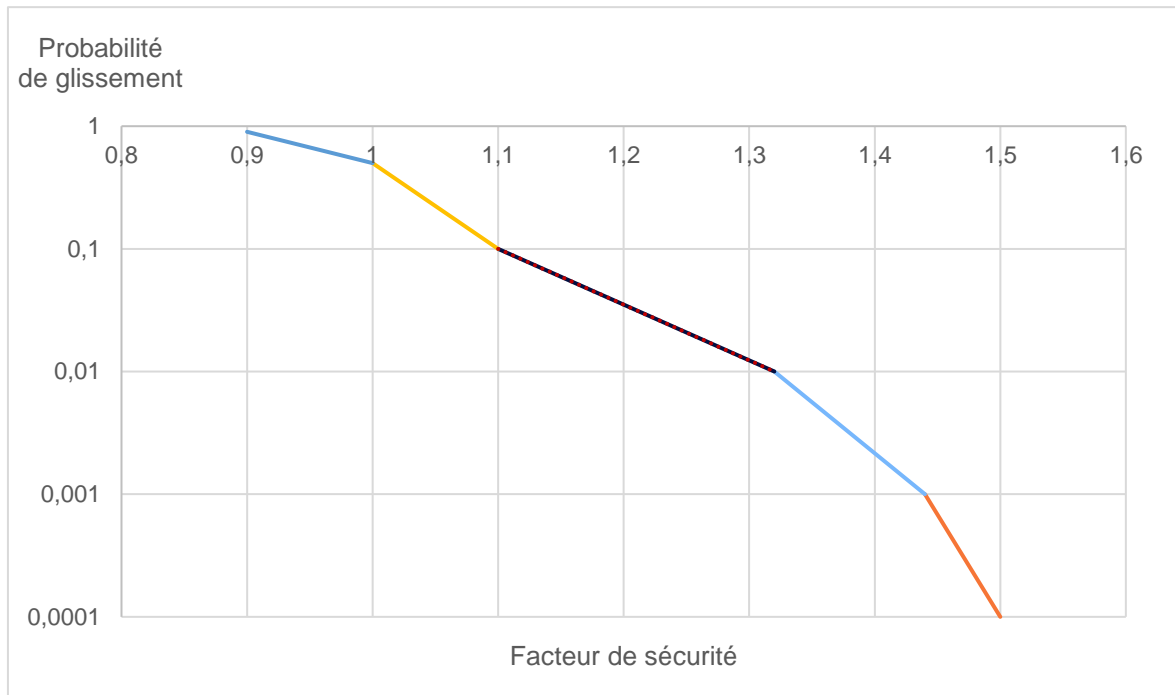
EDF estime qu'au-delà d'un tiers de largeur  $L$  de crête emportée par glissement, la rupture est très probable ( $P=0,99$ ). Pour des cercles moins impactant, un nouvel état d'équilibre est atteint et peut perdurer sans rupture.

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 34 - 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 :



### 7.3.5.5.3 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 ci-dessous. 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 :

Données G2 AVP	Talus amont						Talus aval*		
	RD-T2	RD-T2	RD-T6	RD-T7	RG-T5	RG-T5	RG-T5	RG-T5	
Niveaux Arves/ surcharges	PK	28.725	28.725	26.6	26.51	28.125	28.125	28.125	28.125
Q_module		1.164	1.212	1.248	1.26	1.188	1.212	1.416	1.62
Qmodule+10 kPa RN		1.164	1.212	1.224	1.26	1.176	1.2	1.368	1.548
Qmodule+30 kPa Transitoire		1.272	1.32	1.344	1.392	1.32	1.332	1.392	1.5
Qmodule+50kPa Transitoire		1.212	1.248	1.308	1.332	1.272	1.272	1.26	1.332
<b>Q100 Crue</b>		<b>1.476</b>	<b>1.56</b>	<b>1.476</b>	<b>1.62</b>	<b>1.464</b>	<b>1.584</b>	<b>1.356</b>	<b>1.56</b>
Limite de surverse		1.884	1.98	1.836	1.812	1.272	1.248	1.2	1.392
Décru rapide Q100-2m condition défavorable		1.056	1.116	1.056	1.188	1.08	1.128	-	-
Décru rapide Q100-2m condition plus favorable		1.308	1.368	1.2	1.404	1.344	1.392	-	-
Moy favorable/ défavorable		1.188	1.248	1.128	1.296	1.212	1.26	-	-
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 $\varphi' = 35^\circ$ Corps de digue : $\varphi' = 33^\circ$ et $c' = 3$ kPa

\*Les coefficients de sécurité du parement aval du tronçon RG-T5 correspondent aux coefficients de sécurité des tronçons RD-T1, RD-T5, RD-T6, er RD-T7.

On constate qu'à la limite de la surverse l'ensemble des facteurs de sécurité est supérieur à 1,2, ce qui correspond dans le Tableau 33 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.

L'évaluation de la stabilité des tronçons non présent dans le tableau ci-dessus est évalué en fonction des calculs réalisés comme cas enveloppes :

Tableau 35 - Tronçons calculés pour l'évaluation de la stabilité au glissement

Tronçon	Talus amont			Talus aval		
	Hauteur Amt/Arve	Pente de talus	Profil calculé	Hauteur aval/TN	Pente aval	Profil calculé
RD-T1	6.85	2/1	RD-T2	1.52	2/1	RG-T5
RD-T2	7.1	2/1	RD-T2	1.72	mur	so
RD-T3	2.4	2/1	RD-T2	1.4	Talus adouci	so
RD-T4	<=4.5m	Palplanche 3*h	So	1.65	Talus adouci	so
RD-T5	5.9	2/1	RD-T7	1.5	2/1	RG-T5
RD-T6	8.7	Glissement toléré: jusqu'à 6m du bord	RD-T6	2	2/1	RG-T5
RD-T7	8.1	2.2/1	RD-T7	1.5	2/1	RG-T5
RD-T8	6	2.2/1 + muret pour élargir la piste ?	RD-T7	-	-	so
RD-T9	6.7	2.2/1	RD-T7	-	-	so

Les palplanches et les murs sont décrits au chapitre 5.2, et seront justifiés au stade PRO de l'analyse. Ceux-ci seront justifiés conformément aux normes d'application nationales de l'Eurocode 7 : NF P 94-281 – Murs de soutènement, et NF P 94-261 – Fondations superficielles.

### Synthèse – digues sans travaux

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.

L'analyse des tronçons conservés en état actuel se réfère à l'analyse donnée par la CNR dans l'étude de dangers de 2019 :

	Cours d'eau	Glissement
RD19	Arve RD	Non Testé car très large
LE BOUCHET T02		Talus rivière Instable <i>Hypothèse identique à Bouchet T01</i>
LE BOUCHET T01		Talus rivière Instable et Talus terre sur 1 profil
CENTRE T02 - JBREY		Talus terre non testé Talus rivière globalement stable
CENTRE T01 - POSTE		Non testé car faiblement sollicité
TRESOR PUBLIC T02		Talus rivière instable
TRESOR PUBLIC T01		Talus rivière instable
LA LISIERE DU CLOS		Non testé car charge à Q200

Les talus des tronçons Centre T02 et T01 sont donc considérés comme stables. On considère ainsi une probabilité de glissement inférieure à 5%.

Le tronçon de la lisière des clos n'étant pas mis en charge, nous n'évaluons pas sa stabilité.

Les caractéristiques géotechniques du tronçon RD19 sont peu connues, du aux faibles sondages réalisés sur ce tronçon. Des reconnaissances complémentaires sur ce tronçon permettront de statuer sur la stabilité des parement amont et aval sur ce tronçon. Cependant, la grande largeur de la digue sur ce tronçon permet de considérer que le glissement des talus a une très faible chance de mener à la rupture de la digue. On considère donc que **le risque de glissement à la rupture du tronçon RD19 est très improbable (P2=0,01)**.

Tableau 36 : Probabilité de rupture par instabilité de talus

Tronçon	Facteur de sécurité	P1 (%)	P2 (%)	P1 x P2(%)
RD19		-	1%	<1 %
RD-T1	1,476	0,02 %	50 %	~0 %
RD-T2	1,476	0,02 %	50 %	~0 %
RD-T3	1,476	0,02 %	50 %	<1 %
RD-T4	-	-	-	~0 %
RD-T5	1,476	0,02 %	50 %	~0 %
Centre T02 JB Rey	-	<5%	50 %	<5%
Centre T01 Poste	-	<5%	50 %	<5%
RD-T6	1,644	0 %	50 %	~0 %
RD-T7	1,644	0 %	50 %	~0 %
RD-T8	1,632	0 %	50 %	~0 %
Lisière des clos	Sans-objet	Sans-objet	Sans-objet	Sans-objet

#### 7.3.5.6 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

#### 7.3.5.6.1 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.

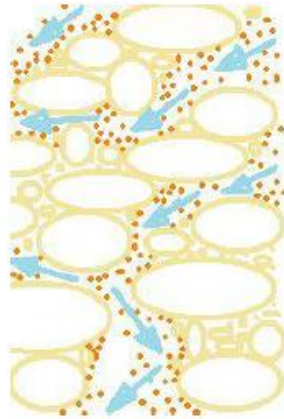


Figure 108 - schéma du phénomène de suffusion

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  $\mu\text{m}$ ) supérieur à 10%,
- Soit un pourcentage de fines (passant à 80  $\mu\text{m}$ ) 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 7.2 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 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 rive droite :

Tableau 37 - Synthèse de l'analyse à l'érosion interne de l'EDD CNR 2019

Digue	Suffusion	Contact	Conduit	Erosion régressive		Claquage	Conclulsion		
				Surface	Conduit	Hydraulique			
RD19	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé		
Bouchet T02									
Bouchet T01	Stable	Non Testé	Instable (très boisée)	Stable	Stable	Stable	Instable		
Centre T02 JB Rey	Stable	Stable	Instabilité potentielle				Stable	Stable	Instabilité potentielle Conduit
Centre T01 Poste	Stable	Stable							
Tresor Public T02	Non Testé	Non Testé							
Trésor Public T01	Stable	Non Testé							
Lisère du Clos	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé	Non Testé		

En état intermédiaire (avant travaux), les tronçons Centre T02, T01, et RD-T6 à RD-T9 ne sont donc pas sensibles à la suffusion.

#### 7.3.5.6.2 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.

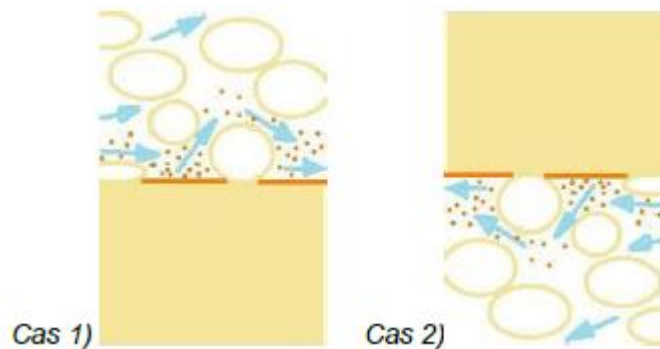


Figure 109 - Schéma du phénomène d'érosion de contact

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.**

### 7.3.5.6.3 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 :

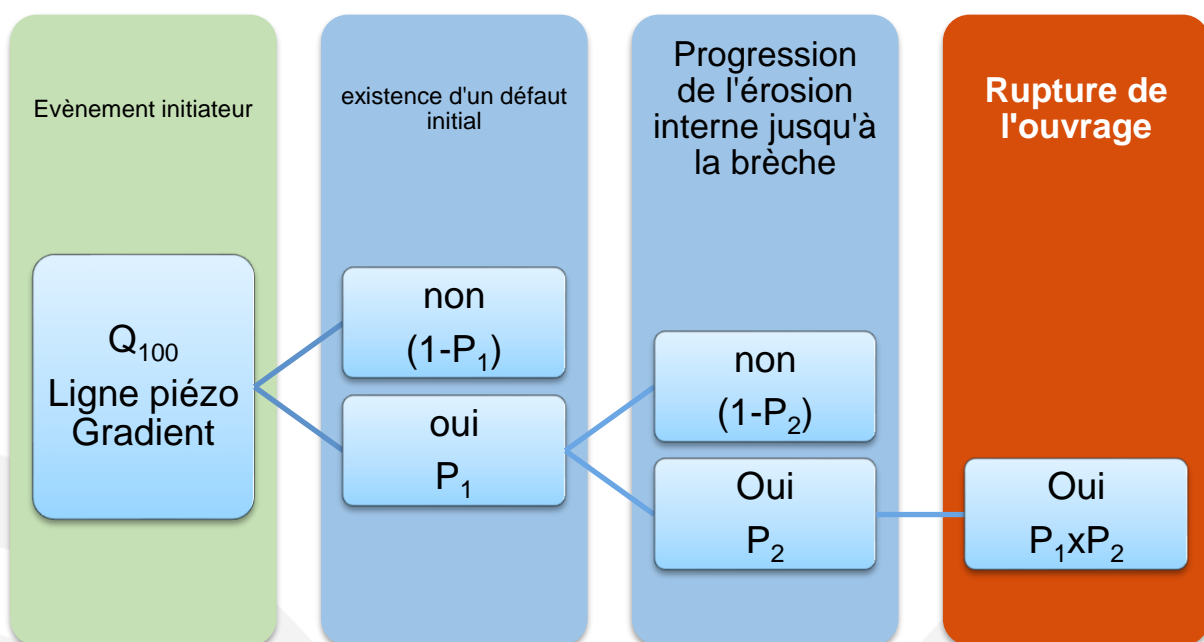


Figure 110 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit

### 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.

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.

Sur le tronçon RD19, la faible connaissance du corps du tronçon, la présence de végétation, et la présence d'ouvrage traversant nous emmène à considérer la présence d'un conduit initial sur ce tronçon comme probable (P=0,9).

Pour les tronçons présentant des travaux projetés, la probabilité de présence d'un conduit initial est considérée comme très improbable (P=0,01). On considère donc que le risque d'érosion de conduit à l'état projet sera écarté dans la suite de notre analyse.

Pour les tronçons Centre T01 et Centre T02, la lithologie du corps de digue, et l'absence d'ouvrage traversant, emmènent à considérer une probabilité de conduit initial de 0,01.

	Types de matériaux du corps de digue	Présence d'une coupure étanche	Présence d'arbres	Présence de fouisseurs	Présence d'une interface entre couches	Présence d'un ouvrage traversant le remblai	Probabilité de présence d'un conduit (Vick, 2002)
<b>RD19</b>	Non connu	Non	Oui	Pas d'information		Oui	Probable : 0,9
<b>RD-T1</b>	Actuel : Grave sablo limoneuse grise C1B5	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fouisseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très Improbable : 0,01
<b>RD-T2</b>	Actuel : Grave sablo limoneuse grise C1B5	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fouisseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très Improbable : 0,01
<b>RD-T3</b>	Actuel : Limon gravelo sableux B5	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fouisseurs	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)
<b>RD-T4</b>	Actuel : Graves sableuses gris foncé D3	Oui, palplanches	Oui	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très Improbable : 0,01
<b>RD-T5</b>	Actuel : Limon gravelo sableux B5	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très Improbable : 0,01
<b>Centre T02 JB Rey</b>	Sable graveleux roulé	Non	Oui	Non	Matériaux relativement homogènes	Non	Improbable : 0,1
<b>Centre T01 Poste</b>	Sable graveleux roulé	Non	Oui	Non	Matériaux relativement homogènes	Non	Improbable : 0,1
<b>RD-T6</b>	Actuel : Limon gravelo sableux B5	Oui, mur en T	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très Improbable : 0,01
<b>RD-T7</b>	Actuel : sables marrons à cailloutis	Non	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très Improbable : 0,01
<b>RD-T8</b>	Actuel : sables fins à silteux à cailloux et cailloutis C1A1th	Oui	Non	Etat projet : non Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très Improbable : 0,01
<b>RD-T9</b>	Tronçon au TN aval	Non	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	-
<b>Lisière des clos</b>	Actuel ; Sable limono graveleux, passage blocailleux C1B5	Non	Non	Grillage anti-fousseurs	Matériaux relativement homogènes	Non	Très improbable 0,01

Figure 111 - Synthèse des facteurs aggravants vis à vis de l'érosion de conduit

### Progression de l'érosion jusqu'à la brèche (P2)

Sur les tronçons RD-T2, RD-T4, RD-T6 et RD-T8, la mise en place d'un muret étanche ou de palplanches sur le parement amont ou dans le corps de digue 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 de la RD19, les éléments géotechniques ne permettent pas de qualifier l'érosion de conduit le long de racines ou de terriers ni de contact le long des castorduc (présence éventuelle d'écran anti-renard sur l'ouvrage, grande longueur) mais il est peu probable que si elle s'initie, elle amène à une rupture compte tenu des cinétiques de crue, il est probable qu'elle n'amène pas à la rupture de l'ouvrage, des éléments complémentaires doivent être engagés pour confirmer l'absence de risque.

Pour les tronçons RD-T1 à RD-T3, RD-T5, et RD-T7, et les tronçons centre T01 et T02 le risque de progression de l'érosion jusqu'à la brèche est plus probable car le développement de conduits est possible entre l'amont et l'aval. Cependant les matériaux composants les digues sont peu cohésifs et limitent le développement d'érosion de conduit. La progression est donc jugée comme **improbable (P=0,1)**.

### 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 Q<sub>100</sub>

Tronçon	P1	P2	P1xP2 (%) Final
RD 19	0,9	ND	ND
RD-T1	0,01	0,1	0,1 %
RD-T2	0,01	0,01	0,01 %
RD-T3	0,01	0,1	0,1 %
RD-T4	0,01	0,01	0,01 %
RD-T5	0,01	0,1	0,1 %
Centre T02 JB Rey	0,1	0,1	1 %
Centre T01 Poste	0,1	0,1	1 %
RD-T6	0,01	0,01	0,01 %
RD-T7	0,01	0,1	0,1 %
RD-T8	0,01	0,01	0,01%
Lisière des clos	0,01	0,01	0,01%

Figure 112 - Probabilités de défaillance par érosion de conduit des tronçons

#### 7.3.5.6.4 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).

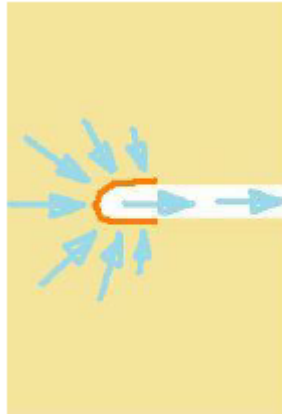


Figure 113 - Schéma du phénomène d'érosion régressive

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.

**On peut donc considérer que l'initiation de l'érosion régressive sur l'ensemble des tronçons à l'état projet est nulle ( $P=0$ ) à la Q100. On peut également considérer que cette probabilité est nulle pour les tronçons conservés à l'état actuel (JB Rey Poste, et Lisière du clos)**

#### 7.3.5.7 Rupture par érosion externe

##### 7.3.5.7.1 Mécanisme d'érosion externe

Les différents mécanismes d'érosion externe sont présentés ci-dessous

##### Affouillement par batillage

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.**

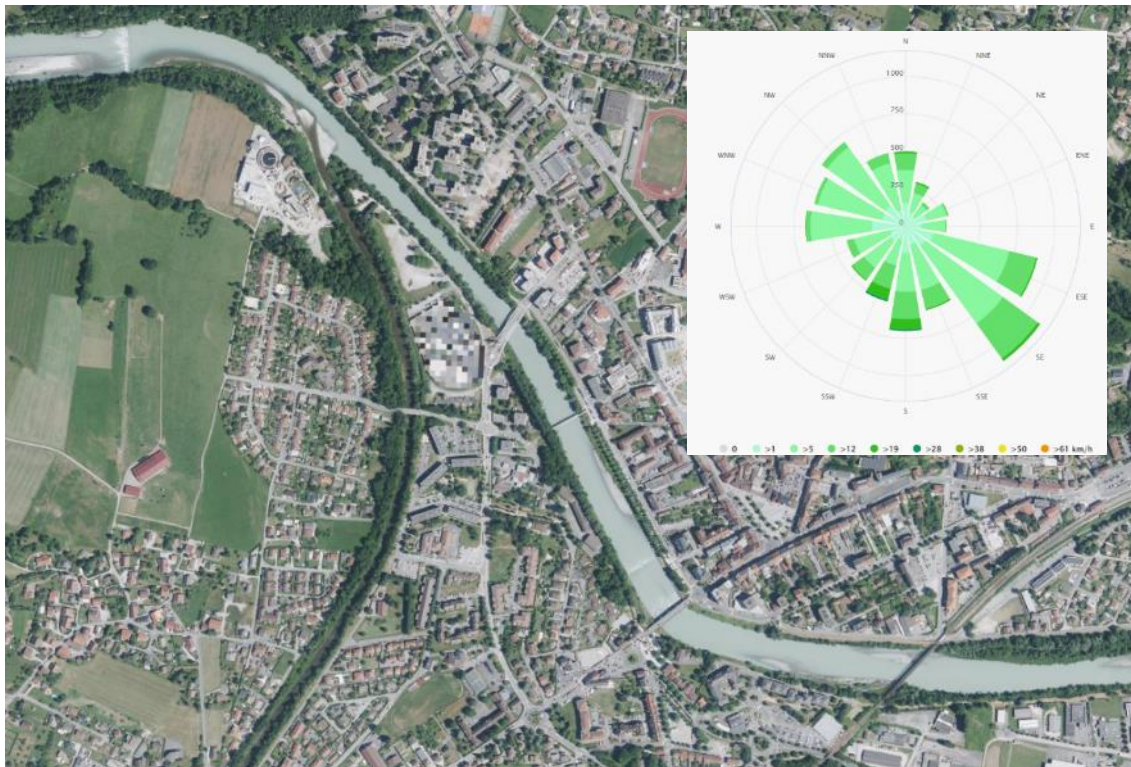


Figure 114 - Rose des vents à Bonneville (Source : Meteoblue)

### 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.

La note de calcul hydraulique rédigée par CNR en 2021 met en évidence les vitesses maximales en pied de digue de l'Arve en rive gauche.

On constate que pour chacun des tronçons les vitesses évoluent entre 1,8 et 4,5 m/s.

**Ce mode de défaillance concerne donc les digues en rive droite du Borne. L'analyse est détaillée dans les paragraphes suivants.**

### 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.

### 7.3.5.7.2 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

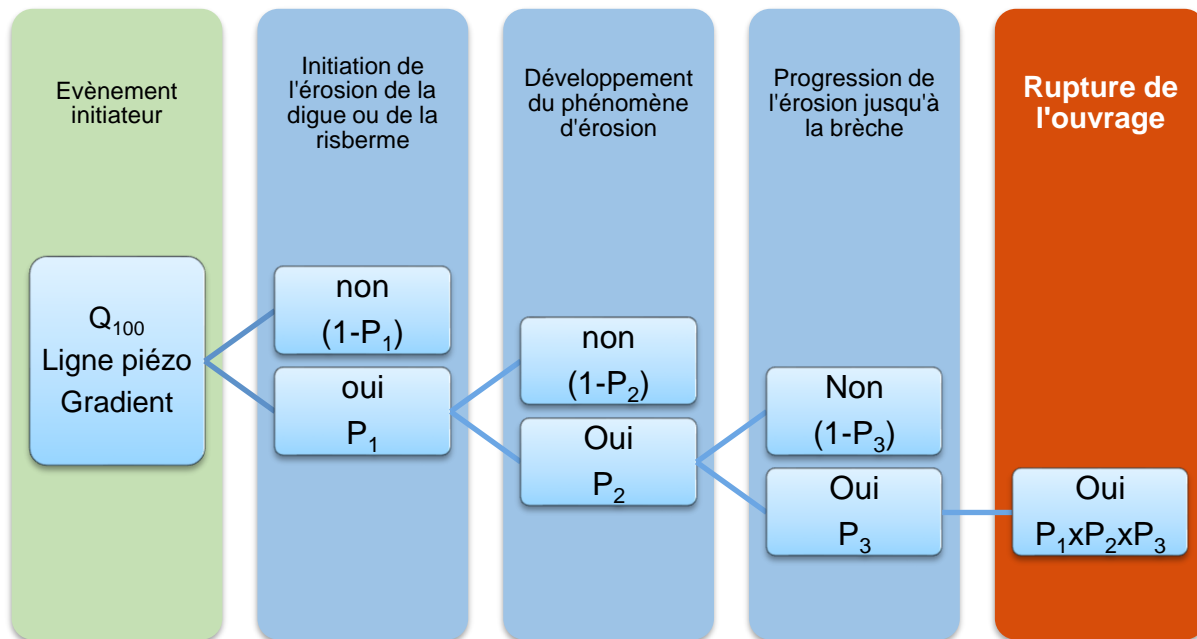


Figure 115 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe par érosion de la risberme.

### 7.3.5.7.3 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  $\beta$  avec l'horizontale s'écrit :

$$\tau_b = \sqrt{1 - \frac{\sin(\beta)^2}{\sin(\varphi)^2}} * \tau_0$$

Avec :

- $\varphi$  Angle de frottement du sol (°) ;
- $\tau_0 = \gamma_w * R_h * i$  la contrainte tractrice sur fond plat où :
  - $\gamma_w$  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.

<i>Tableau 1. Valeurs de résistance à la force d'arrachement de quelques matériaux et techniques en cours d'eau</i>	<b>Matériaux et techniques</b>	<b><math>\tau</math> (N/m<sup>2</sup>)</b>
	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 116 - 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 <sup>2</sup> ]		
	À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
Enherbement	4 <sup>(3)</sup> -20 <sup>(3)</sup>	25-30 <sup>(3)</sup>	30 <sup>(3)</sup> -100 <sup>(2)</sup>
Boutures	10 <sup>(3)</sup>	60 <sup>(3)</sup> -150 <sup>(1)</sup>	60 <sup>(3)</sup> -165 <sup>(1)</sup>
Boudin d'hélophytes	10 <sup>(3)</sup> -30 <sup>(2)</sup>	20-30 <sup>(3)</sup>	50 <sup>(3)</sup> -60 <sup>(1)</sup>
Clayonnages	10 <sup>(2,3)</sup>	10-15 <sup>(3)</sup>	10 <sup>(3)</sup> -120 <sup>(1)</sup>
Fascines	20 <sup>(3)</sup> -60 <sup>(2)</sup>	50 <sup>(3)</sup> -60 <sup>(3)</sup>	80 <sup>(2)</sup> -250 <sup>(4)</sup>
Saules		50-70 <sup>(4)</sup>	100-140 <sup>(4)</sup> 800 (20 ans) <sup>(4)</sup>
Plantation d'arbre	20 <sup>(2)</sup>		120 <sup>(2)</sup>
Lit de plants et plançons	20 <sup>(2,3)</sup>	120 <sup>(3)</sup>	140 <sup>(2,3)</sup>
Couche de branches à rejet	50 <sup>(2,3)</sup> -150 <sup>(3)</sup>	150 <sup>(3)</sup> -300 <sup>(3)</sup>	300 <sup>(2,3)</sup> -450 <sup>(3)</sup>
Caissons végétalisés	500 <sup>(3)</sup>	600 <sup>(3)</sup>	600 <sup>(3)</sup>
Enrochements	Végétalisés	100 <sup>(3)</sup> -200 <sup>(2)</sup>	100 <sup>(3)</sup> -300 <sup>(3)</sup>
	Nus	250 <sup>(2)</sup>	250 <sup>(2)</sup>

1 : Faber 2004 ; 2 : Schiechl et Stern 1996 ; 3 : Venti *et al.* 2003 ; 4 : Lachat 1994.

Figure 117 – Contraintes tractrices limites en fonction du matériau- Guide GénieAlp 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 terme dans le tableau extrait du guide GénieAlp, à savoir **140 Pa**.

Les contraintes effectives imposées par l'écoulement sur les talus côté rivière sont déterminées directement à l'aide des modélisations hydrauliques, qui nous fournissent les contraintes de l'écoulement sur le fond du lit et sur les berges pour les différentes crues modélisées.

Enfin, nous comparons les valeurs de contrainte effective et admissible en se basant sur la grille de probabilité suivante :

Ratio $T_{max}/ T_{admissible}$	Probabilité de rupture
0	0
0,6	0,01
0,8	0,1
1,2	0,5
1,4	0,9

Tableau 38 : Grille des probabilités pour l'initiation de l'érosion externe

Afin de limiter les effets de seuils, des interpolations linéaires sont faites entre ces valeurs.

Le tableau suivant récapitule les données obtenues pour l'analyse de chacun des tronçons :

Tableau 39 : Probabilités de défaillance par érosion externe

Tronçon homogène	$T_{max}$ (Pa)	$T_{admissible}$ (Pa)	Rapport	P1
RD19	67,40	30,53	2,21	0,99
RD-T1	47,56	87,66	0,54	0,009
RD-T2	49,32	87,66	0,56	0,009
RD-T3	48,79	87,66	0,56	0,009
RD-T4	45,81	87,66	0,52	0,009
RD-T5	40,87	87,66	0,47	0,008
Centre T02 - JB Rey	53,00	68,73	0,77	0,09
Centre T01 Poste	60,73	79,91	0,76	0,08
RD-T6	66,11	87,66	0,75	0,01
RD-T7	73,55	96,95	0,76	0,01
RD-T8	95,46	96,95	0,98	0,28
RD-T9	82,28	96,95	0,85	0,15

Les matériaux des digues projetées, sur les tronçons où des épis en enrochements ont été prévus, ont été dimensionnées 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 chapitre 5 du présent rapport.

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 :

Tronçons	$V_{\max, Q100}$ (m/s)	Type d'embrochements (kg)
RD19	-	-
RD-T1	-	60/300
RD-T2	-	60/300
RD-T3	-	60/300
RD-T4	2,4	-
RD-T5	-	60/300
Centre T02 - JB Rey	1,8	-
Centre T01 - Poste	2,1	-
RD-T6	2,5	300/1000
RD-T7	2,0	300/1000
RD-T8	2,3	300/1000
RD-T9	2,6	-
Lisière des clos	2,6	-

Les embrochements ont été dimensionnés pour des vitesses égales ou supérieures aux vitesses maximales sur les tronçons.

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.

### 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, embrochements 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.

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)
RD19	Largeur Crête : min 15m Largeur assise : min 30 m Pente talus amont : 3H/2V	Non	Non	Non	Forte présence d'arbre	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T1	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : 2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Plants et plançons	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T2	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : 2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Plants et plançons	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T3	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : 2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Plants et plançons	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T4	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : >2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Large Franc Bord	Non	Présence d'arbre	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T5	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : 2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Plants et plançons	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
Centre T02 JB Rey	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8	Enrochements en partie basse	Non	Non	Présence d'arbre sur la berge	Mise en charge : <18h Durée de	0.1

	m Pente talus amont : 2H/1V					crue : ~48h	
Centre T01 Poste	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : 2H/1V	Enrochements en partie basse	Non	Non	Présence d'arbre sur la berge	Mise en charge : <18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T6	Largeur Crête : > 10 m Largeur assise : > 10 m Pente talus amont : >2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Présence d'arbre	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T7	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : 2,2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Plants et plançons	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T8	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : + de 8 m Pente talus amont : 2,2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Plants et plançons	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
RD-T9	Largeur Crête : 4 m Largeur assise : Crête au TN aval Pente talus amont : 2,2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Plants et plançons	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1
Lisière du clos	Largeur Crête : > 10 m Largeur assise : > 10 m Pente talus amont : >2H/1V	Oui - enrochements en partie basse Plants et plançons en partie haute	Non	Non	Présence d'arbre	Mise en charge : ~18h Durée de crue : ~48h	0.1

Figure 118 - Synthèse des facteurs influant 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.

La RD19 ne présente pas de confortement, cependant la grande largeur de ce tronçon permet de considérer la propagation de l'érosion jusqu'à la brèche comme **improbable (P=0,1)**.

La mise en place de murs en béton préfabriqué ou de palplanches sur les tronçons RD-T2, T4, T6, T8 permet de limiter la progression de l'érosion externe, et de la considérer comme **improbable (P=0,1)**.

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)**.

Le tronçon RD-T9 étant au TN aval, celui-ci n'est pas concerné par une possible brèche.

#### 7.3.5.7.4 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
RD19	0,99	0,1	0,1	0,99%
RD-T1	0,01	0,1	0,1	0,01%
RD-T2	0,01	0,1	0,1	0,01%
RD-T3	0,01	0,1	0,1	0,01%
RD-T4	0,01	0,1	0,1	0,01%
RD-T5	0,01	0,1	0,1	0,01%
Centre T02 JB Rey	0,09	0,1	0,1	0,09 %
Centre T01 Poste	0,08	0,1	0,1	0,09 %
RD-T6	0,01	0,1	0,1	0,01%
RD-T7	0,01	0,1	0,1	0,01%
RD-T8	0,28	0,1	0,1	0,28%
Lisière du clos	0,09	0,1	0,1	0,09 %

Figure 119 - Probabilités de défaillance par érosion externe des tronçons (Q<sub>100</sub>)

### 7.3.5.8 Synthèse des probabilités de rupture et définition du niveau de protection

La crête du tronçon RD-T9 étant au TN aval, celui-ci n'est pas considéré comme une digue, et n'est donc pas présenté dans la conclusion du diagnostic approfondi. L'analyse du diagnostic approfondi sur ce tronçon a été réalisée à titre informatif.

#### 7.3.5.8.1 Crue centennale

Les probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale  $Q_{100}$  sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

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
RD19	0 %	<1 %	-	ND	~0 %	0.99%
RD-T1	0 %	~0 %	-	0,1 %	~0 %	0.01%
RD-T2	0 %	~0 %		0,01 %	~0 %	0.01%
RD-T3	0 %	<1 %	-	0,1 %	~0 %	0.01%
RD-T4	0 %	~0 %		0,01 %	~0 %	0.01%
RD-T5	0 %	~0 %	-	0,1 %	~0 %	0.01%
Centre T02 JB Rey	0 %	<5%	-	1 %	~0 %	0,09 %
Centre T01 Poste	0 %	<5%	-	1 %	~0 %	0,09 %
RD-T6	0 %	~0 %		0,01 %	~0 %	0.01%
RD-T7	0 %	~0 %	-	0,1 %	~0 %	0.01%
RD-T8	0 %	~0 %		0,01%	~0 %	0.28%
Lisière du clos	0 %	Sans-objet	-	0,01%	~0 %	0.09 %

Tableau 40 - Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale  $Q_{100}$

\* Le dimensionnement et la justification de la stabilité des murs sera effectuée lors de la phase PRO.

### 7.3.5.8.2 Niveau de sureté

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
RD19	>Z <sub>Q100</sub> +1 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m		*	*	Z <sub>Q100</sub> +1 m
RD-T1	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m		>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m
RD-T2	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m**	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m
RD-T3	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m		>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m
RD-T4	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m**	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m
RD-T5	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m		>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m
Centre T02 - JB Rey	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m		>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m
Centre T01 - Poste	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m		>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +0,8 m
RD-T6	Z <sub>Q100</sub> +1 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m**	>Z <sub>Q100</sub> +1 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m
RD-T7	Z <sub>Q100</sub> +1 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m		>Z <sub>Q100</sub> +1 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m
RD-T8	Z <sub>Q100</sub> +1 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m**	>Z <sub>Q100</sub> +1 m	Z <sub>Q100</sub> +0,8 m	>Z <sub>Q100</sub> +1 m
Lisière des clos		>Z <sub>Q100</sub> +1 m		Z <sub>Q100</sub> +1 m	Z <sub>Q100</sub> +1 m	-

\*La justification de l'érosion interne et de la rupture par glissement de talus sur le tronçon RD19 sera effectuée à la suite de la réalisation d'essais géotechniques complémentaires sur ce tronçon.

\*\* Le dimensionnement et la justification de la stabilité des murs sera effectuée lors de la phase PRO.

**Le niveau de sureté assuré par les digues en rive droite de l'Arve à l'état final correspond à Z<sub>Q100</sub>+0,8m.**

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<sub>100</sub> + 0,8 m ;
- A l'aval du pont de l'Europe : **Niveau de la ligne d'eau en crue de projet** : Q<sub>100</sub> + 1 m.

### 7.3.5.8.1 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 de Bonneville Ayze, 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 :

- **Au pont de la ZI : 448,76 m NGF ;**
- **Au pont de l'Europe : 445,65 m NGF.**

### 7.3.5.8.2 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 chapitre précédent sur le 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.

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
RD19	6%	*	-	ND*	*	0,99%
RD-T1	1%	3,5 %	-	0,1 %	<5 %	0,01%
RD-T2	0%	-	**	0,1 %	<5 %	0,02%
RD-T3	0%	3,5 %	-	0,1 %	<5 %	0,02%
RD-T4	0%	3,5 %	**	0,1 %	<5 %	0,01%
RD-T5	0%	3,5 %	-	0,1 %	<5 %	0,01%
Centre T02 JB Rey	50 %		-	0,1 %	<5 %	0,10%
Centre T01 Poste	5 %		-	0,1 %	<5 %	0,22%
RD-T6	1 %	3,5 %	**	0,1 %	<5 %	0,13%
RD-T7	0 %	3,5 %	-	0,1 %	<5 %	0,12%
RD-T8	0 %	~0 %	**	0,9%	<5 %	0,60%
Lisière du clos	0 %	Sans-objet	-	0,01%	<5 %	

\*La justification de l'érosion interne et de la rupture par glissement de talus sur le tronçon RD19 sera effectuée à la suite de la réalisation d'essais géotechniques complémentaires sur ce tronçon.

\*\* Le dimensionnement et la justification de la stabilité des murs 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
RD19	>Q <sub>400</sub>	*	-	ND*	*	>Q <sub>400</sub>
RD-T1	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	-	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
RD-T2	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	**	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
RD-T3	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	-	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
RD-T4	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	**	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
RD-T5	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	-	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
Centre T02 JB Rey	Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	-	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
Centre T01 Poste	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	-	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
RD-T6	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	**	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
RD-T7	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	-	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
RD-T8	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	**	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>
Lisière du clos	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	-	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>	>Q <sub>400</sub>

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 droite correspond à un niveau altimétrique de :

- Au pont de la ZI : 449,50 m NGF ;
- Au pont de l'Europe : 446,40 m NGF.

Ce niveau correspond à une crue d'occurrence Q<sub>400</sub>. 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 Centre T02.

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 Centre T02.

## 7.4 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.

**Tableau 41 : 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
ARVE RD état projeté	Pt de la ZI	448.76 mNGF	Q100 Arve (1081.0 m <sup>3</sup> /s) + Q Borne (90.0 m <sup>3</sup> /s) + Q Bronze (13.0 m <sup>3</sup> /s)	449.40 mNGF	Q400 Arve (1415.2 m <sup>3</sup> /s) + Q Borne (113.5 m <sup>3</sup> /s) + Bronze (13.0 m <sup>3</sup> /s)
	Pt de l'Europe	445,65 mNGF		446.24 mNGF	

## 7.5 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 4 accidents potentiels :

- **Défaillances fonctionnelles :**
  - o Vanne de fermeture du réseau « Ruisseau de la Madeleine » qui reste en position ouverte pendant la crue centennale de l'Arve ;
  - o Vannes de fermeture du réseau « Castorduc » qui restent en position ouvertes pendant la crue centennale de l'Arve.
- **Défaillances structurelles :**
  - o Ouverture d'une brèche pour la Q400 (niveau de danger) de l'Arve au droit du tronçon Centre T02 ;
  - o Ouverture d'une brèche pour la Q400 (niveau de danger) de l'Arve au droit du tronçon RD-T6.

### 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) :

Tableau 42 : Niveau de protection du système d'endiguement après travaux

Digue	Lieu de référence	Niveau de protection au point de référence (NGF) et occurrence associée S1	
		Niveau	Crue
ARVE RD état projeté	Pt de la ZI	448.76 mNGF	Q100 Arve (1081.0 m³/s) + Q Borne (90.0 m³/s) + Q Bronze (13.0 m³/s)
	Pt de l'Europe	445,65 mNGF	

Aucune venue d'eau ne survient dans la zone protégée.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayeze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayeze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

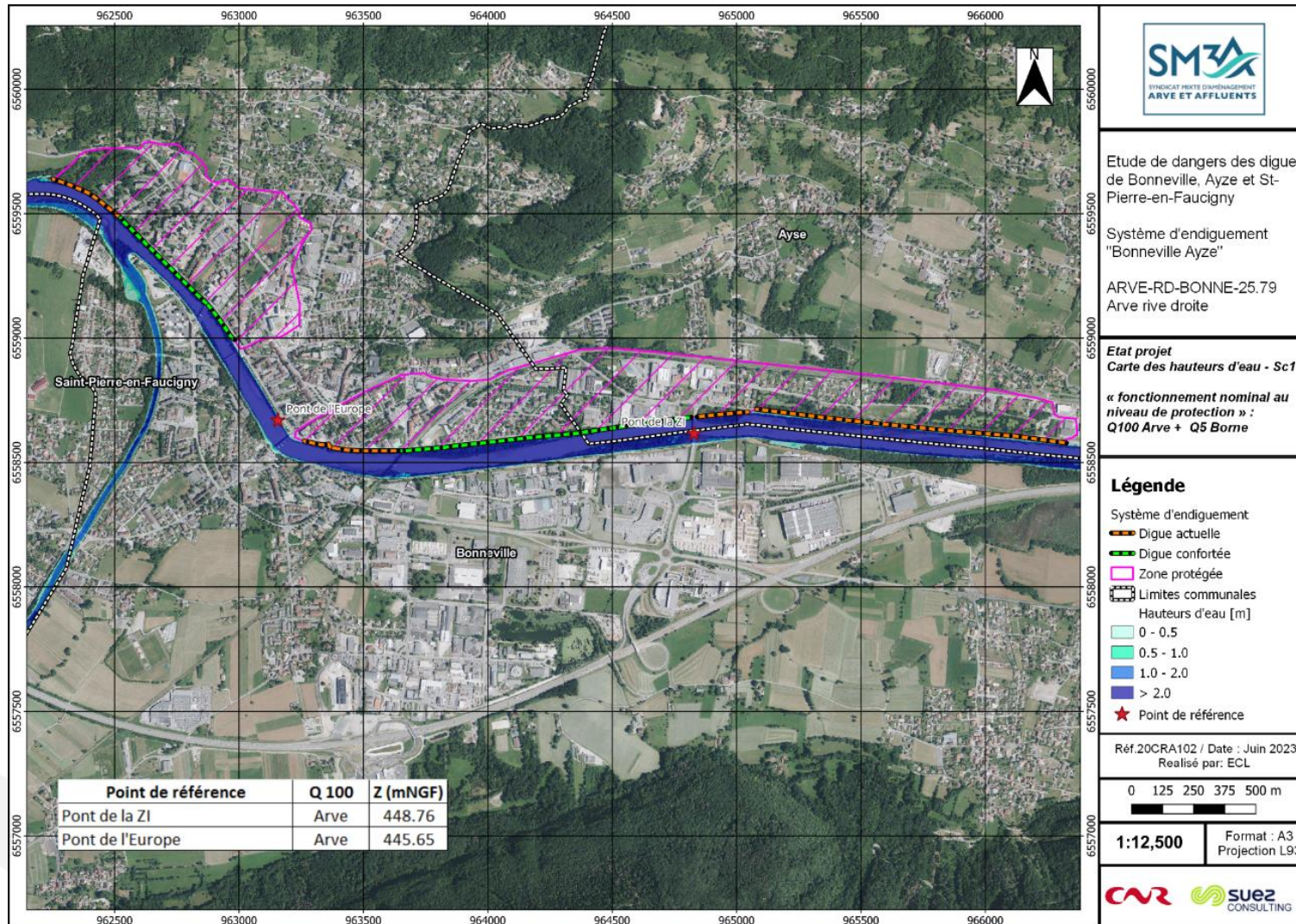


Figure 120 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

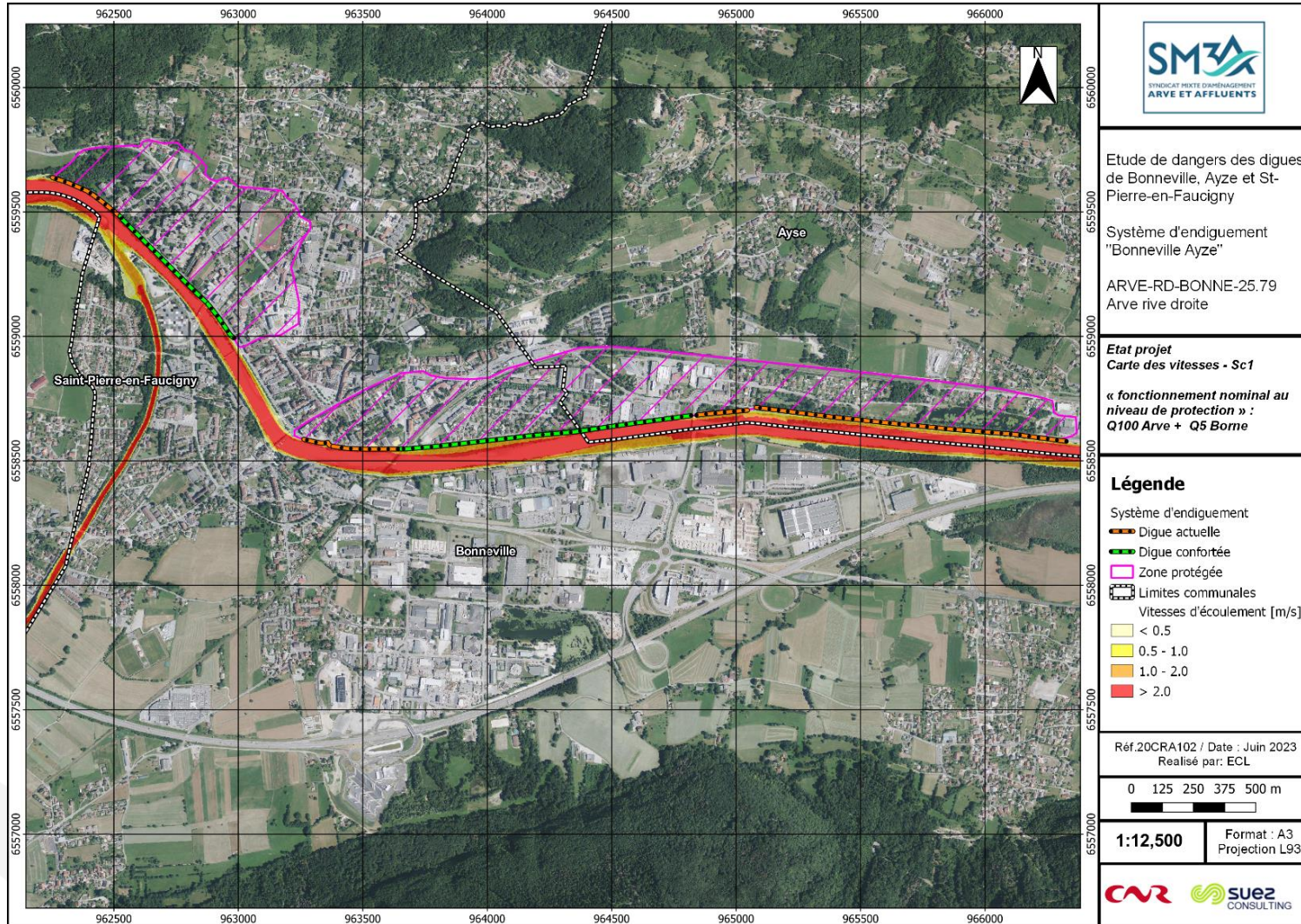


Figure 121 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1

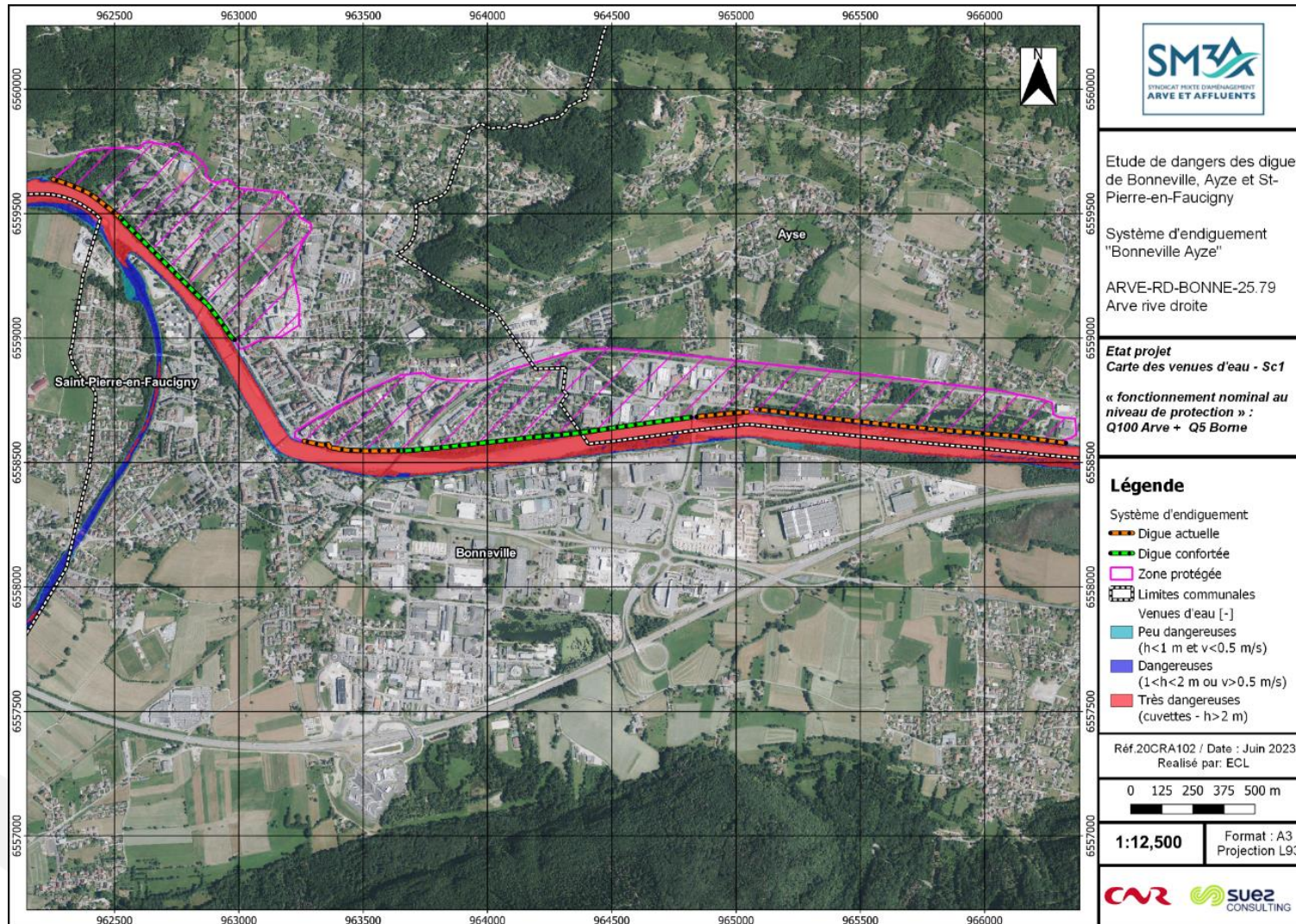


Figure 122 : Cartographie des venues d'eau du scénario 1

### 8.3 Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle

Pour les défaillances fonctionnelles, 2 simulations ont été réalisées à la suite du repérage et du diagnostic des réseaux traversants les digues :

- Vanne de fermeture du réseau « Ruisseau de la Madeleine » qui reste en position ouverte pendant la crue centennale de l'Arve ;
- Vannes de fermeture du réseau « Castorduc » qui restent en position ouvertes pendant la crue centennale de l'Arve.

#### 8.3.1 S2.1 : Défaillance fonctionnelle du ruisseau de la Madeleine

L'exutoire du ruisseau de la Madeleine est présent au niveau du tronçon centre T01 – Poste, en aval direct du pont SNCF.



Figure 123 : Vanne de régulation du ruisseau de la Madeleine, et exutoire en rive droite de l'Arve

La défaillance de cette vanne, pour la **crue centennale** (équivalent au niveau de protection), entraîne des venues d'eau peu dangereuses et très ponctuelles qui n'impactent pas les zones à enjeux.

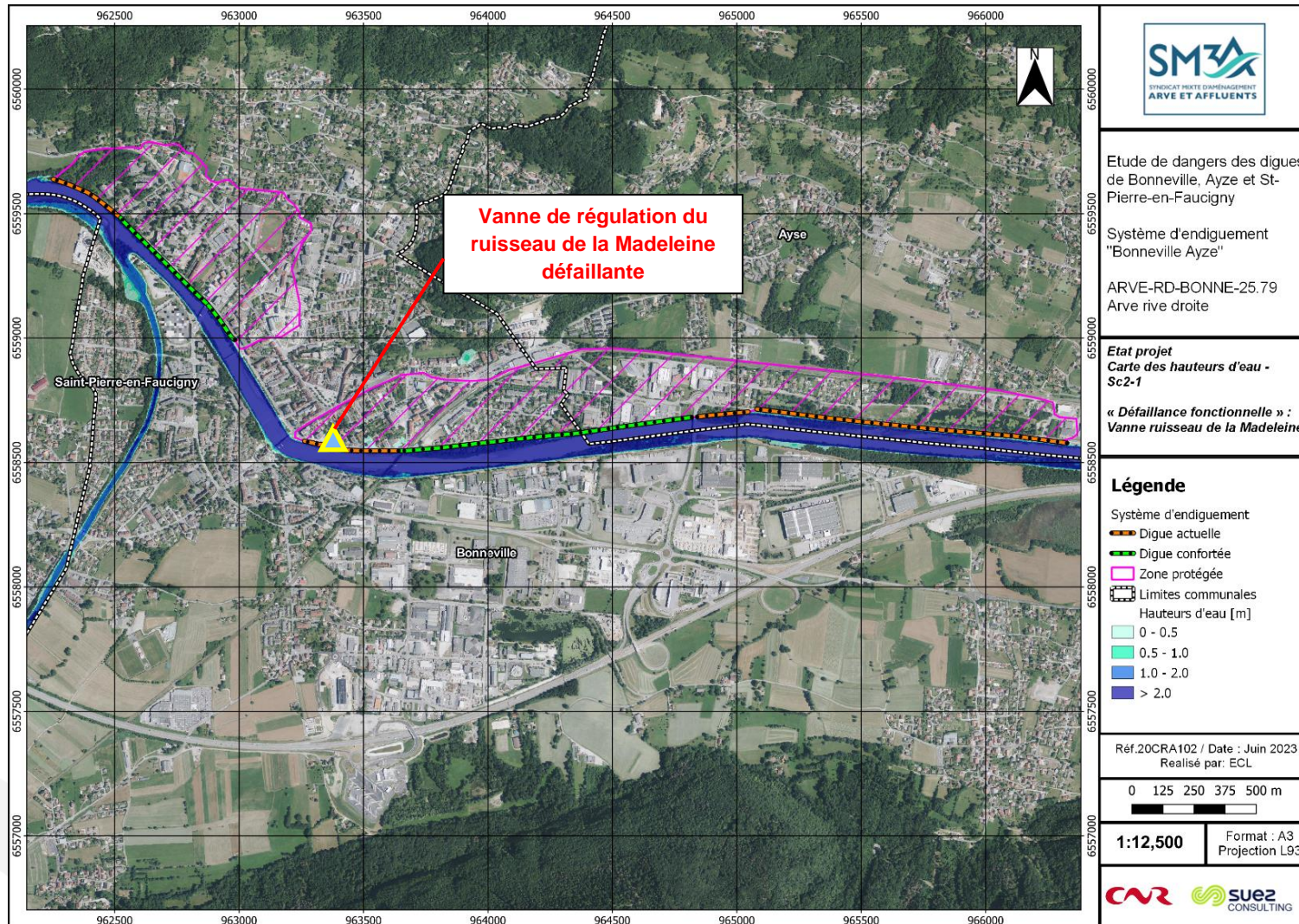


Figure 124 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.1

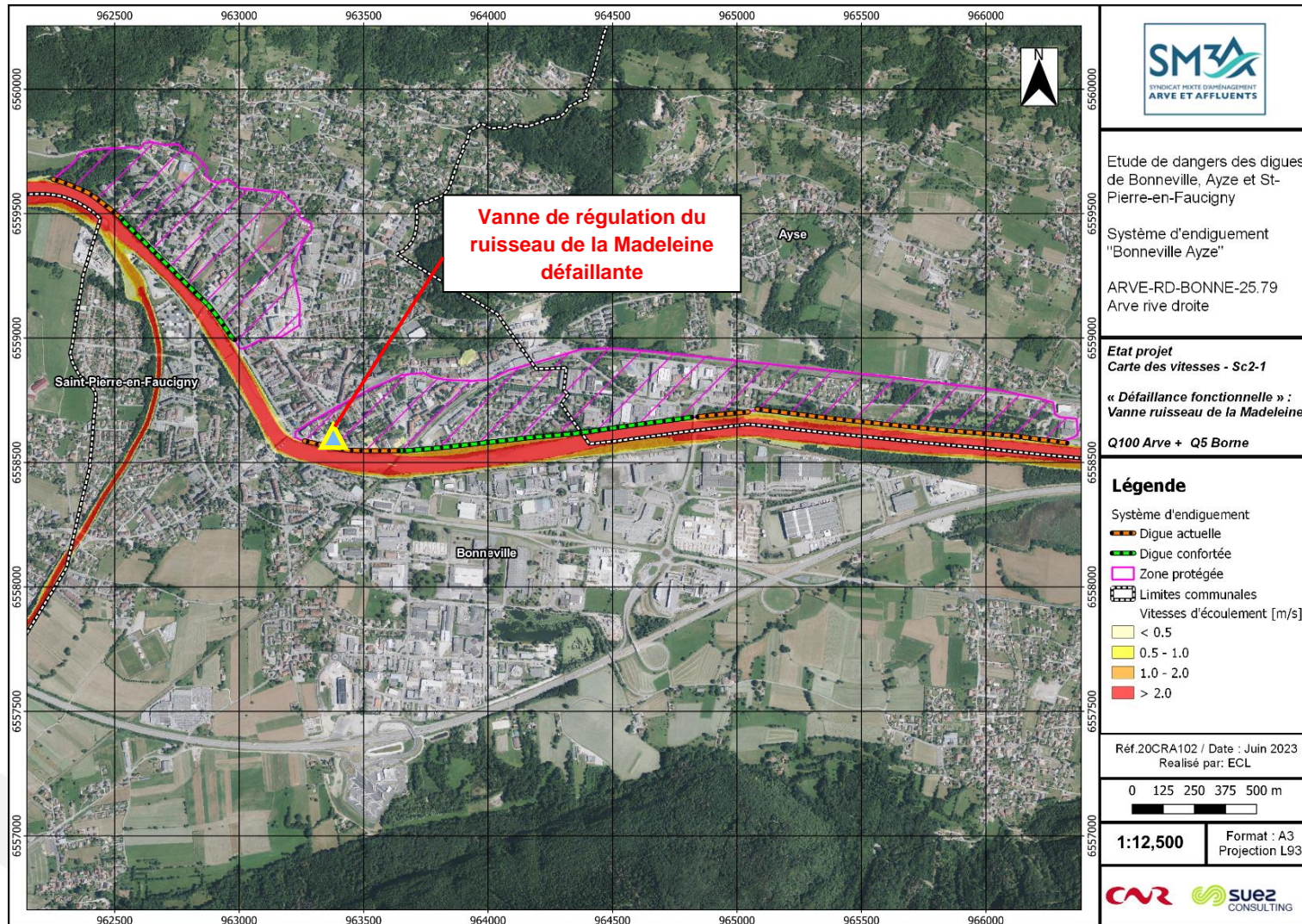


Figure 125 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.1

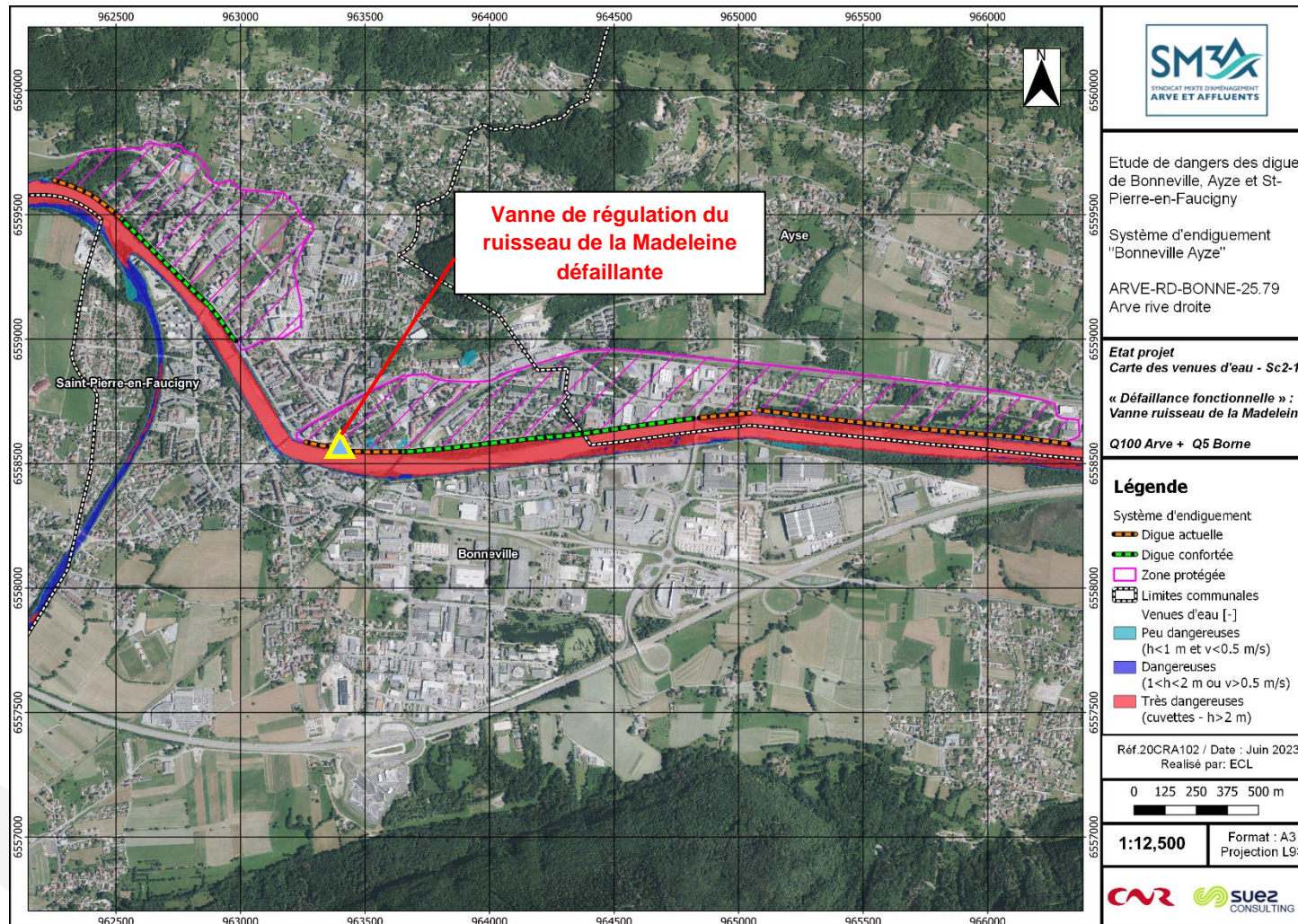


Figure 126 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.1

### 8.3.2 S2.2 : Défaillance fonctionnelle des Castorduc amont et aval

Les castorduc dont nous étudions la défaillance sont situés sur le tronçon de la RD19. Ils sont au nombre de deux et sont équipés de vannes de fermetures (du côté protégé).



Figure 127 : Castorduc traversant l'ouvrage RD19 (VTA CNR 2017)

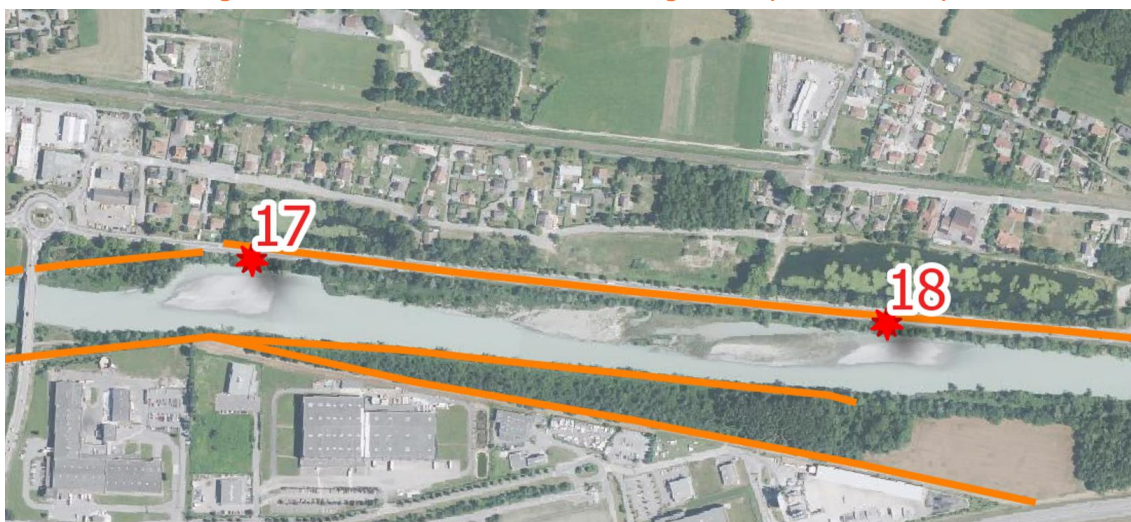


Figure 128 : Position des deux castorduc sur la RD19

La défaillance des deux vannes (vannes qui restent en position ouverte), pour la crue centennale (équivalent au niveau de protection), entraîne des venues d'eau peu dangereuses à dangereuses au droit des habitations.

Il a été modélisé l'ouverture des deux castorducs dans la même simulation, sans impact sur les venues d'eau.

Ces venues d'eau s'écoulent temporairement sur certains accès (notamment l'avenue Guy Chatel). Les vitesses d'eau sur ces accès restent cependant limitées (<1m).

On retrouve la cinétique de dysfonctionnement suivante :

**T=0 h : dysfonctionnement de la vanne de régulation**

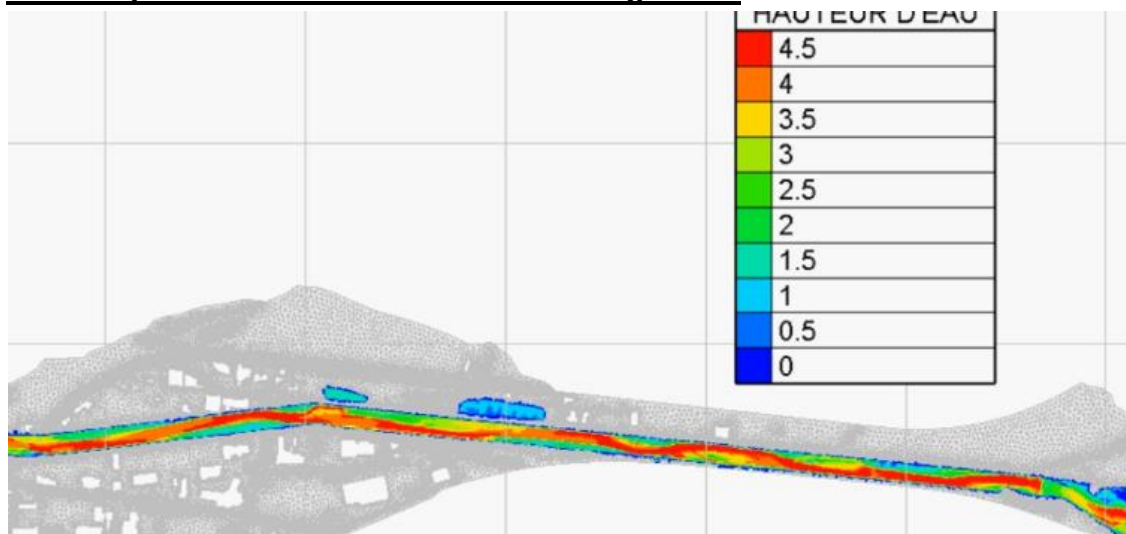


Figure 129 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=0h après la défaillance de la vanne

**T=1h : débordement du bassin**

Le bassin côté terre de la RD19 se remplit et commence à déborder sur sa partie nord-ouest.

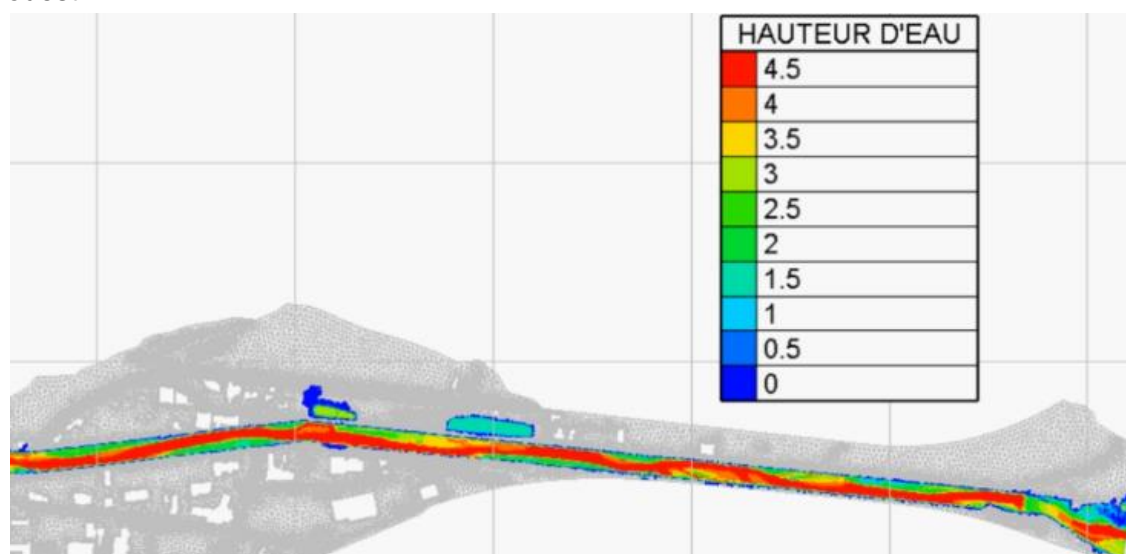


Figure 130 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=1h après la défaillance de la vanne

**T=2h : débordement sur Avenue Guy châtel**

Les eaux débordent sur l'avenue Guy châtel, et viennent s'écouler le long de la voie ferrée, en traversant la zone d'activité.

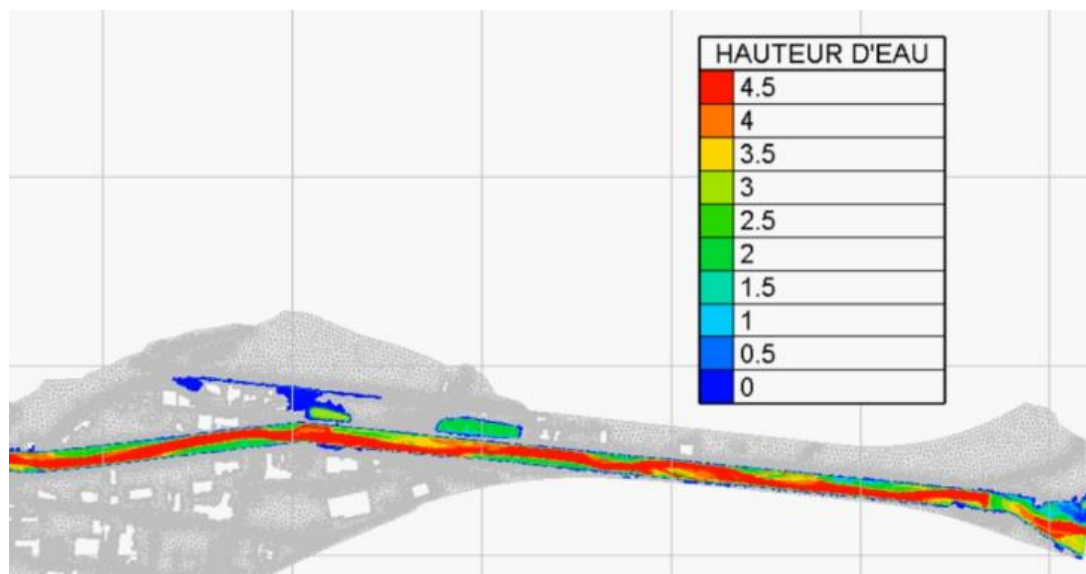


Figure 131 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=2h après la défaillance de la vanne

**T=3h : écoulement le long de la voie ferrée, et passage sous la route**

Les eaux en provenance du castorduc continuent de s'écouler le long de la voie ferrée. Ceux-ci empruntent un passage formé pour une piste cyclable sous la voirie et continuent de s'écouler le long du merlon ferroviaire, avant de revenir vers l'Arve.

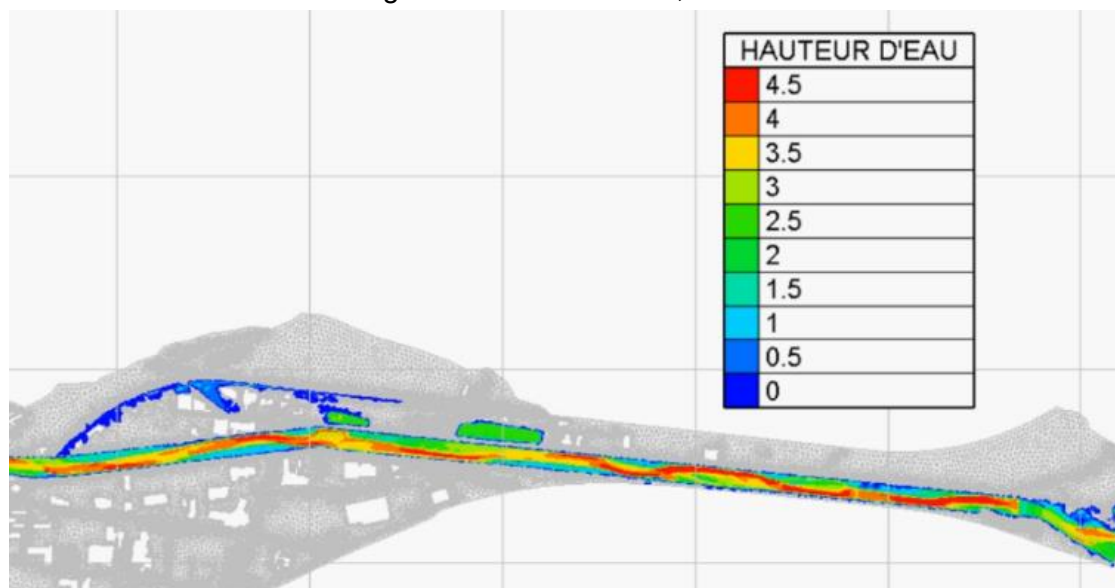


Figure 132 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=3h après la défaillance de la vanne

Des enjeux sont présents le long du remblai ferroviaire. L'accès principalement inondé (l'avenue Guy Chatel) est touché entre 1h et 2h après le dysfonctionnement de la vanne. Ces délais sont courts, mais permettent la mise en place de mesures de contournements.

Afin de limiter les impacts liés au dysfonctionnement de cette vanne, il est recommandé de mettre en place une automatisation de cette vanne, et une alerte auprès du gemapien en cas de dysfonctionnement.

Les cartographies (débordements maximum) du scénario 2.2 sont données ci-après.

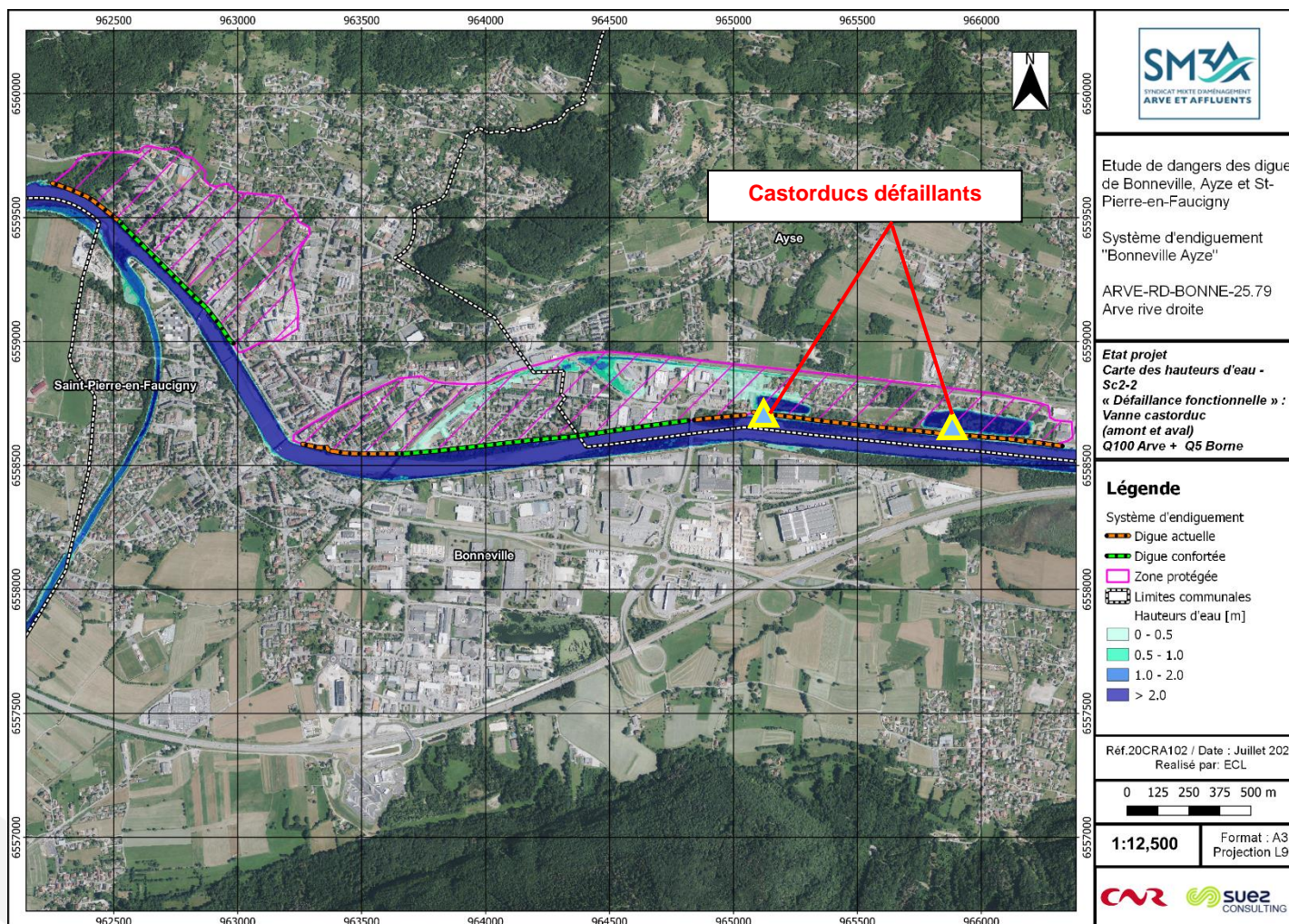


Figure 133 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.2

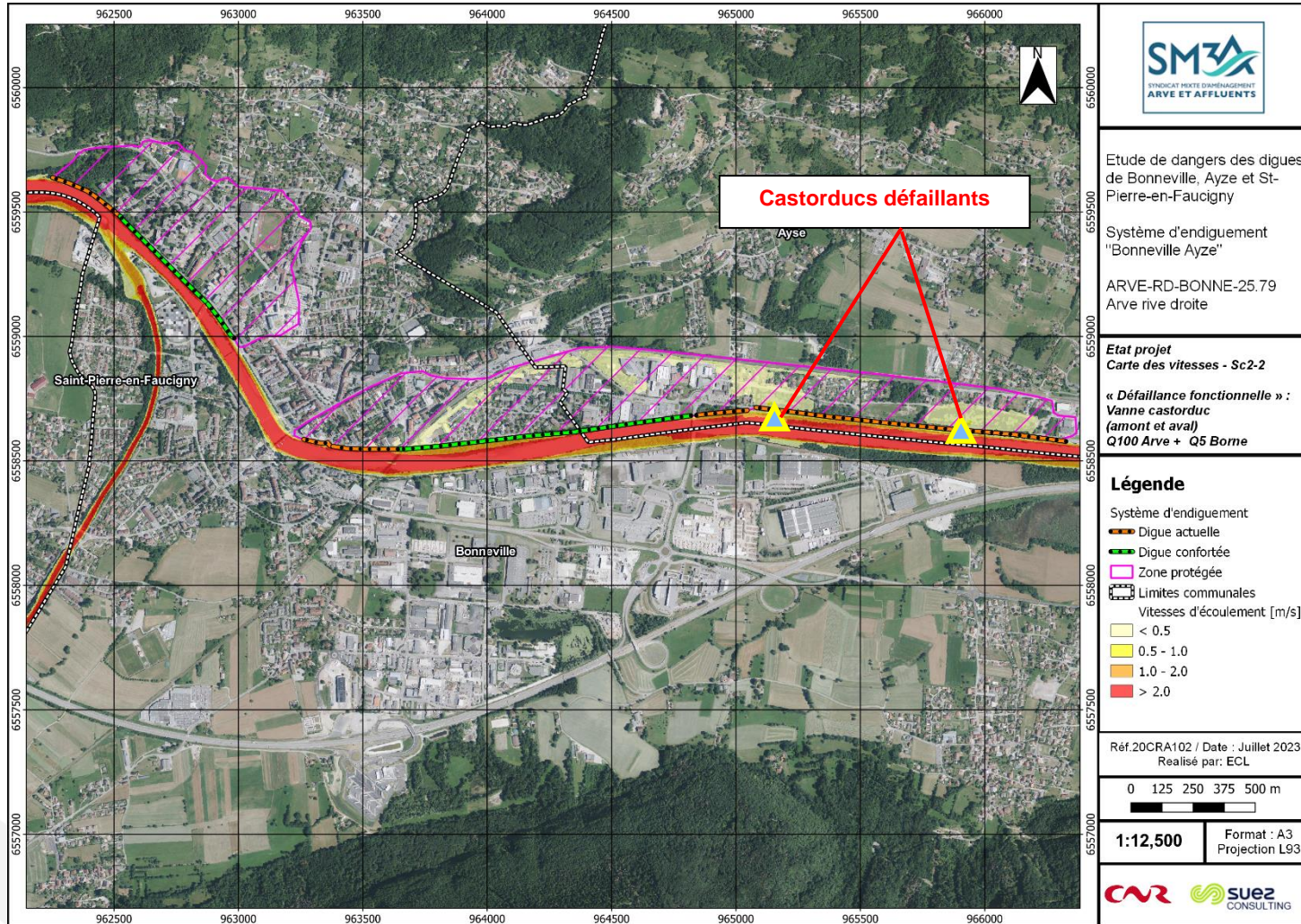


Figure 134 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.2

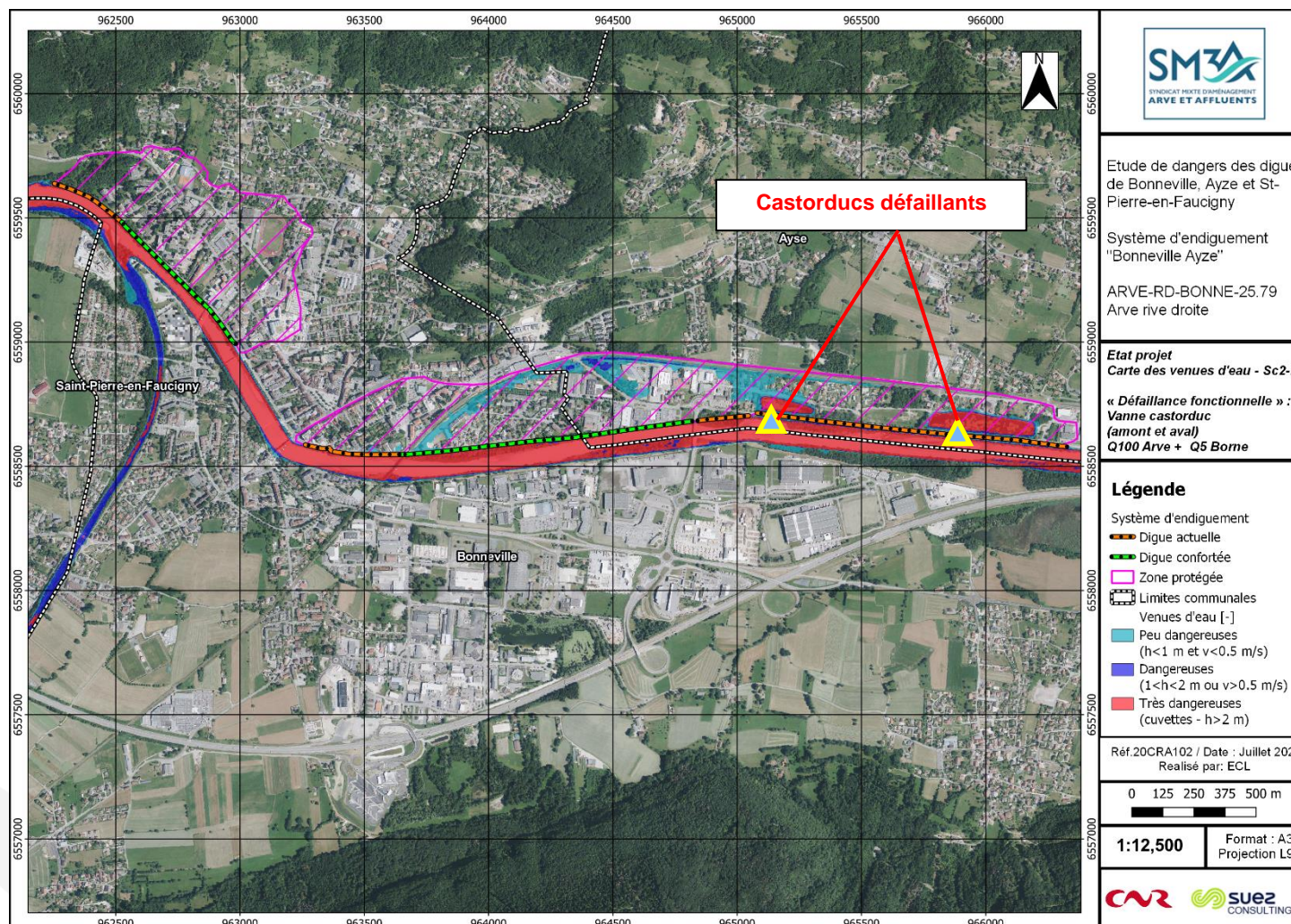


Figure 135 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.2

## 8.4 Scénarios 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 %**.

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.

Pour les défaillances structurelles, 2 simulations ont été réalisées à la suite du diagnostic approfondi :

- **S3.1 : Une brèche pour la Q400 (niveau de danger) de l'Arve au droit du tronçon Centre T02 ;**
- **S3.2 : Une brèche pour la Q400 (niveau de danger) de l'Arve au droit du tronçon RD-T6.**

La modélisation des brèches est basée sur les hypothèses suivantes :

- Amorçe 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.

### 8.4.1 S3.1 : Défaillance structurelle – Tronçons Centre T01 et Centre T02

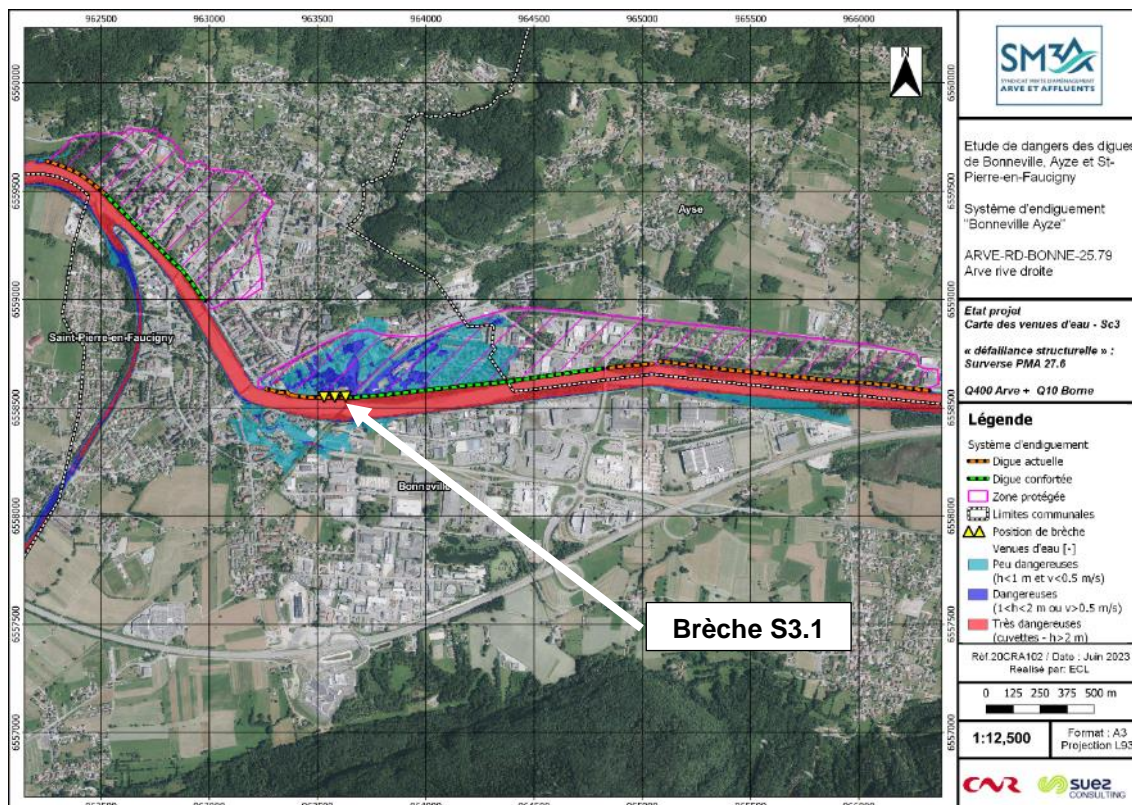


Figure 136 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle S3.1 (en situation projet)

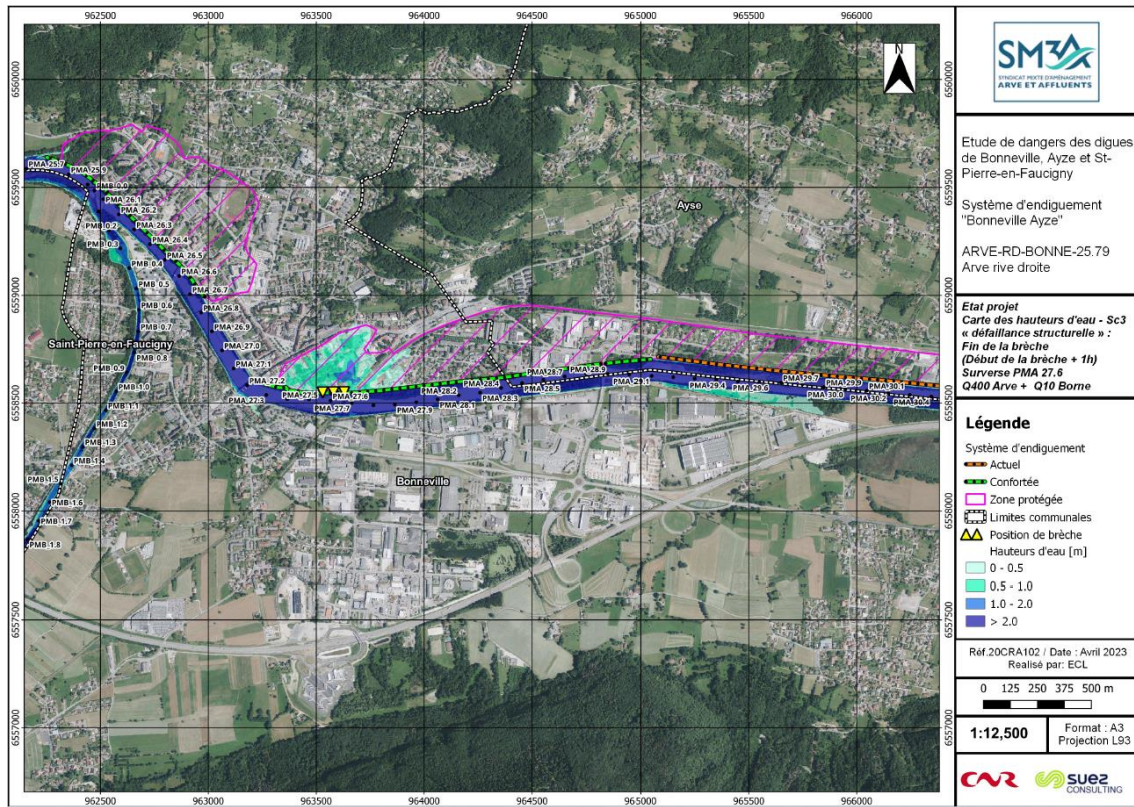
Pour ce scénario de défaillance structurelle, on retrouve la cinétique de brèche suivante :

#### **T=0 h : Début de la brèche**

Initiation de la brèche pour 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. Les eaux s'écoulent dans la zone protégée au droit des tronçons Centre T02 et centre T01, et remonte sous la voie ferrée.



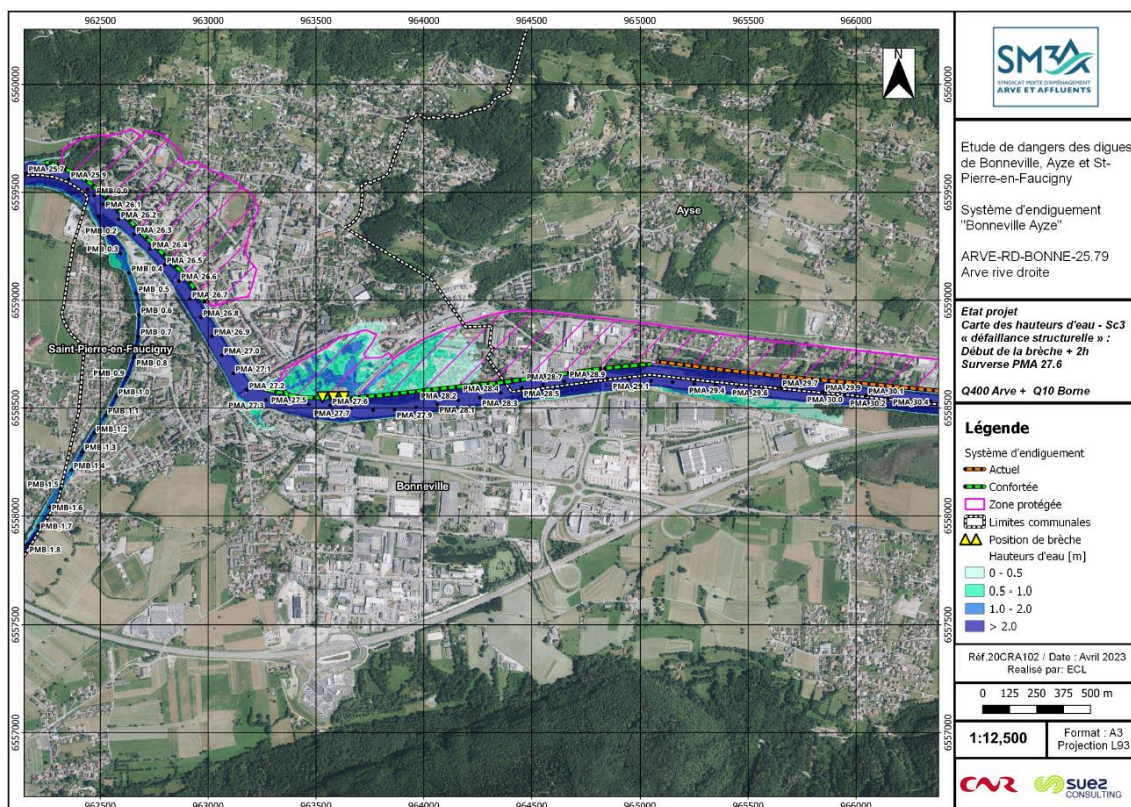


Figure 138 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T=2h après la rupture

### T=3h : remontée des eaux

L'eau continue de remonter et on observe des venues dangereuses en amont de la voie ferrée. Les accès principaux sont bloqués entre la voie ferrée et le système d'endiguement.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

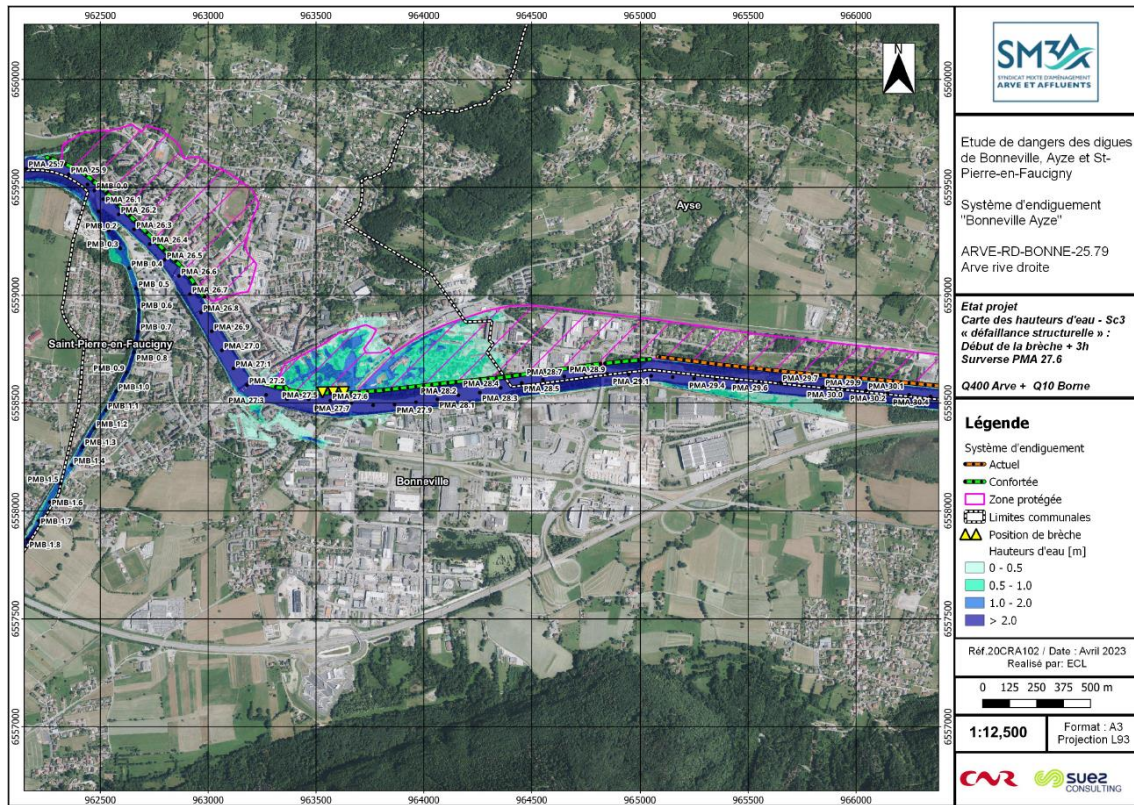


Figure 139 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T= 3h après la rupture  
 Les cartographies (débordements maximum) du scénario 3.1 sont données ci-après.

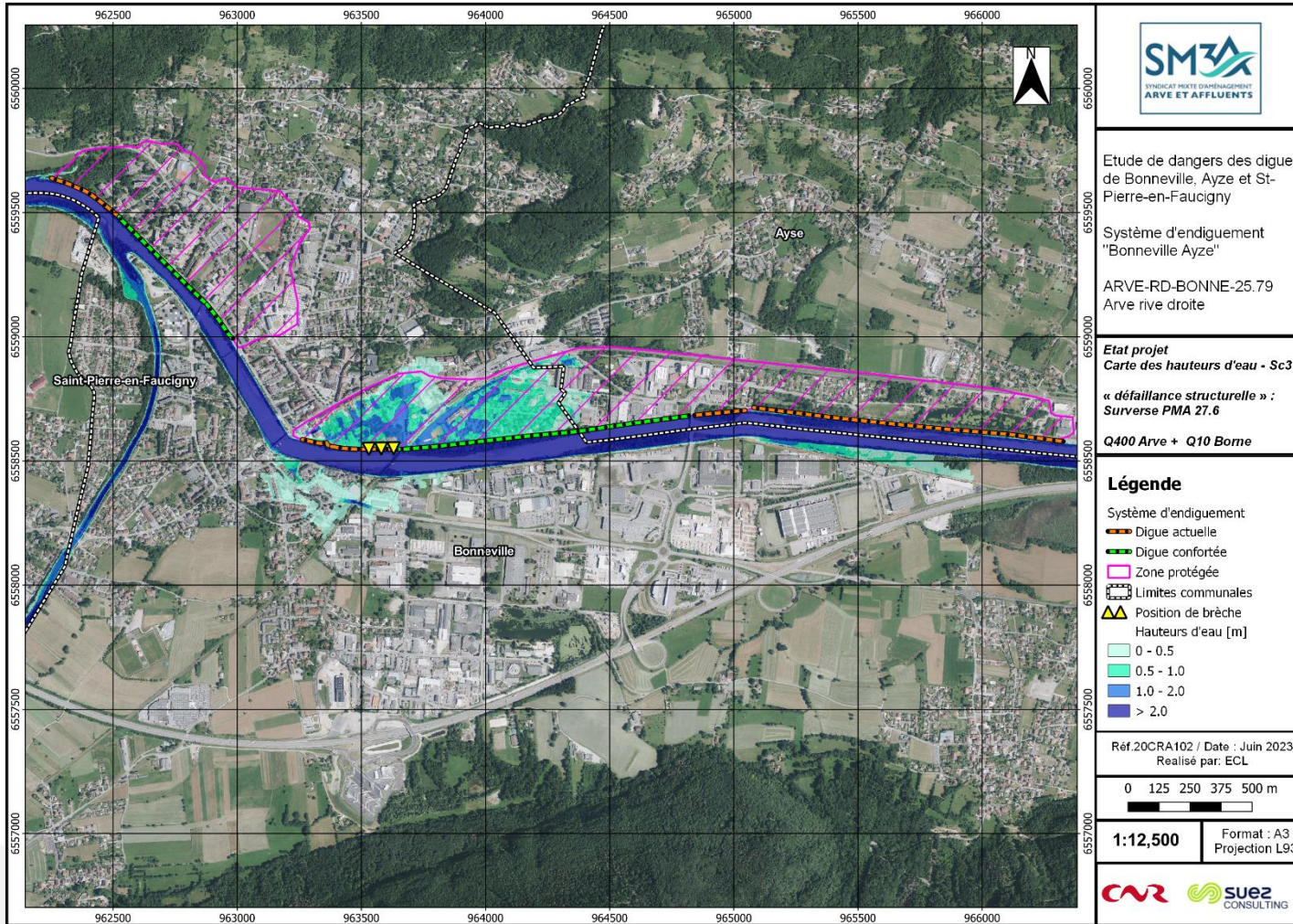


Figure 140 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

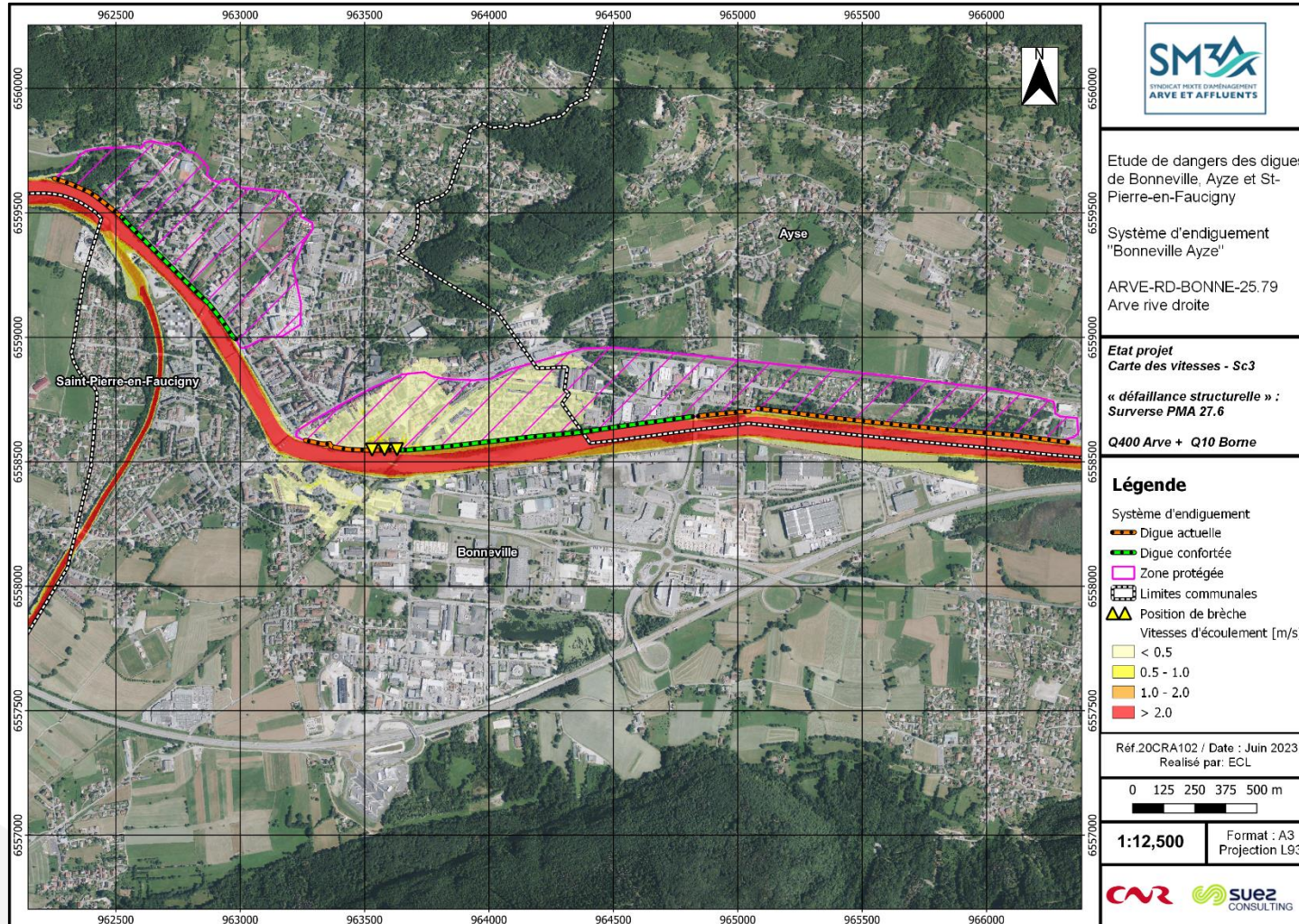


Figure 141 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.1

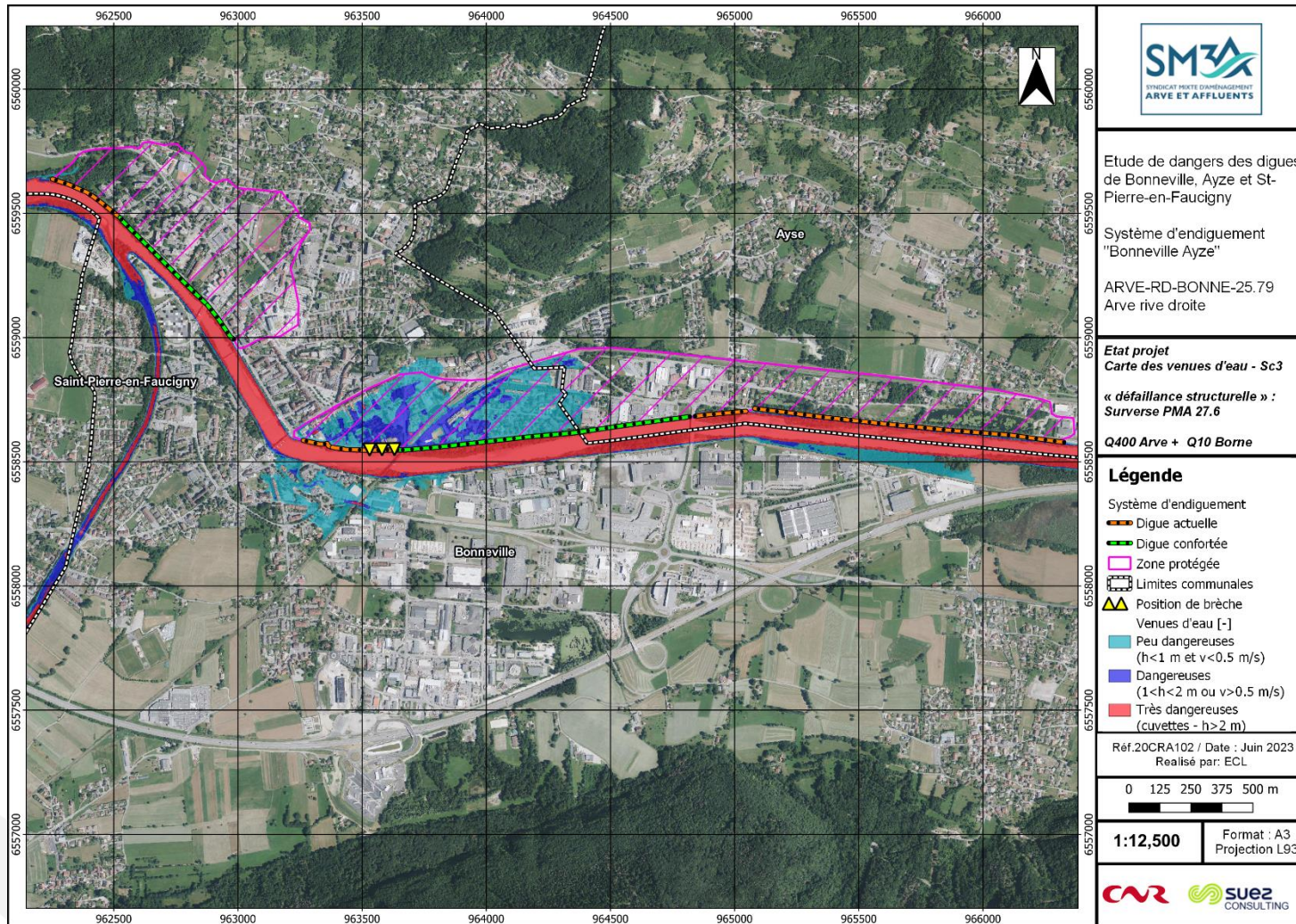


Figure 142 : Cartographie des venues d'eau du scénario 3.1

### 8.4.2 S3.2 : Défaillance structurelle – Tronçons RD-T6

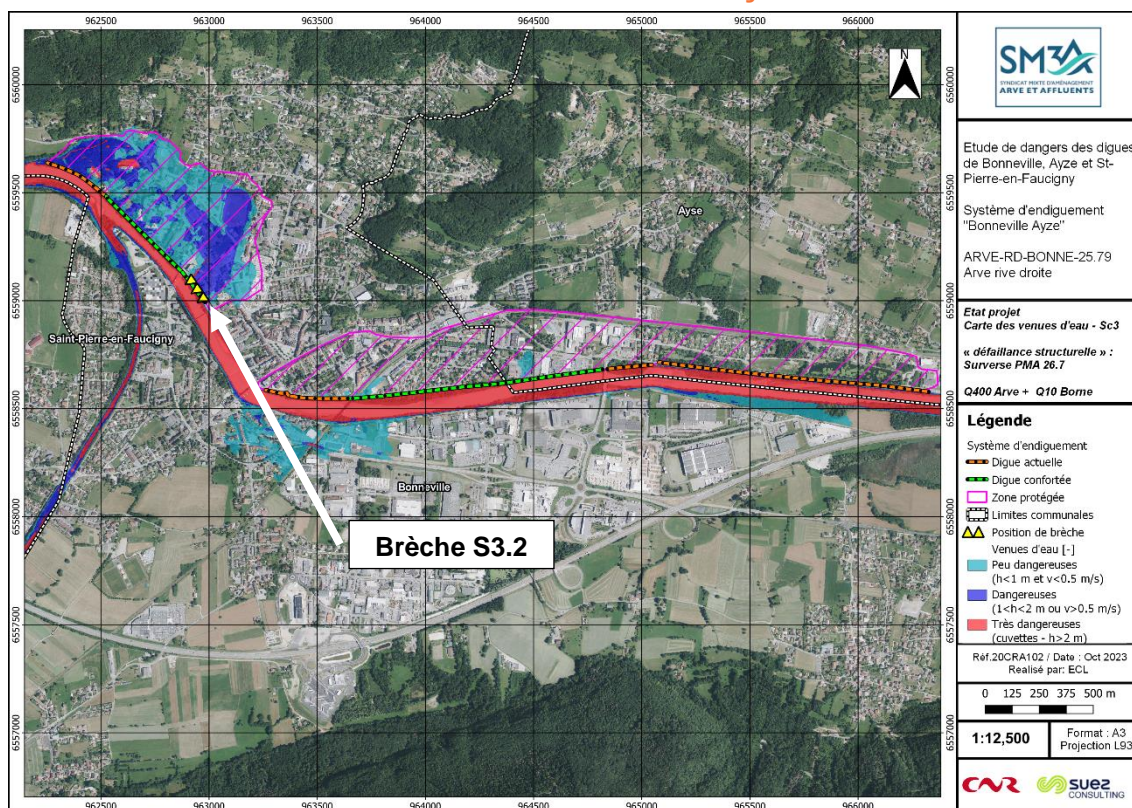


Figure 143 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle S3.1 (en situation projet)

Pour ce scénario de défaillance structurelle, on retrouve la cinétique de brèche suivante :

#### **T=0 h : Début de la brèche**

Initiation de la brèche pour 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. Les eaux s'écoulent dans la zone protégée au droit du tronçon RD-T6.

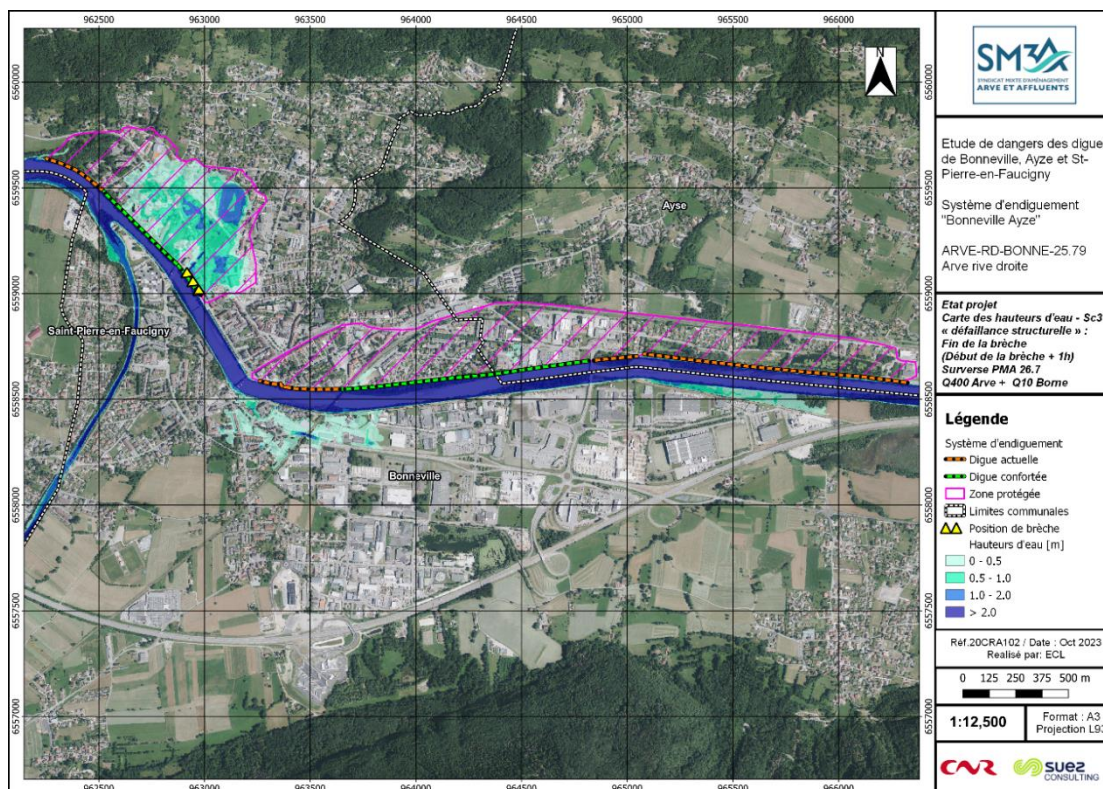


Figure 144 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=1h après la rupture

**T=2 h : Venues d'eau dans la zone protégée**

Les eaux continuent de remonter le long des digues côté terre. Des venues d'eau dangereuse s'installent derrière les digues aval.

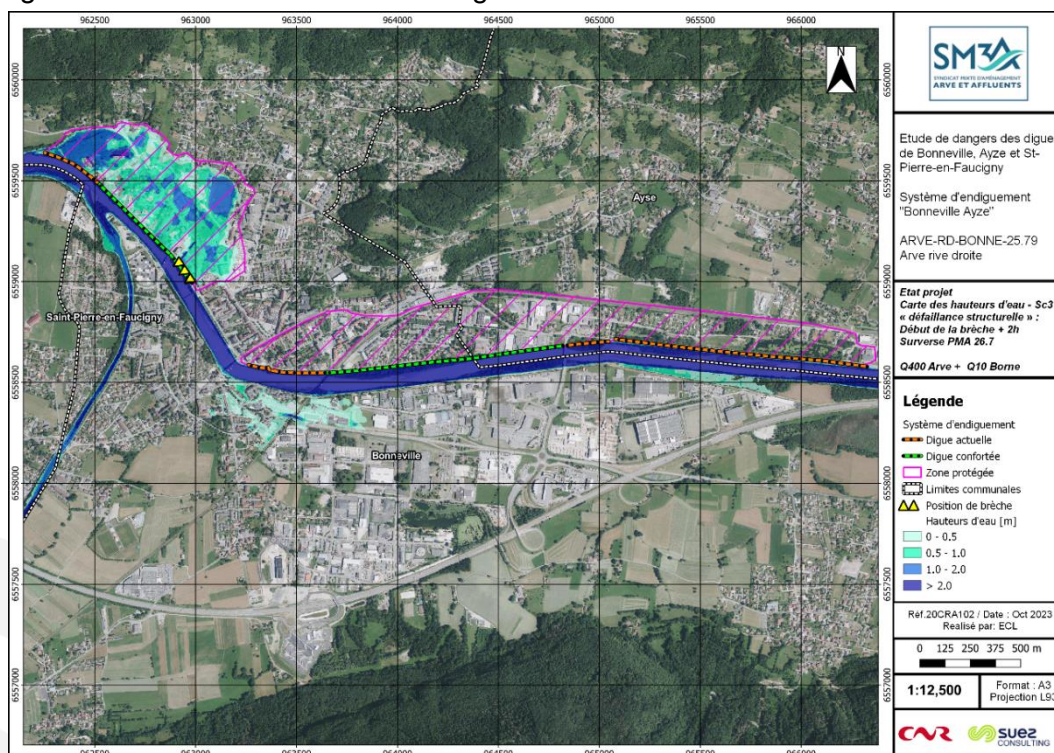
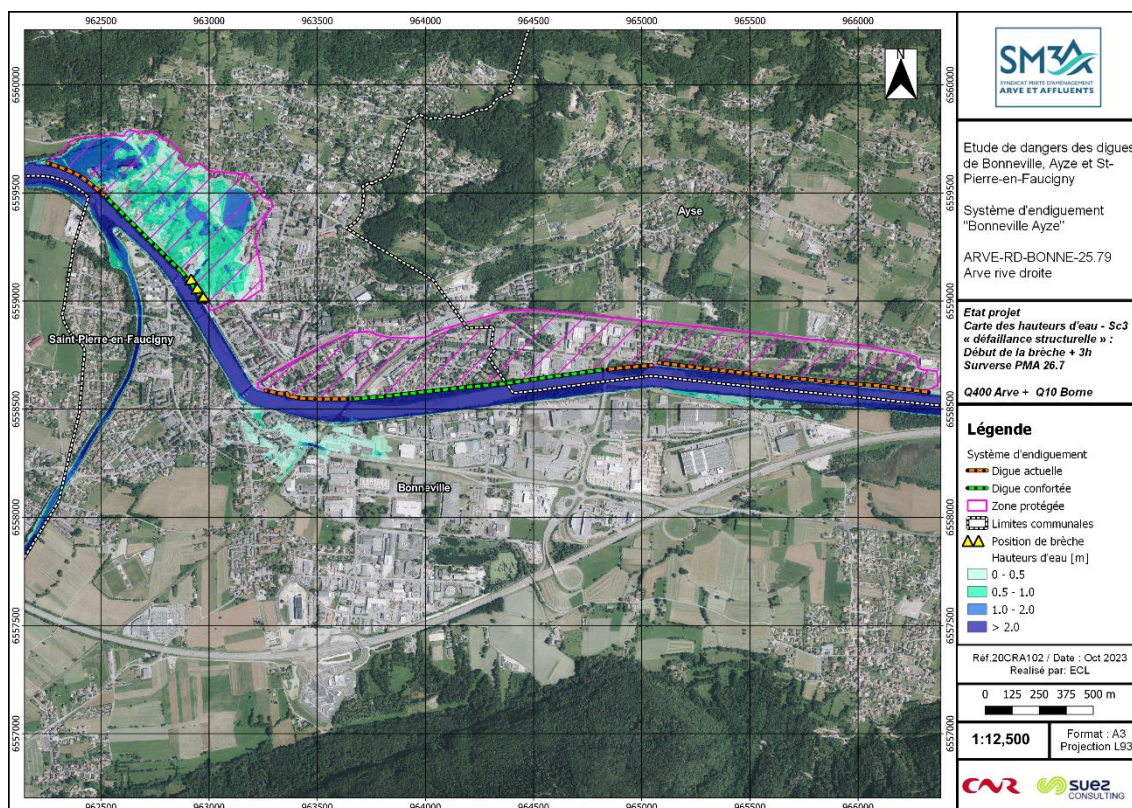


Figure 145 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.2 – T=2h après la rupture

**T=3h : remontée des eaux**

L'eau continue de remonter et on observe les venues dangereuses maximales au bout de 3h.



Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

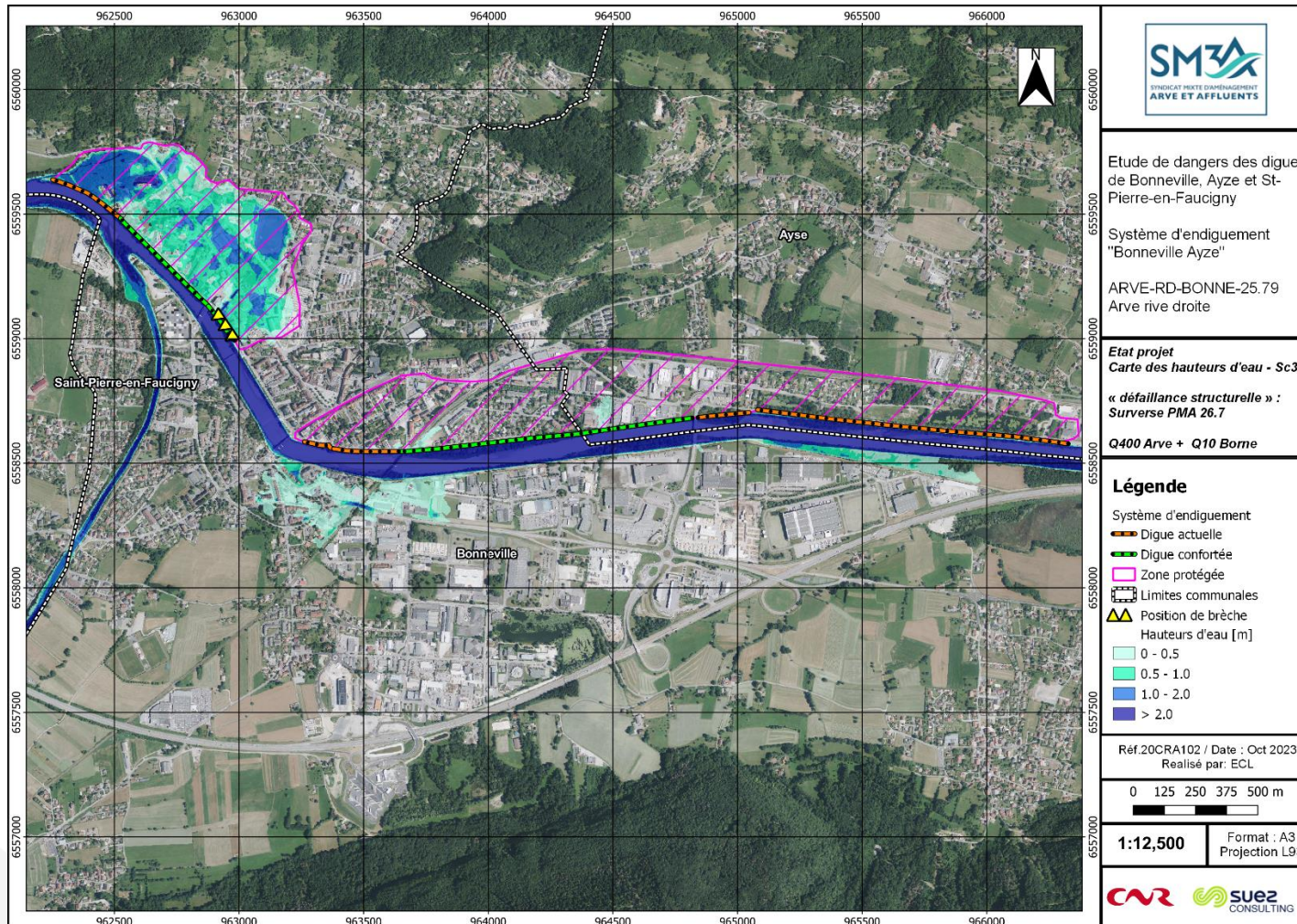


Figure 147 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

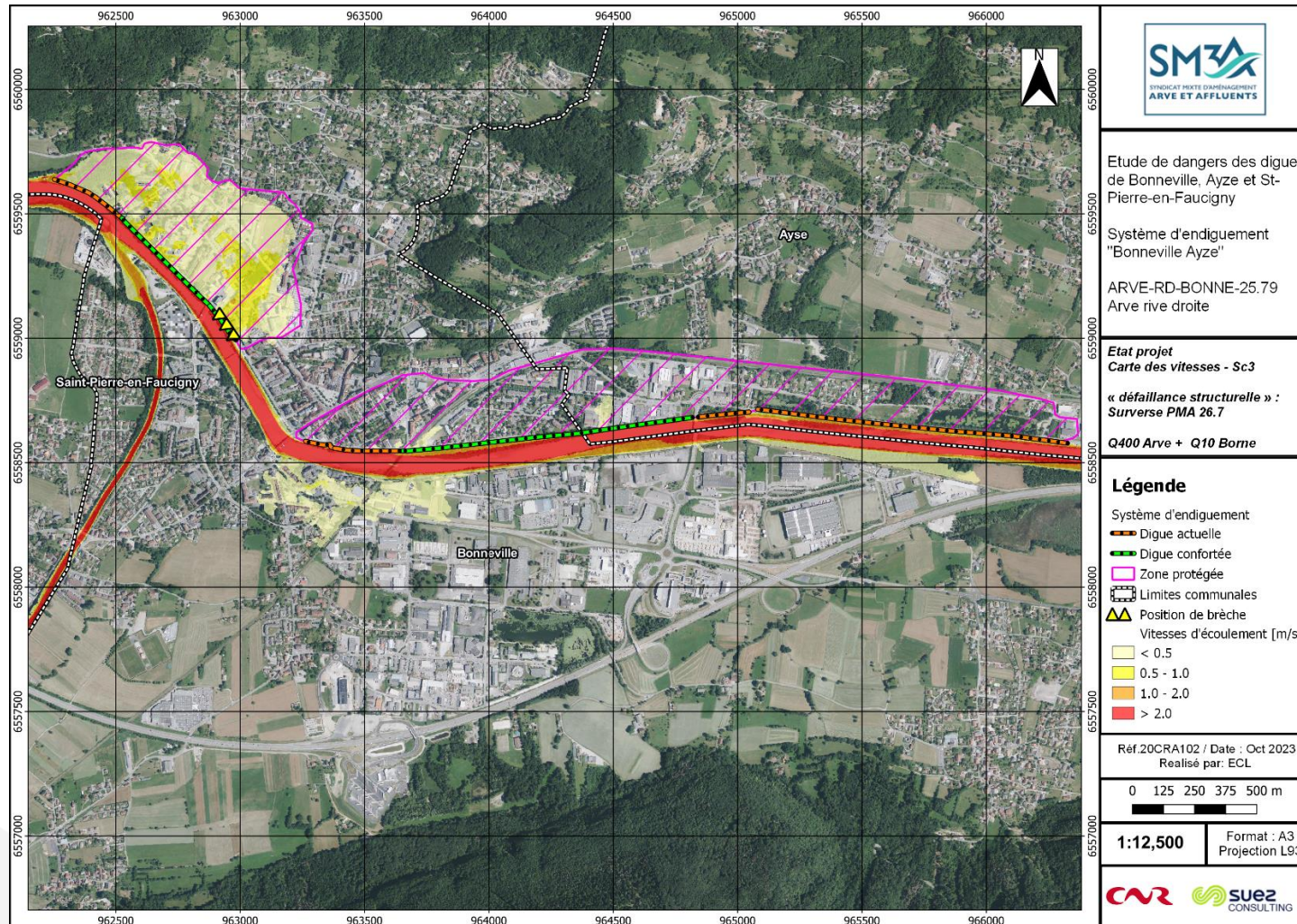


Figure 148 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

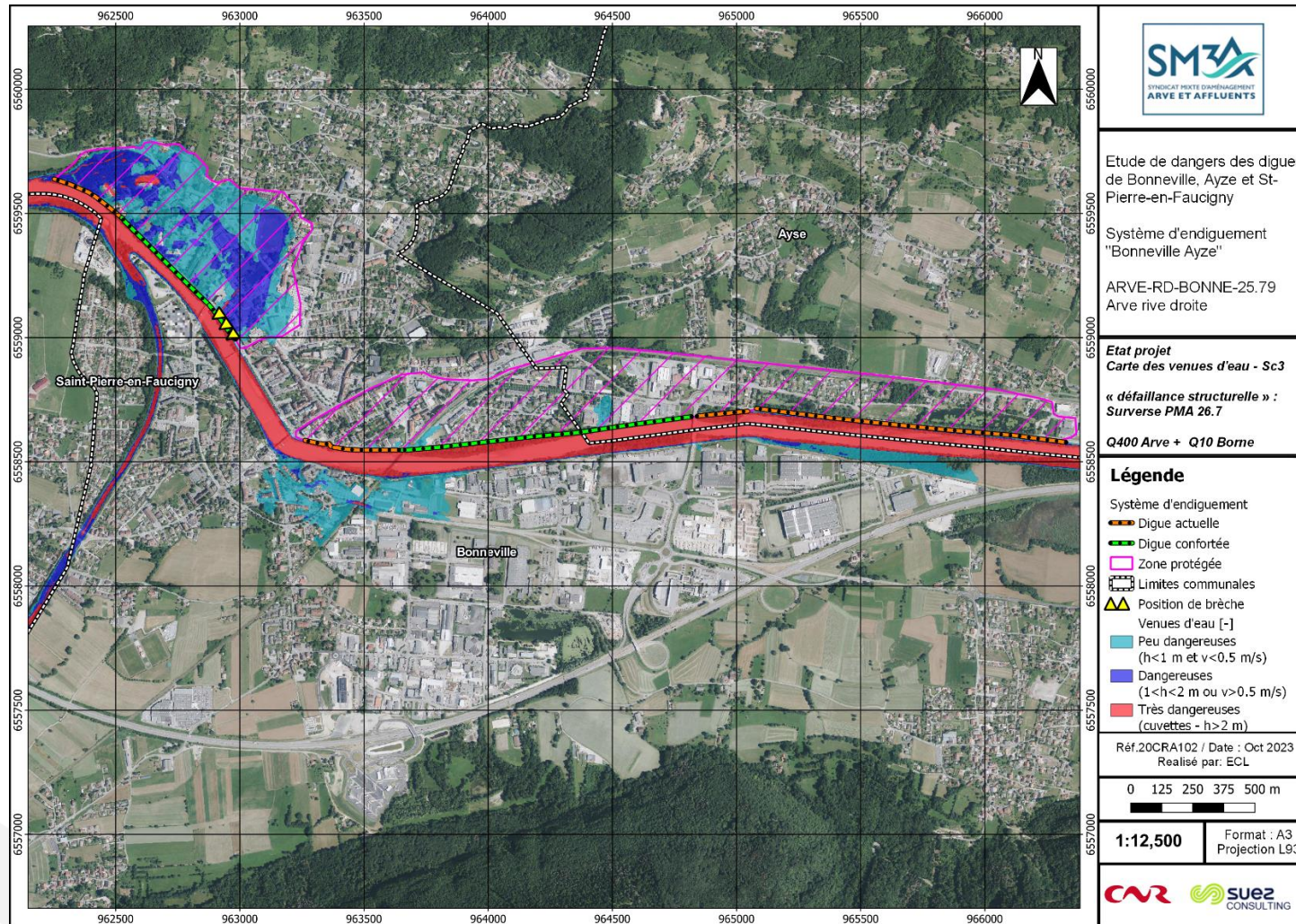


Figure 149 : Cartographie des venues d'eau du scénario 3.2

## 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 événements 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 droite.

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 sont 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 Ayze ».

### 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

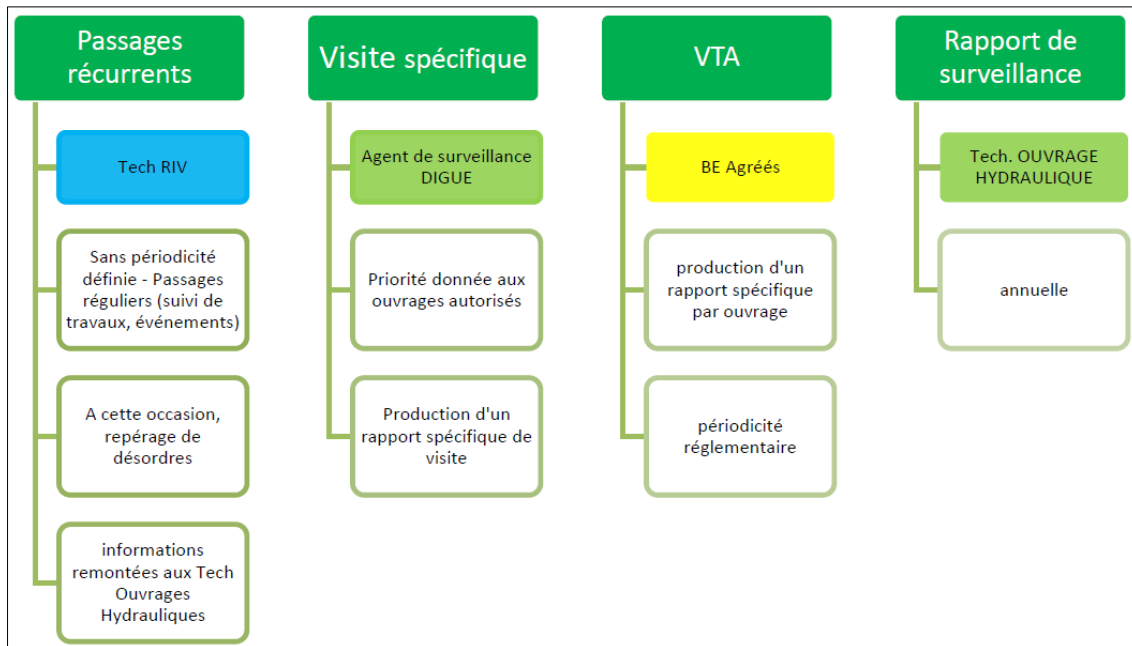
Un certain nombre de véhicules sont disponibles pour réaliser les visites et autres interventions sur le terrain. Le détail de ces véhicules et du matériel nécessaire pour le suivi sur le terrain sont précisés dans la consigne générale de surveillance (réf. [DA12]).

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 :



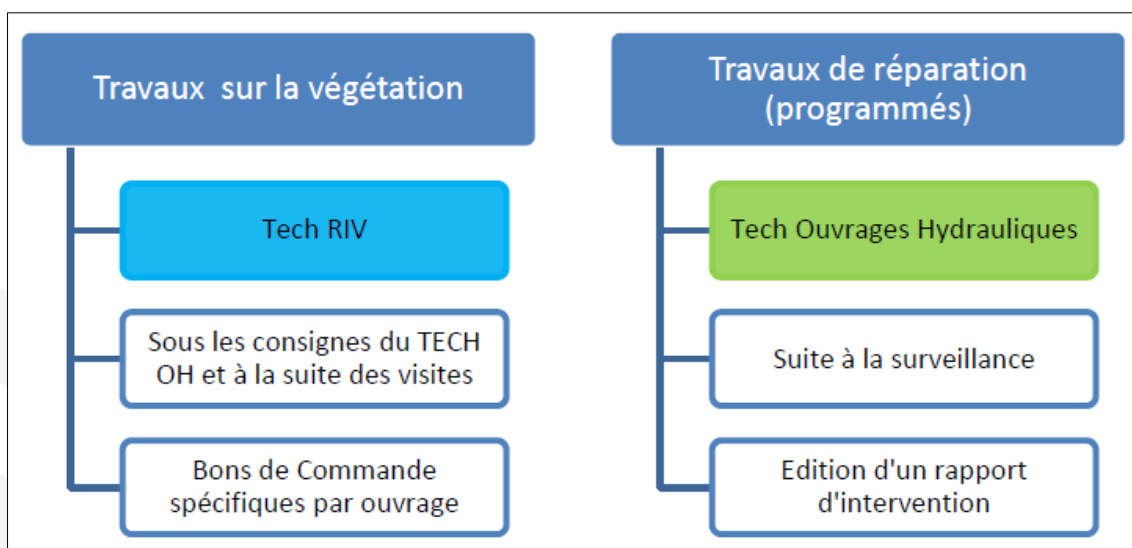
Pour faciliter les échanges entre Pôle « prévention des inondations » et « entretien et surveillance des cours d'eau », une réunion annuelle est organisée en février ou mars. A cette occasion, sont données les consignes d'entretien de la végétation sur les ouvrages classés. De même, des réunions bimensuelles 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.

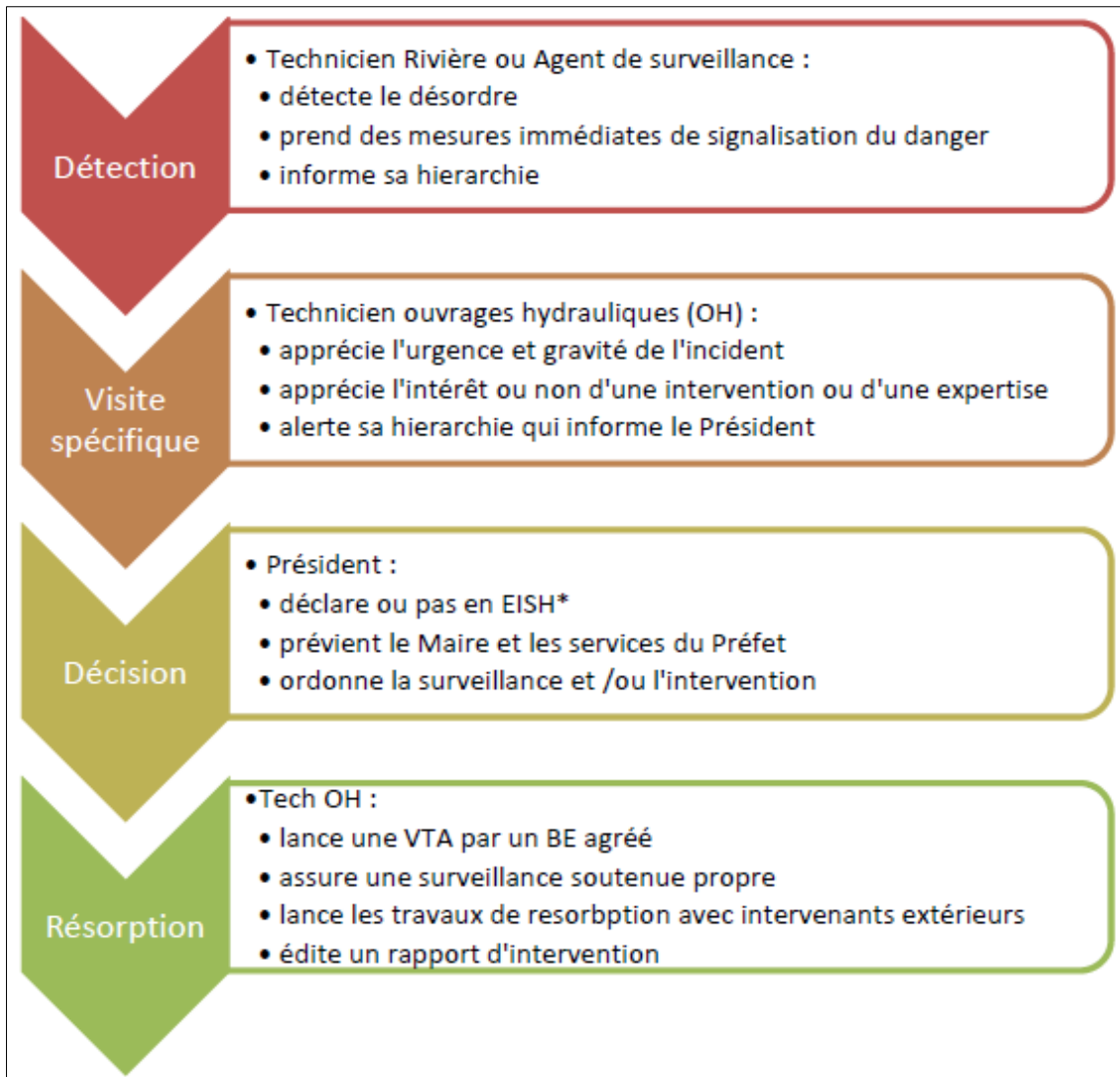
### 9.1.3 Organisation des interventions programmées

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 limnigraphique 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, engravement 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 « Digues 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 limnimétrique 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 43 : 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

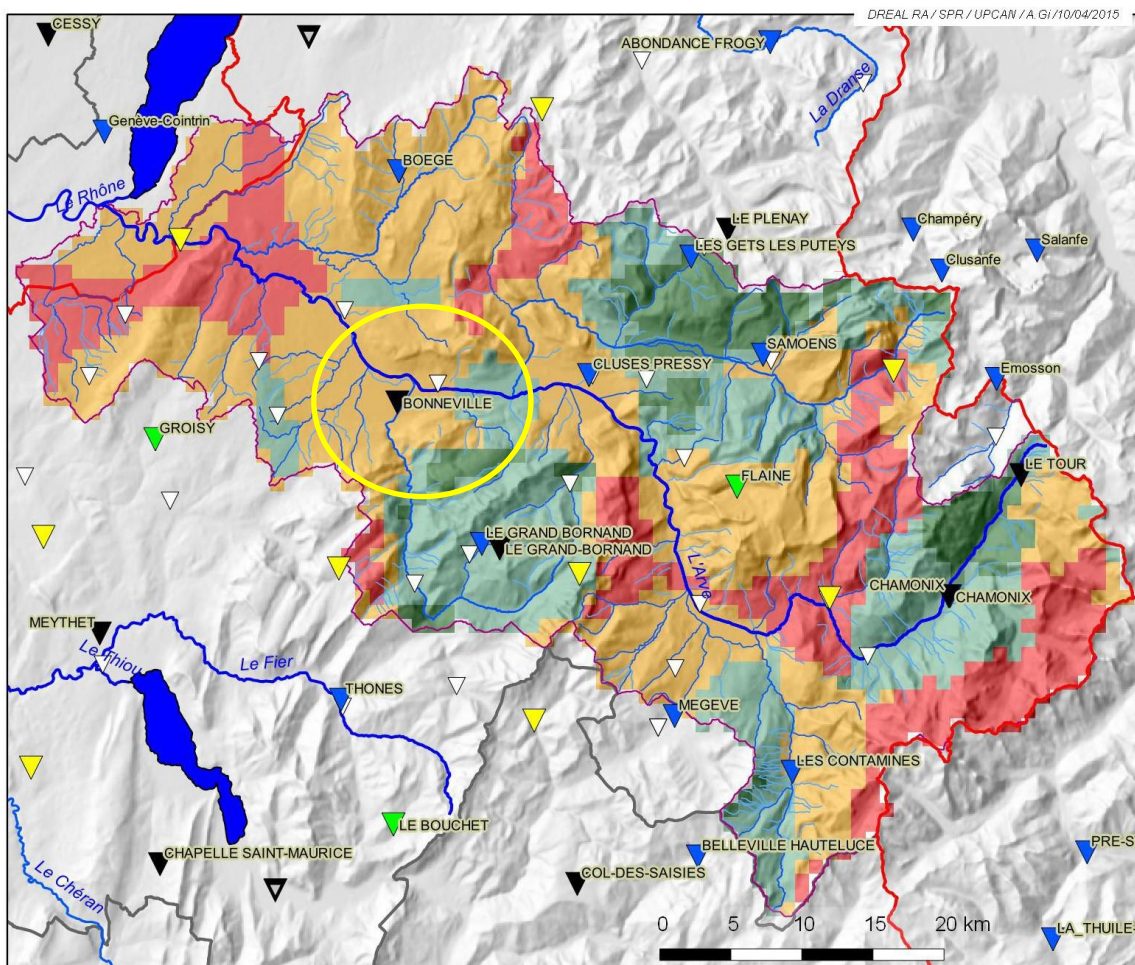
Le bassin versant de l'Arve se caractérise par :

- 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"

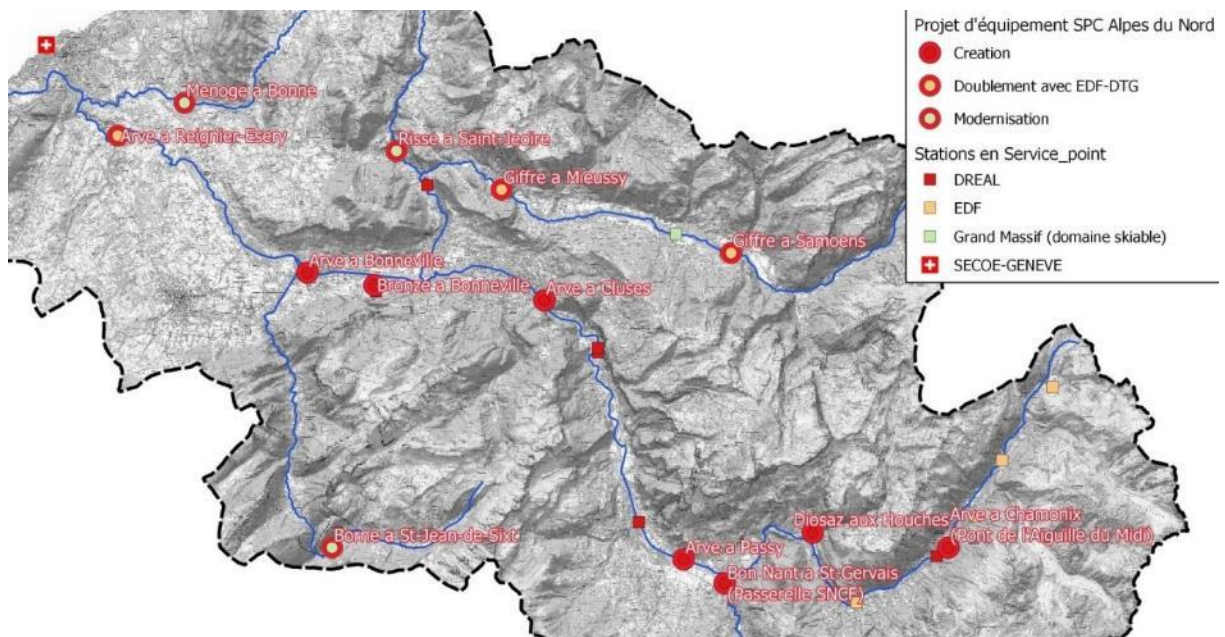
- Limite du SPCAN
- Limite du bassin versant de l'Arve
- Limite départementale

*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 :

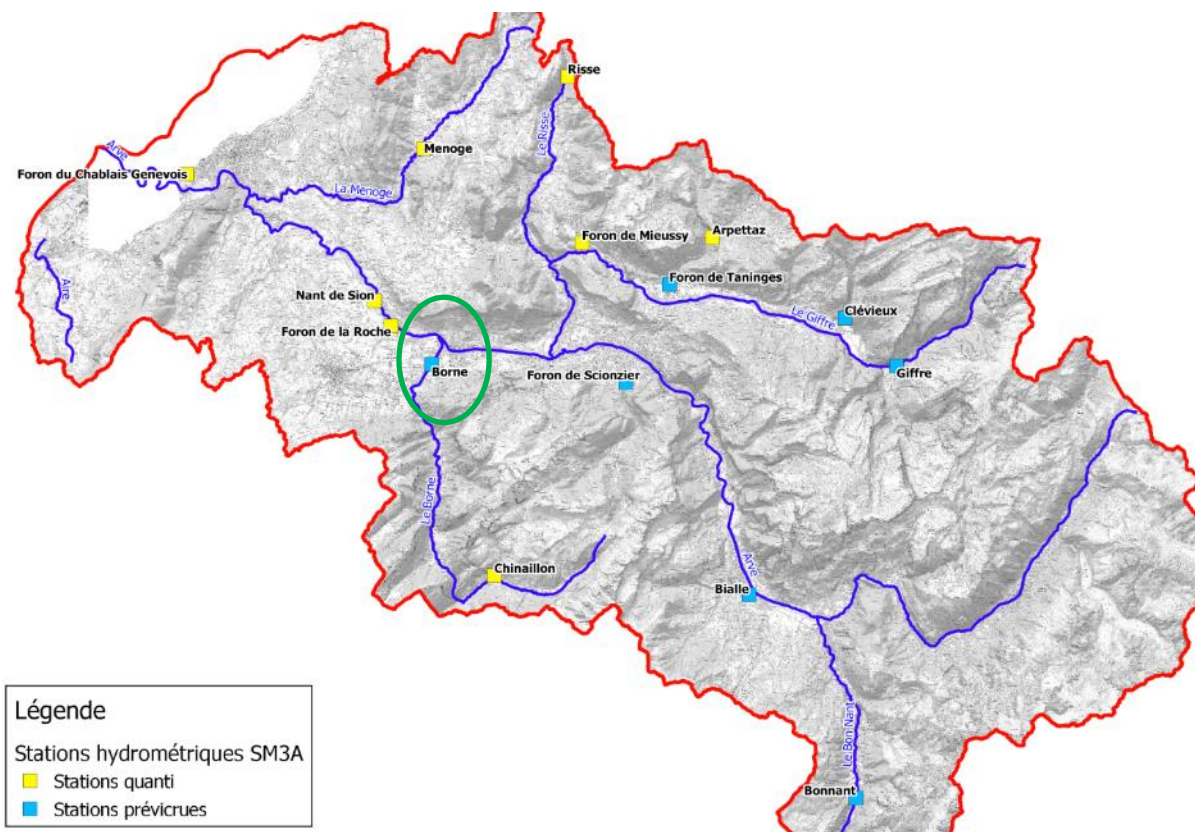
- 11 stations DREAL (pas de temps de 10-12 min)
- 2 stations EDF (pas de temps de 1 heure)
- 2 stations Canton de Genève (pas de temps de 25 min)
- 15 stations SM3A, dont 7 à vocation d'alerte en crue et 8 pour la quantification de la ressource en eau (mesure de hauteur avec courbes de tarages provisoires, 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 limnimétrique installées par le SM3A entre 2018 et 2021 avec pour objectif l'alerte en crue (stations « précivues ») 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 les 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 :

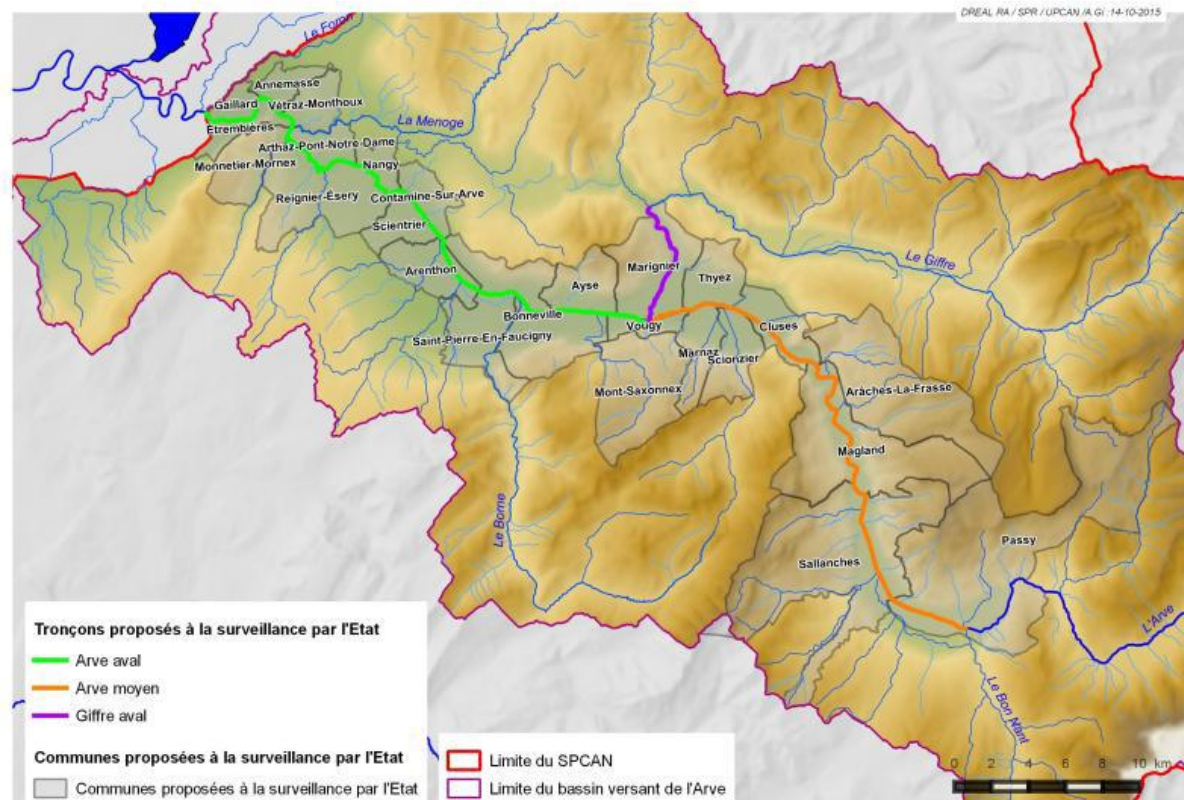
- L'envoi d'un SMS : 1 série de 4 numéros de téléphone. Appel en cascade : le premier ne validant pas la réception du SMS, le second numéro est contacté jusqu'à l'obtention d'une réponse par retour de code.
- L'envoi de Mails sur plusieurs adresses (3 adresses spécifiques + mail général SM3A)

#### 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 Vigicrues depuis 2020

Les tronçons Vigicrues actuellement opérationnels sont : Arve aval, Arve médian et Giffre aval. Les sous-bassins versant situés en amont de ces tronçons Vigicrues 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	RSS
	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 Vigicrues 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	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 <sup>er</sup> 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 le 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
	22 sept 1968	4m30		4m30 à 4m50	540 à 580 m³/s
	1 <sup>er</sup> mai 2015	3m91	456 m³/s		
				3m30 à 3m50	330 à 370 m³/s
	23 déc 2022	3m14	293 m³/s		
	.31 mai 2010		210 m³/s à Taninges		
	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)*

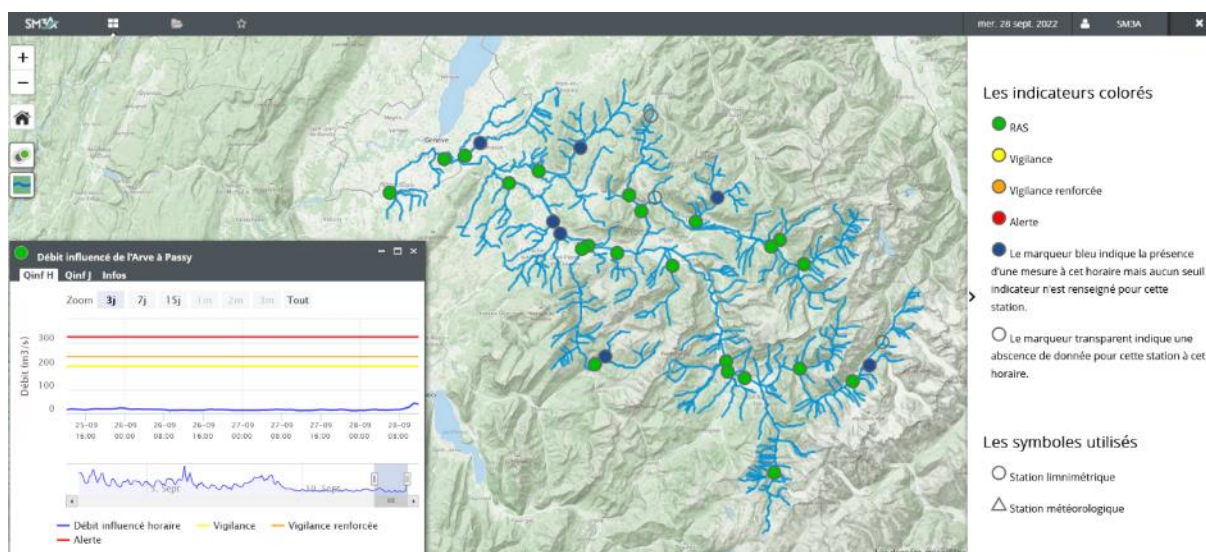
#### 9.4.2.3 Outils de prévision du SM3A

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**

Le 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 LPN 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 lumineuse.

**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. Les cumuls 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. Hydraulicités 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 belles 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. Hydraulicités 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, le suite s'accorde sur un retour durable de conditions sèches.

**Mentions spécifiques** :

Probabilité de dépassement des seuils :

Faible Risque	Risque	FORT RISQUE
0%	10%	50%
0%		100%

**PRÉVISION DES PLUIES ET DES DÉBITS**

Régions	Précipitations probables (mm)		Prévision des débits moyens journaliers (m <sup>3</sup> /s)			
	J 0h à J+1 0h	J+1 0h à J+2 0h	Bassins	J-1 Q obs	J Q prévu	J+1 Q prévu
Arve	40-70	5-15	Arve à Arthaz (1050 km <sup>2</sup> )	32	42	70
Fier	30-50	5-15	Fier à Vallières (1300 km <sup>2</sup> )	20	40	32
Tarentaise-Vanoise	20-40	2-5	Arve à Chamontix (199 km <sup>2</sup> )	5.1	11	12
			Giffre à Samoëns (Pont du Giffre) (199 km <sup>2</sup> )	8.4	13	22
			Arve à Passy (514 km <sup>2</sup> )	13	25	40
			Borne à Saint Jean de Sixt (85 km <sup>2</sup> )	0.6	3.5	4.5
			Foron du Chablais à Gaillard (38 km <sup>2</sup> )	0.0	1.2	1.0

📍 : localement plus, \* : estimé, \*\* : station défaillante, italiques : suivi particulier

**ALTITUDE DE L'ISOTHERME 0°C (m)**

	ALPES DU NORD (Chamonix)			
	Aujourd'hui		Demain	
12h	2400	2100	12h	2400
				2100

Exemple de bulletin hydrométéorologique produit plusieurs fois par semaine pour le SM3A

Sur le même principe que celui de Vigicrues, 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

À la suite des 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 150 : 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 m<sup>3</sup>/s (h = 2.5 m) ;
  - Giffre à Marignier : Alerte à 200 m<sup>3</sup>/s (h = 2.60m) ;
  - Arve à Arthaz : Alerte à 530 m<sup>3</sup>/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 préformaté 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 44 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO**

Nom de la station	Code	Gestionnaire	Superficie du bassin versant (km <sup>2</sup> )	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 ;
- Être 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).

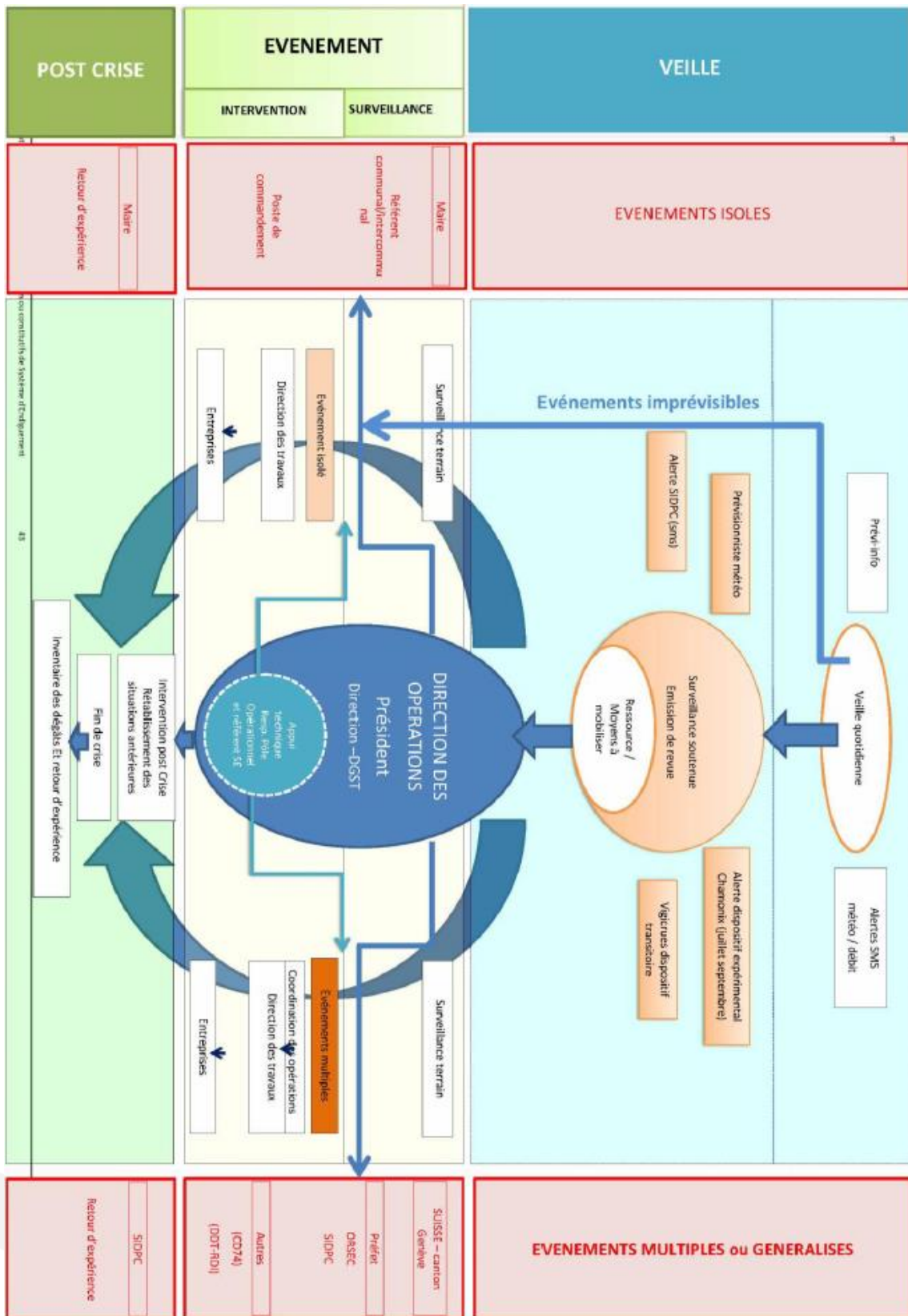


Figure 151 : Dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise

### 9.5.2.1 Une veille quotidienne

Une veille est assurée quotidiennement par l'ensemble des agents techniques du SM3A au travers des éléments décrits au § 9.4.2 :

- 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 (intervention 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 importants 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 qu'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 Digues 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 152 : 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 (cf. 9.4.2). 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 surrisque 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 une décote de 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 Fiabilisation de la fermeture vanne Castorduc / Madeleine

A l'issue de la présente étude de dangers, il a été mis en évidence dans l'analyse de scénarios de défaillance fonctionnelle la possibilité de venues d'eau en aval du système d'endiguement en cas de dysfonctionnement de :

- La vanne de régulation du ruisseau de la Madeleine sur le tronçon Centre T02 – JB Rey ;
- La vanne de fermeture du Castorduc au droit du petit Lac d'Ayze.

Ces vannes doivent actuellement être manœuvrées manuellement en cas d'épisode de crue, afin de limiter les venues d'eau côté terre. Il était prévu, dans la version antérieure de l'étude de dangers du SE25.79, d'automatiser les vannes de fermeture du ruisseau de la Madeleine et du Castorduc.

Suite à la crue majeure de l'Arve de novembre 2023 et à un exercice de crise en mairie de Bonneville, il est finalement décidé par le SM3A de ne pas automatiser la fermeture de la vanne du ruisseau de la Madeleine pour les raisons suivantes :

- La vanne existante, bien que manuelle et nécessite un effort humain pour la fermer, est fonctionnelle ;  
En cas de fermeture de la vanne lors des crues de l'Arve, le ruisseau de la madeleine mettra en charge le réseau dans lequel il s'écoule, provoquant ainsi des inondations dans la ZP. En fonction du débit du ruisseau de la Madeleine - variable et difficile à anticiper - cette inondation peut être plus importante que celle que peut provoquer la remontée de l'Arve dans le réseau ;
- Afin de se prévenir de ce potentiel problème, un pompage du ruisseau sera nécessaire. Or, le dispositif de vannage existant ne comporte pas de regard de visite permettant d'installer une pompe ;
- Lors de la crue de novembre 2023, un suivi accru d'une remontée de l'Arve dans le réseau a été réalisée. Bien que la vanne soit laissée en position ouverte, aucune inondation n'a été constatée.

Il est donc recommandé par le bureau d'études :

- De mettre en place un clapet anti-retour dans l'ouvrage cadre situé en berge de l'Arve, en aval de la vanne de fermeture existante ;
- D'étudier la faisabilité de créer un regard de visite en amont de la vanne de fermeture afin de se laisser une possibilité, en cas de fermeture de la vanne lors des crues de l'Arve, de pomper une partie du ruisseau de la Madeleine.

Le SM3A s'engage sur ces deux recommandations.

Concernant le Castorduc, la commune d'Ayze intègre dans son PCS la fermeture du réseau à partir d'une crue décennale de l'Arve. Cette modalité a été vérifiée lors de la crue de novembre 2023. Il n'est donc pas nécessaire d'automatiser la fermeture des deux vannes de Castorduc. Il est à noter qu'une attention particulière sera portée sur le Castorduc aval qui peut provoquer une inondation de la ZP en cas de défaillance.

### 9.1.2 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 (faisant l'objet de travaux) sur l'Arve (source CNR) est notamment conditionné par le secteur (TH 6 à 8), 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 sur ce secteur, nous préconisons que le maître d'ouvrage mette en place les consignes suivantes (sur l'Arve) :

**Tableau 45 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés pendant les travaux (digue de l'Arve rive droite)**

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 :

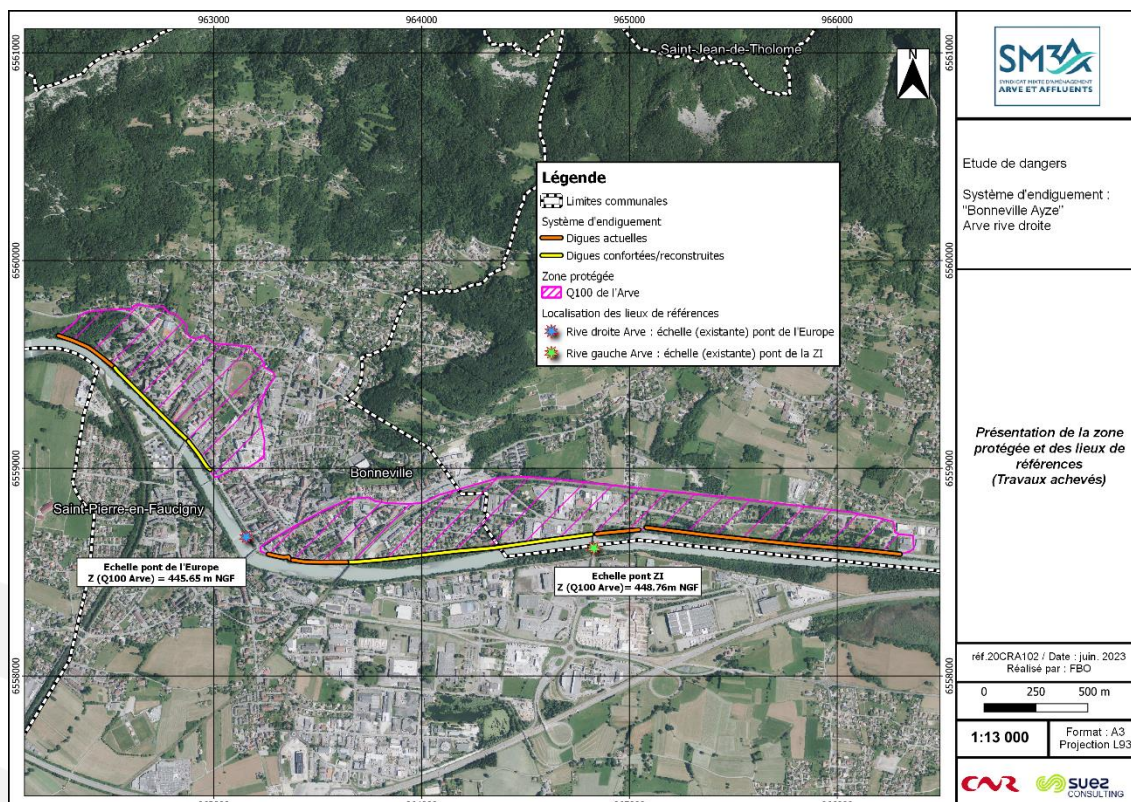
- **Activation de la cellule de crise ;**
- Définition des modalités d'information du SIDPC et de coordination.

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.

**9.1.3 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 153 : 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 l'Arve) :

**Tableau 46 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés après les travaux (digue de l'Arve rive gauche)**

Station/Lieu de référence	Stade	Débit Arve [m <sup>3</sup> /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

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.

### 9.1.4 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.

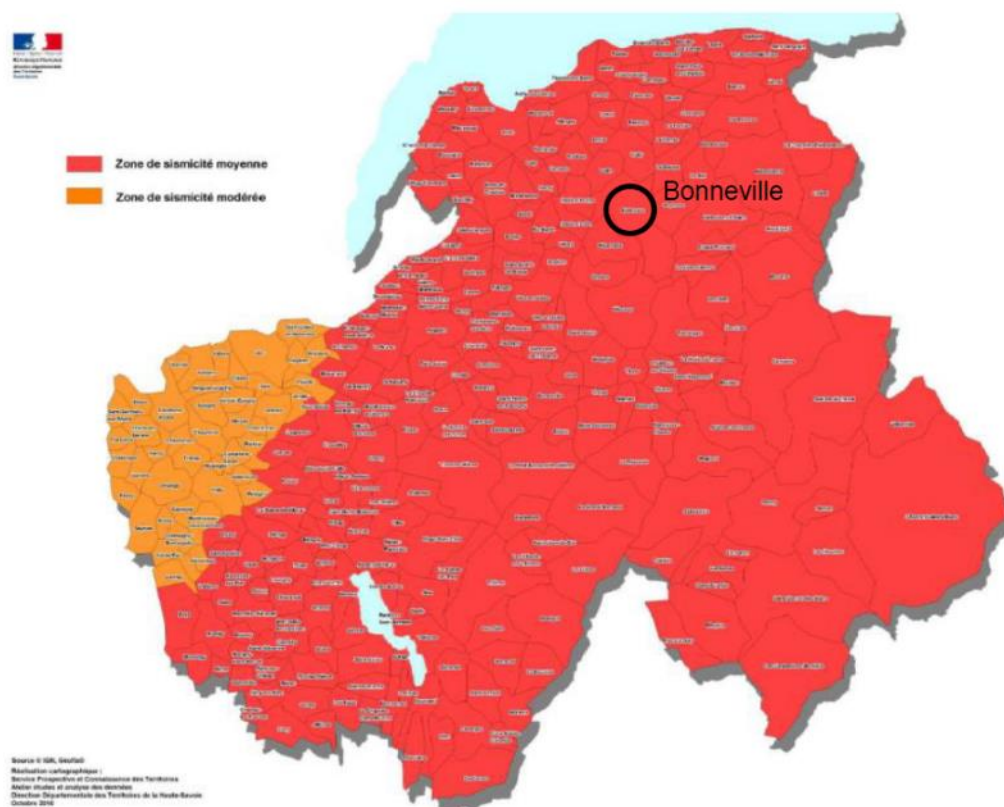


Figure 154 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source [www.haute-savoie.gouv.fr](http://www.haute-savoie.gouv.fr)

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.

### 9.1.5 Investigations complémentaires – RD19

L'analyse menée dans le diagnostic approfondi au chapitre 7 de la présente étude de danger a montré une nécessité de réaliser des investigations complémentaires sur le tronçon de la RD19 afin de s'assurer de la tenue de la digue pour les différents mécanismes d'érosion interne.

Ces investigations pourront être réalisées dans le cadre de la phase PRO des études pour le confortement des digues en rive droite de l'Arve.

### 9.1.6 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 limnimétrique ;
- Impliquer des acteurs extérieurs lors des exercices de crise (mise à jour des PCS) ;
- La lutte contre les dégâts des animaux fouisseurs.

### 9.1.7 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 l'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

### 9.1.8 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 survenue 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 Ayze ».

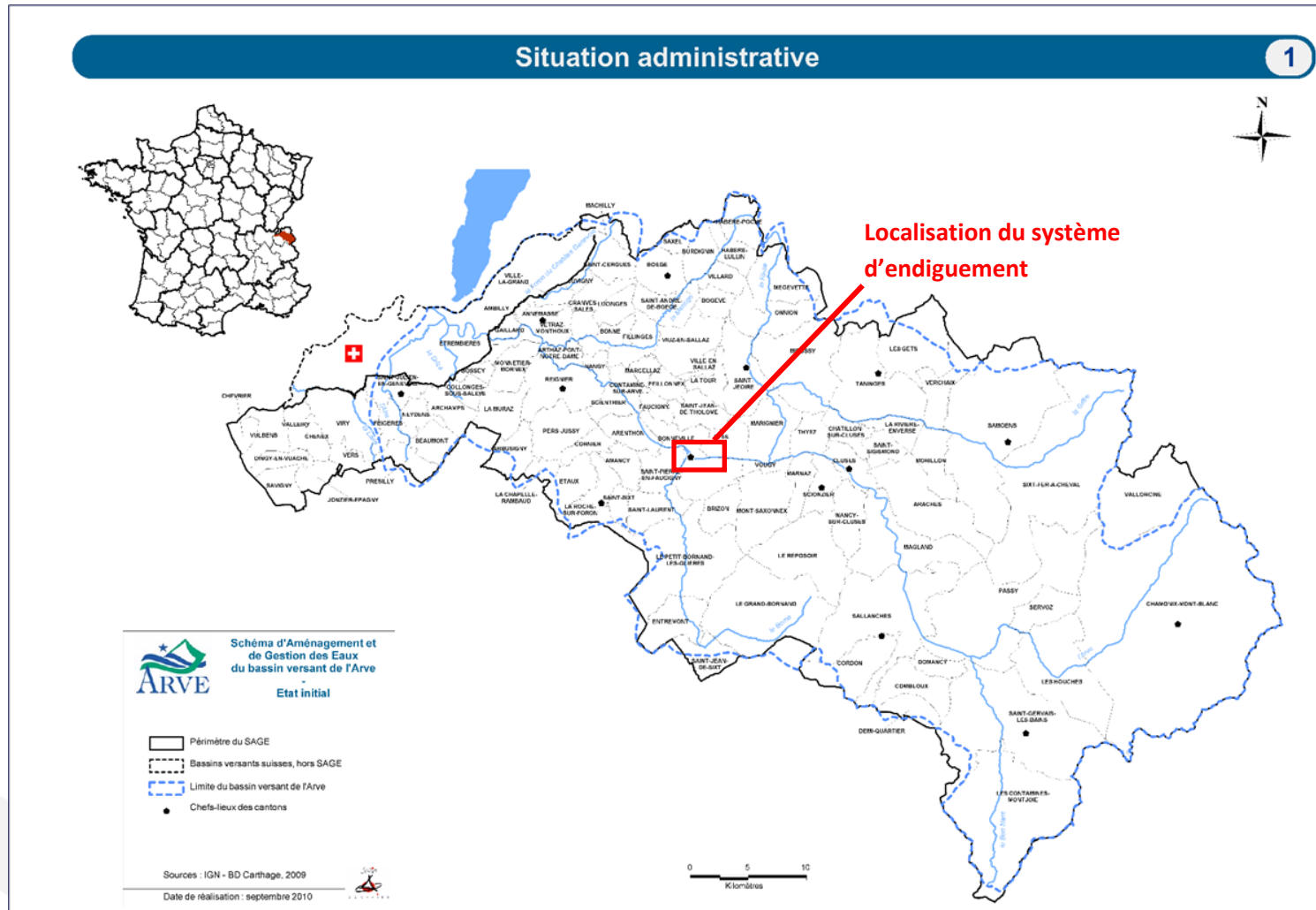
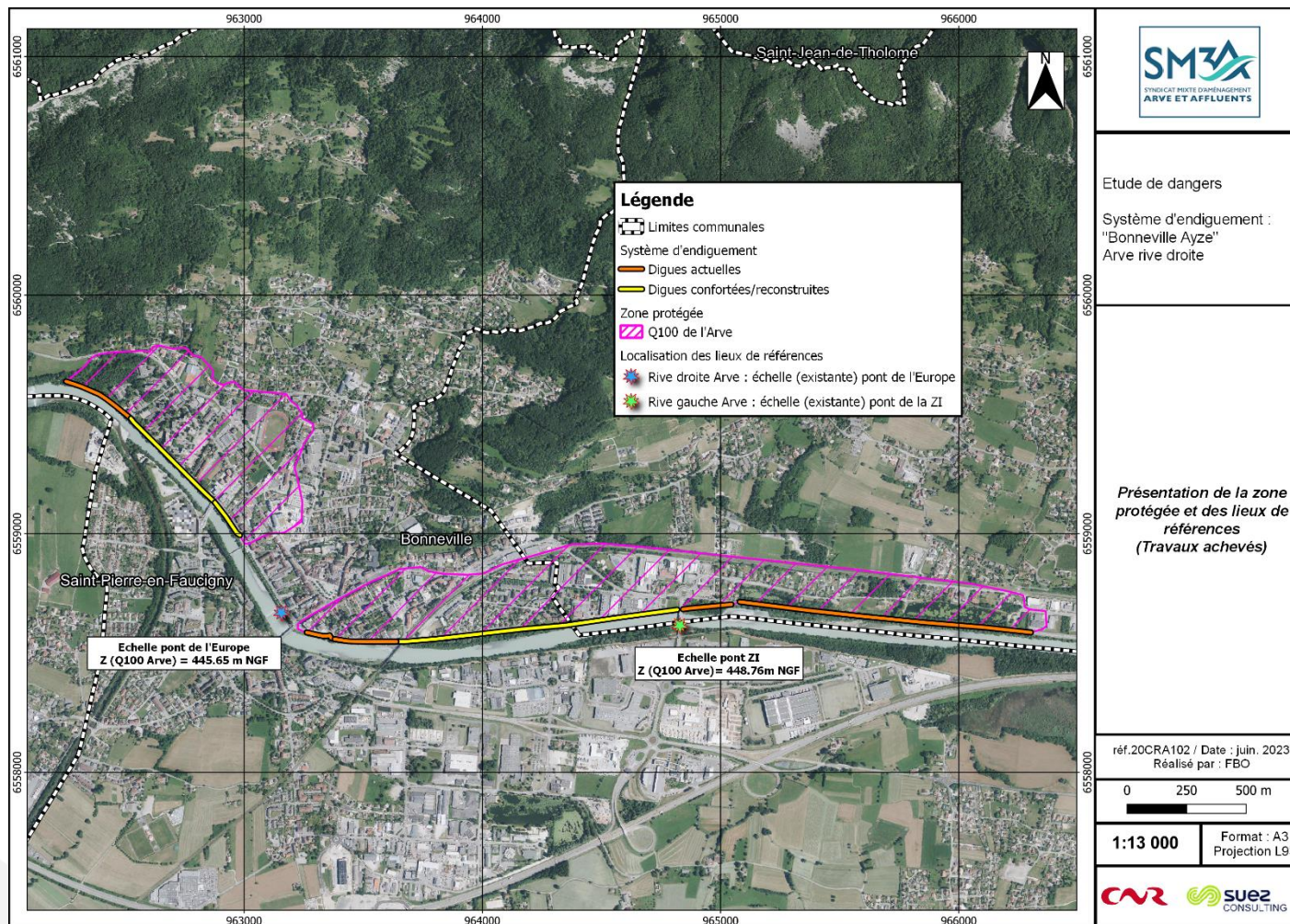


Figure 155 : Limites administratives du territoire relevant du SM3A

# Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE



Etude de dangers  
Système d'endiguement :  
"Bonneville Ayze"  
Arve rive droite

Présentation de la zone protégée et des lieux de références  
(Travaux achevés)

Figure 156 : 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) :

Tableau 47 : Niveau de protection du système d'endiguement après travaux

Digue	Lieu de référence	Niveau de protection au point de référence (NGF) et occurrence associée S1	
		Niveau	Crue
ARVE RD état projeté	Pt de la ZI	448.76 mNGF	Q100 Arve (1081.0 m <sup>3</sup> /s) + Q Borne (90.0 m <sup>3</sup> /s) + Q Bronze (13.0 m <sup>3</sup> /s)
	Pt de l'Europe	445,65 mNGF	

Aucune venue d'eau ne survient dans la zone protégée.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayeze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayeze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

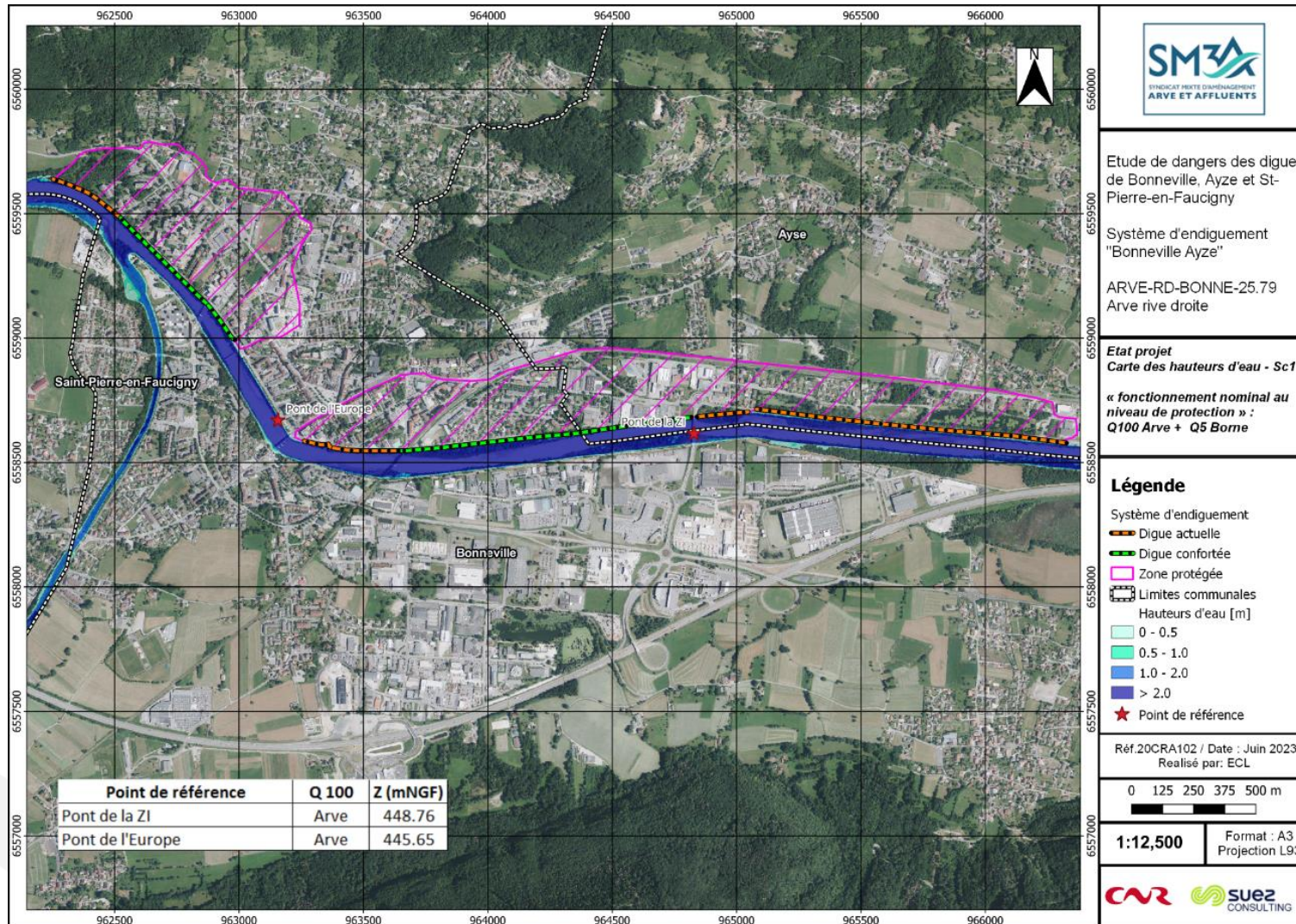


Figure 157 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

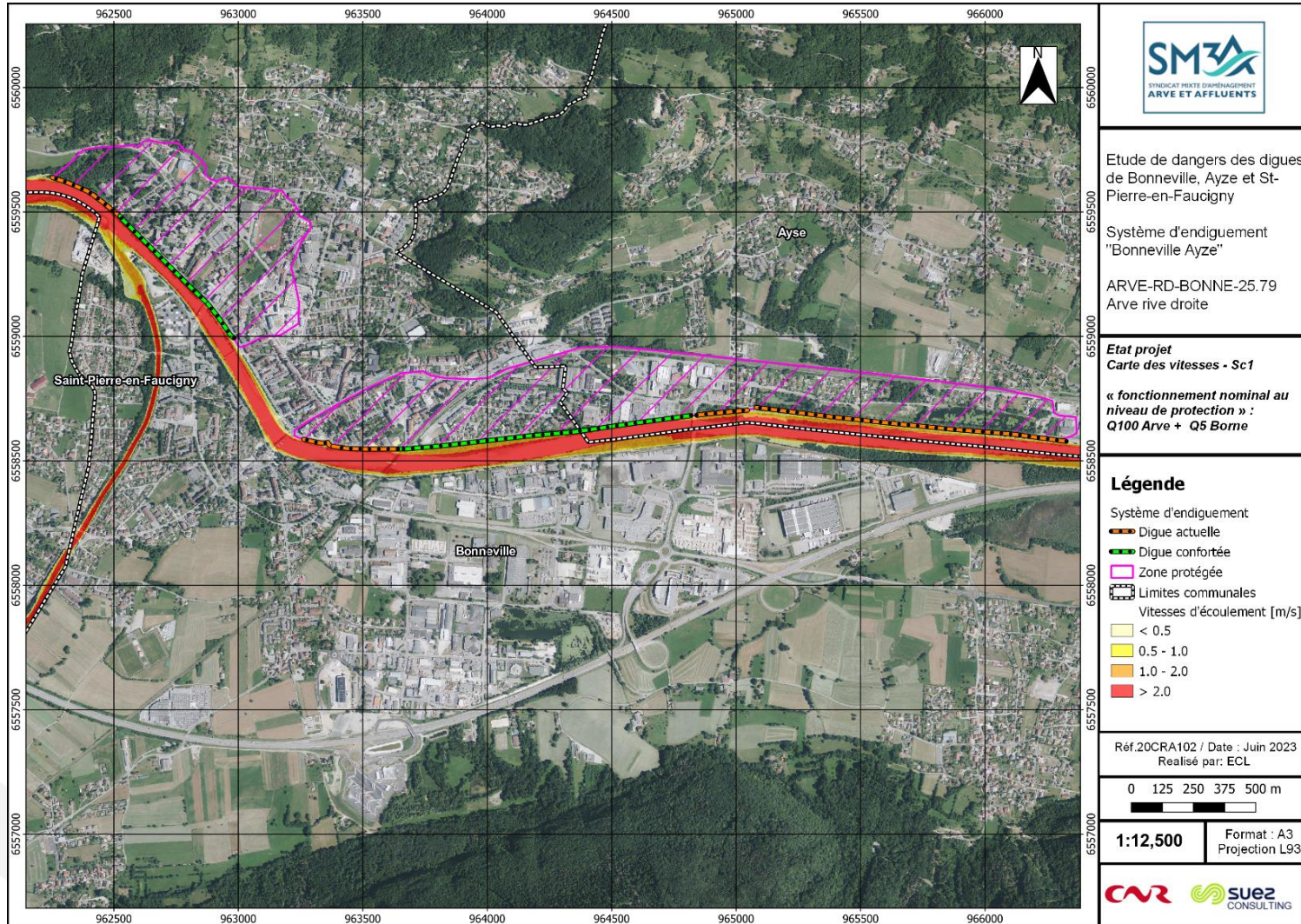


Figure 158 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 1

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayeze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayeze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

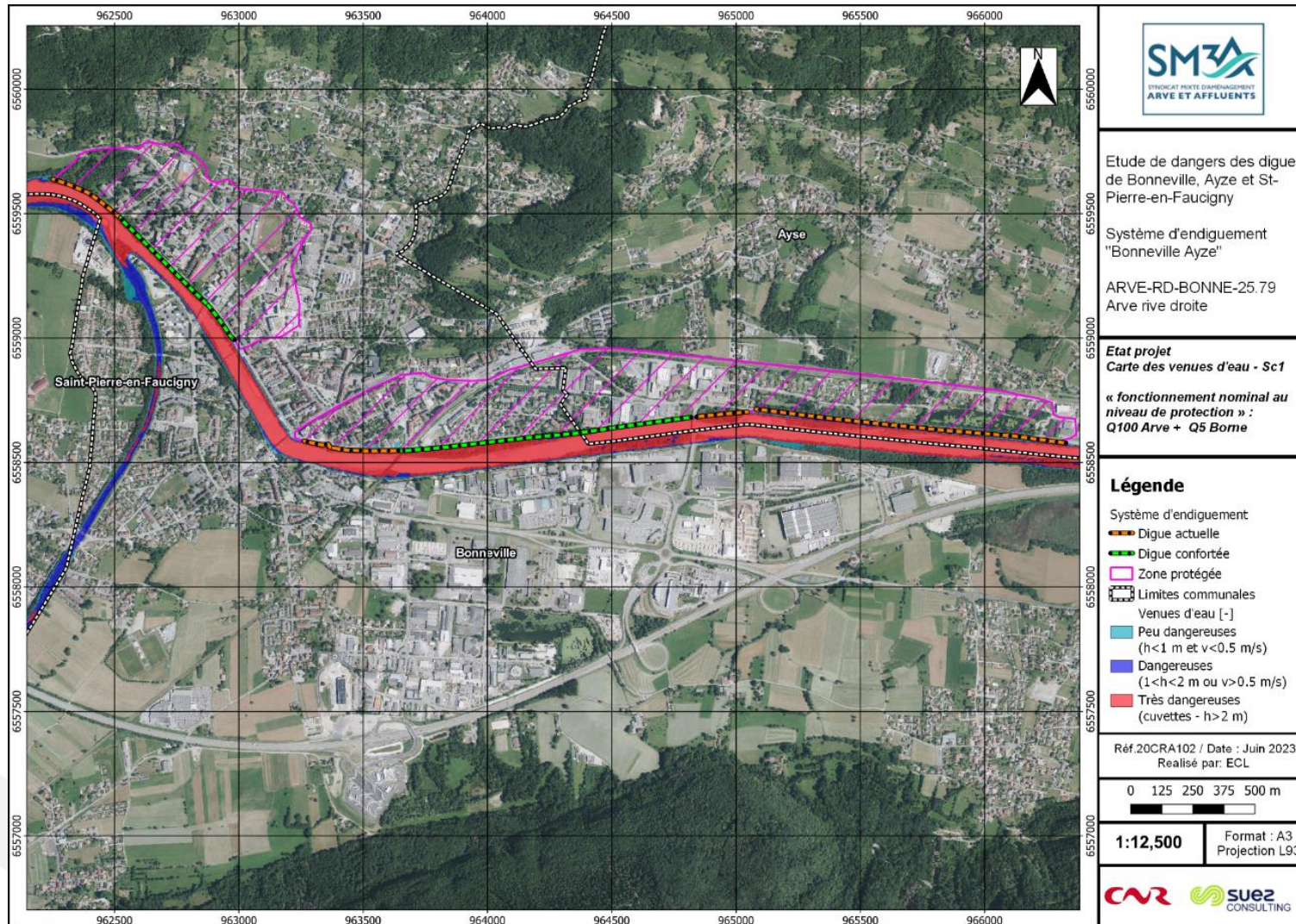


Figure 159 : Cartographie des venues d'eau du scénario 1

## 10.3 Scénario 2 : Défaillance fonctionnelle

Pour les défaillances fonctionnelles, 2 simulations ont été réalisées à la suite du repérage et du diagnostic des réseaux traversants les digues :

- Vanne de fermeture du réseau « Ruisseau de la Madeleine » qui reste en position ouverte pendant la crue centennale de l'Arve ;
- Vannes de fermeture du réseau « Castorduc » qui restent en position ouvertes pendant la crue centennale de l'Arve.

### 10.3.1 S2.1 : Défaillance fonctionnelle du ruisseau de la Madeleine

L'exutoire du ruisseau de la Madeleine est présent au niveau du tronçon centre T01 – Poste, en aval direct du pont SNCF.



Figure 160 : Vanne de régulation du ruisseau de la Madeleine, et exutoire en rive droite de l'Arve

La défaillance de cette vanne, pour la **crue centennale** (équivalent au niveau de protection), entraîne des venues d'eau peu dangereuses et très ponctuelles qui n'impactent pas les zones à enjeux.

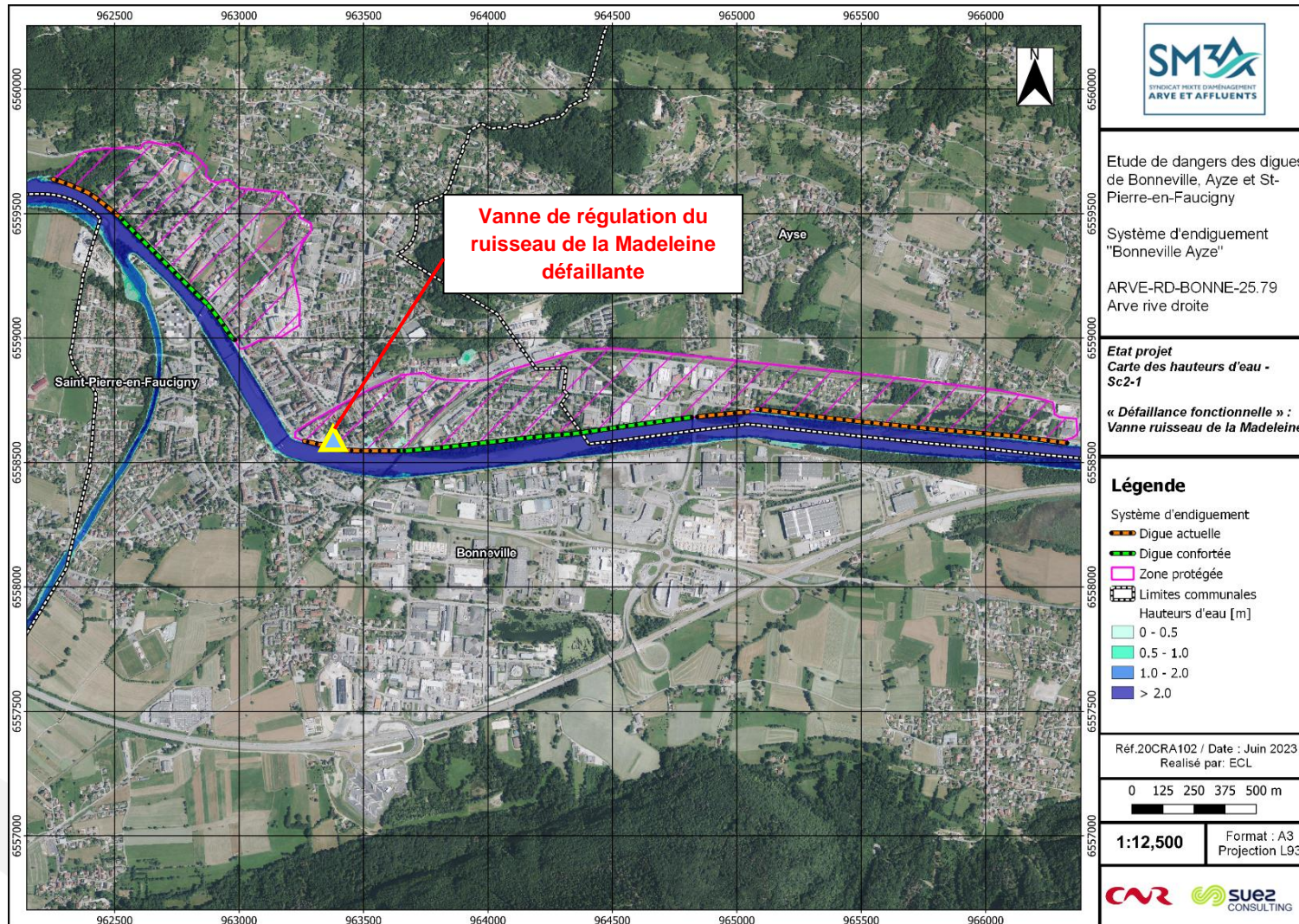


Figure 161 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.1

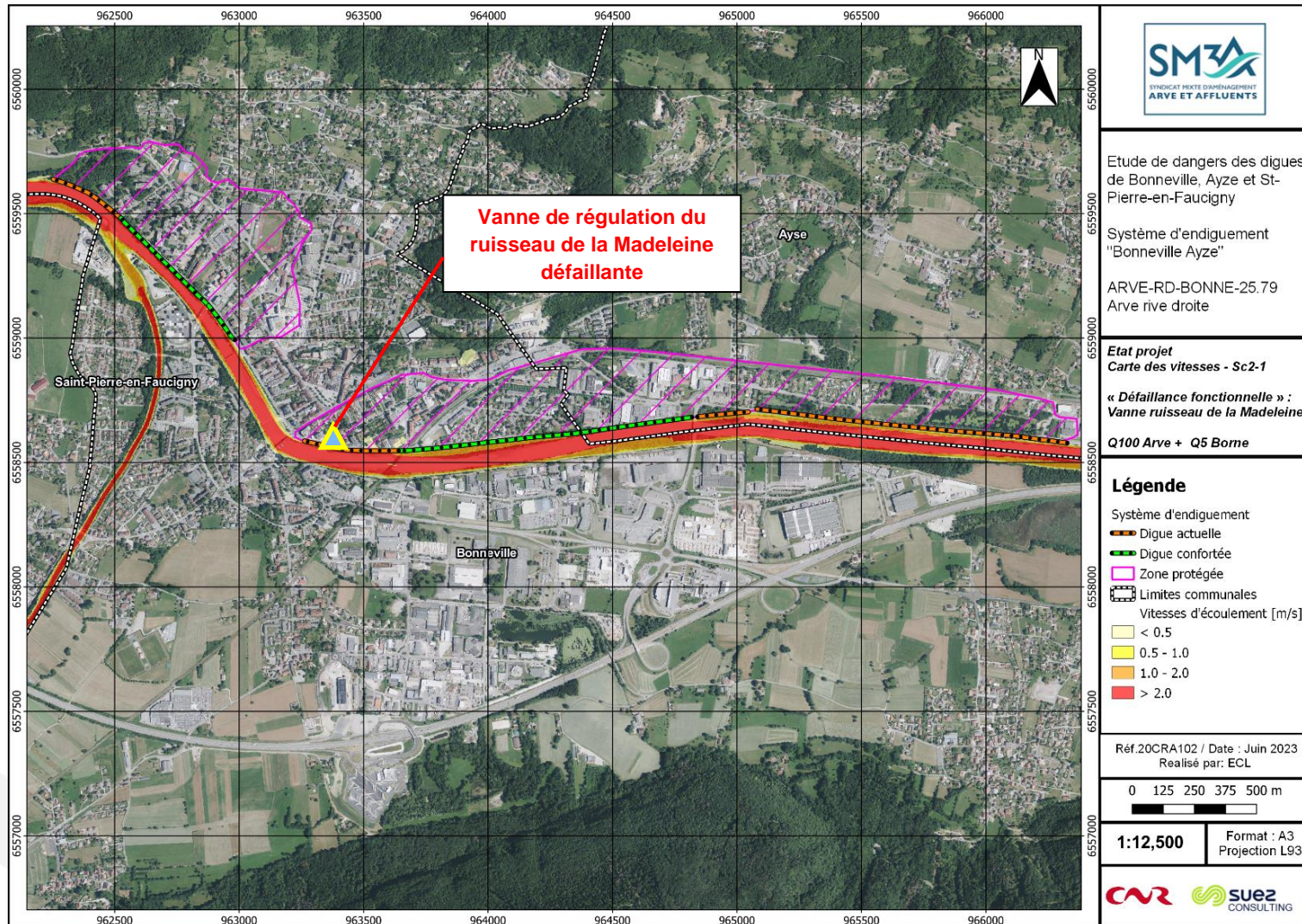


Figure 162 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.1

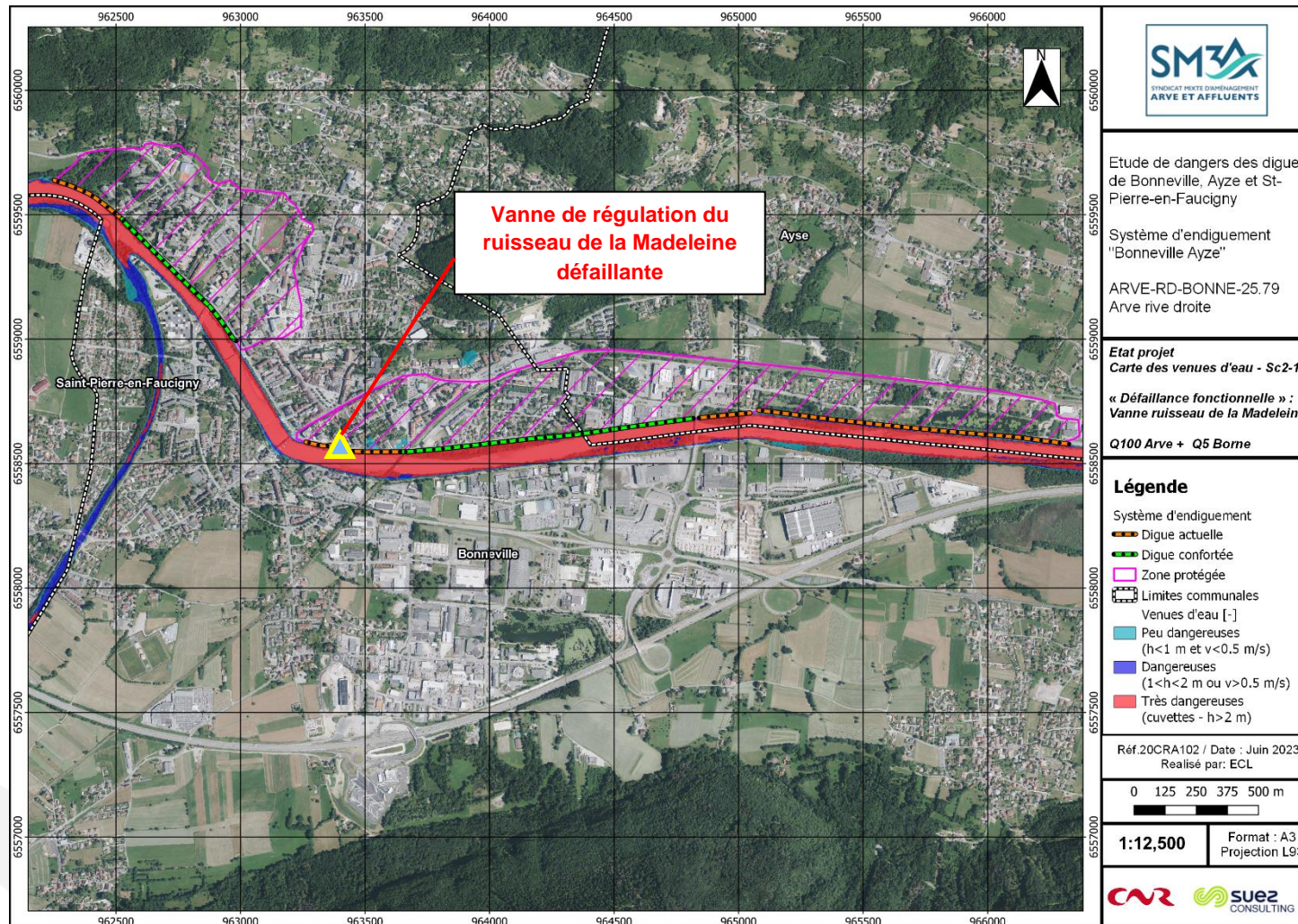


Figure 163 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.1

### 10.3.2S2.2 : Défaillance fonctionnelle des Castorduc amont et aval

Les castorduc dont nous étudions la défaillance sont situés sur le tronçon de la RD19. Ils sont au nombre de deux et sont équipés de vannes de fermetures (du côté protégé).



Figure 164 : Castorduc traversant l'ouvrage RD19 (VTA CNR 2017)

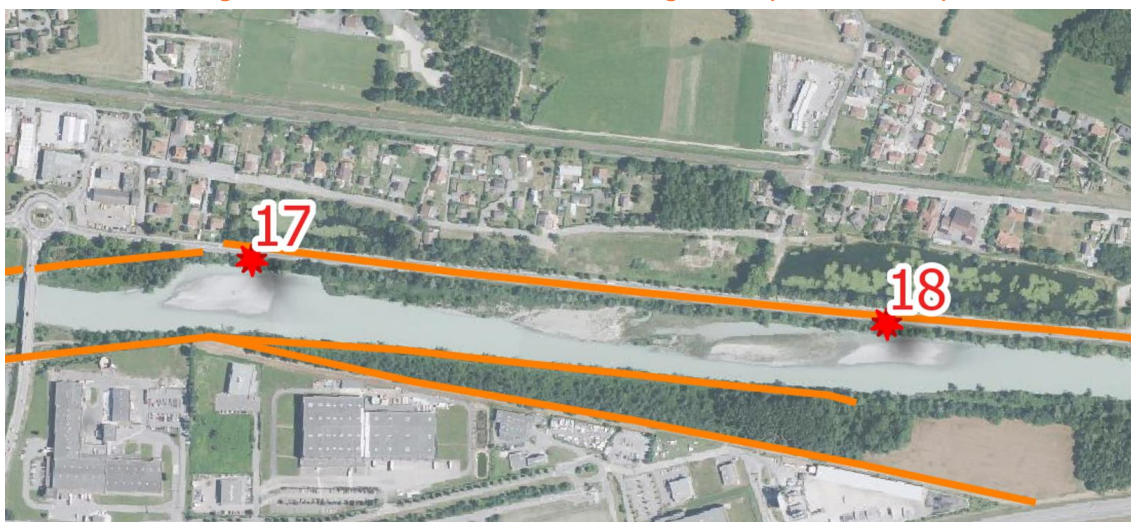


Figure 165 : Position des deux castorduc sur la RD19

La défaillance des deux vannes (vannes qui restent en position ouverte), pour la crue centennale (équivalent au niveau de protection), entraîne des venues d'eau peu dangereuses à dangereuses au droit des habitations.

Il a été modélisé l'ouverture des deux castorducs dans la même simulation, sans impact sur les venues d'eau.

Ces venues d'eau s'écoulent temporairement sur certains accès (notamment l'avenue Guy Chatel). Les vitesses d'eau sur ces accès restent cependant limitées (<1m).

On retrouve la cinétique de dysfonctionnement suivante :

**T=0 h : dysfonctionnement de la vanne de régulation**

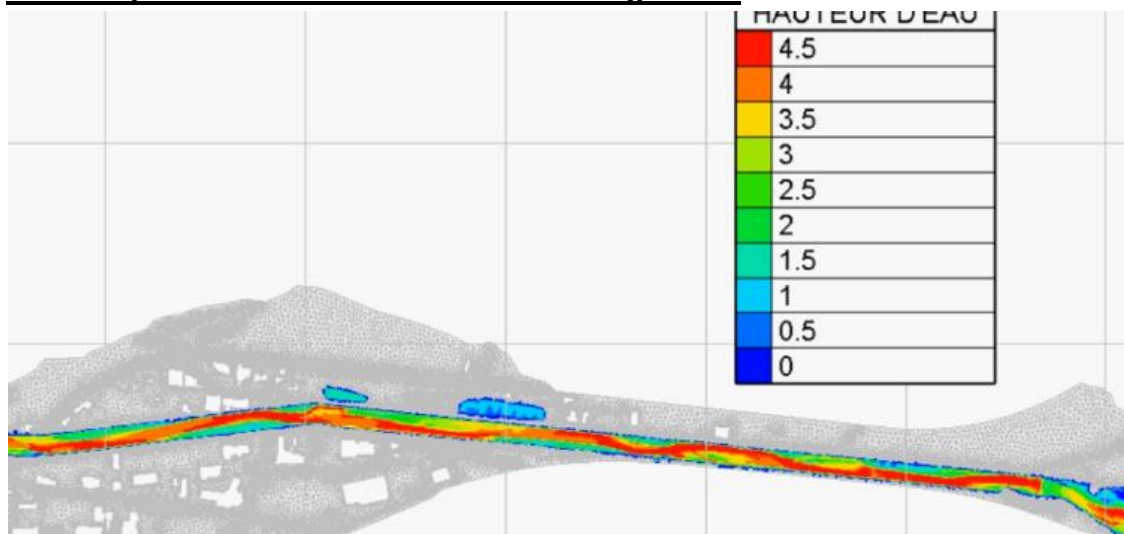


Figure 166 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=0h après la défaillance de la vanne

**T=1h : débordement du bassin**

Le bassin côté terre de la RD19 se remplit et commence à déborder sur sa partie nord-ouest.

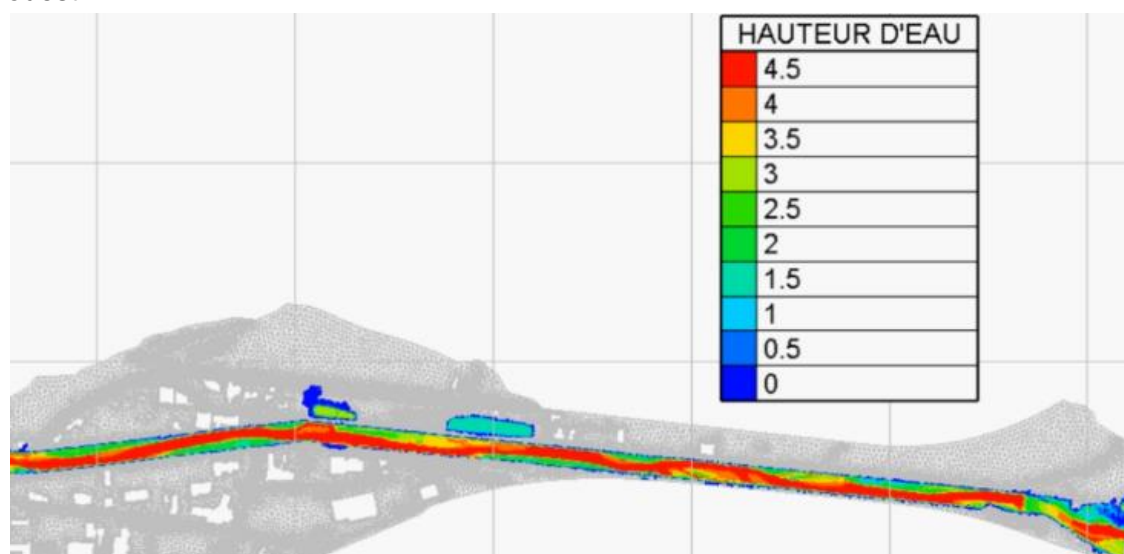


Figure 167 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=1h après la défaillance de la vanne

**T=2h : débordement sur Avenue Guy châtel**

Les eaux débordent sur l'avenue Guy châtel, et viennent s'écouler le long de la voie ferrée, en traversant la zone d'activité.

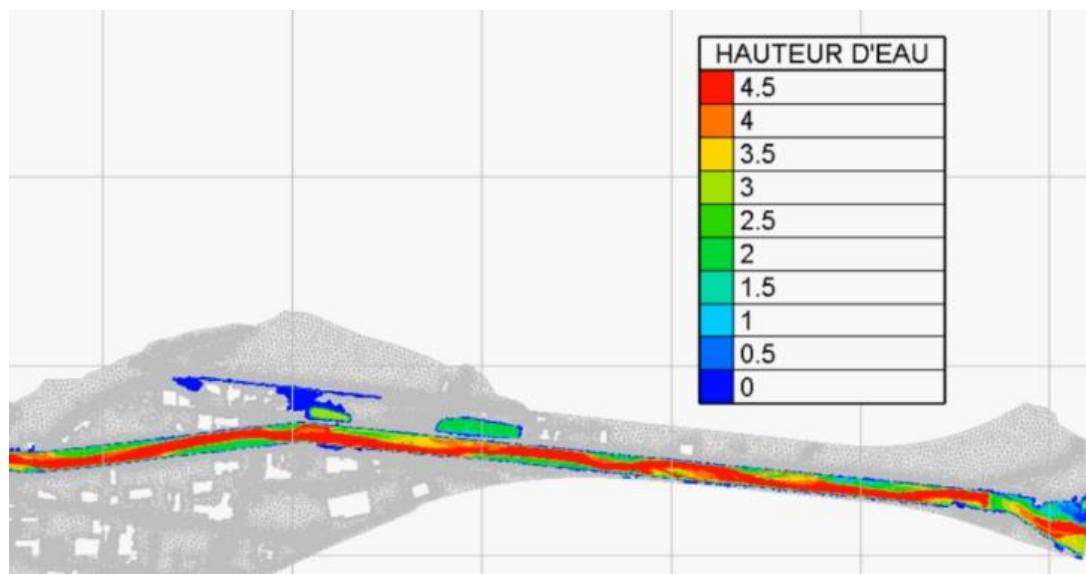


Figure 168 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=2h après la défaillance de la vanne

**T=3h : écoulement le long de la voie ferrée, et passage sous la route**

Les eaux en provenance du castorduc continuent de s'écouler le long de la voie ferrée. Ceux-ci empruntent un passage formé pour une piste cyclable sous la voirie et continuent de s'écouler le long du merlon ferroviaire, avant de revenir vers l'Arve.

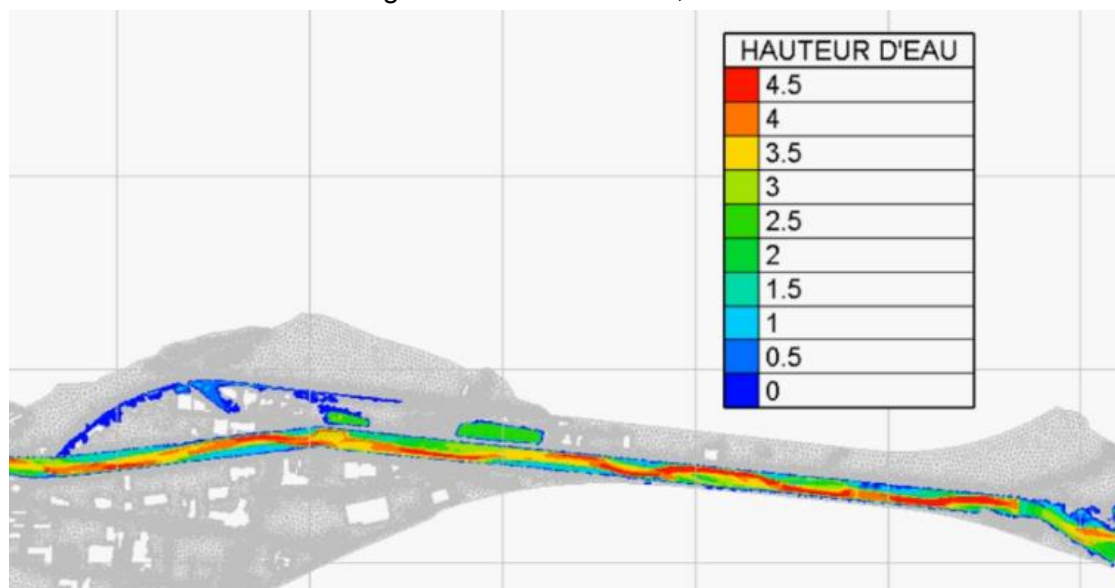


Figure 169 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée – SC2.2 - T=3h après la défaillance de la vanne

Des enjeux sont présents le long du remblai ferroviaire. L'accès principalement inondé (l'avenue Guy Chatel) est touché entre 1h et 2h après le dysfonctionnement de la vanne. Ces délais sont courts, mais permettent la mise en place de mesures de contournements.

Afin de limiter les impacts liés au dysfonctionnement de cette vanne, il est recommandé de mettre en place une automatisation de cette vanne, et une alerte auprès du gemapien en cas de dysfonctionnement.

Les cartographies (débordements maximum) du scénario 2.2 sont données ci-après.

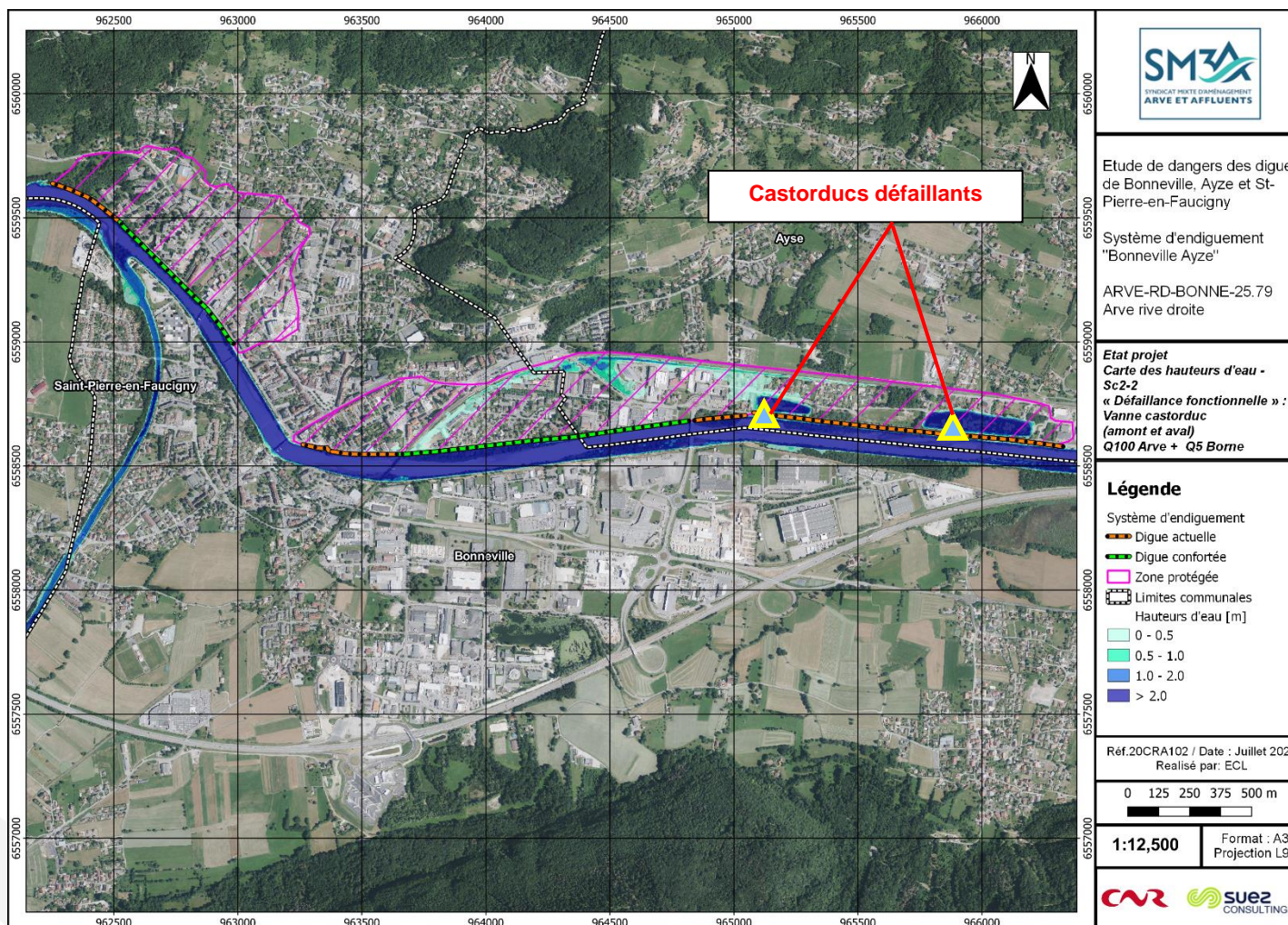


Figure 170 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 2.2

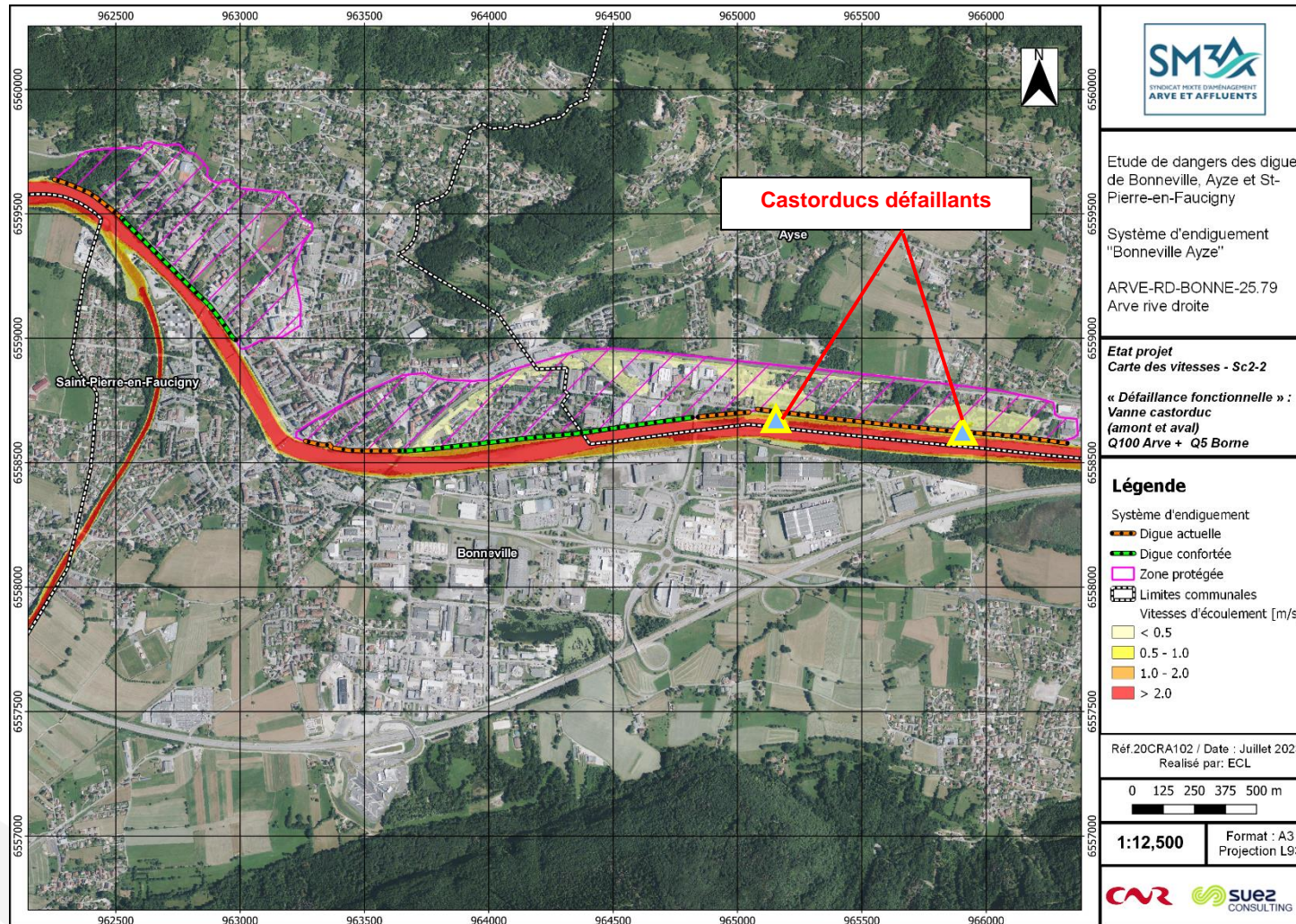


Figure 171 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 2.2

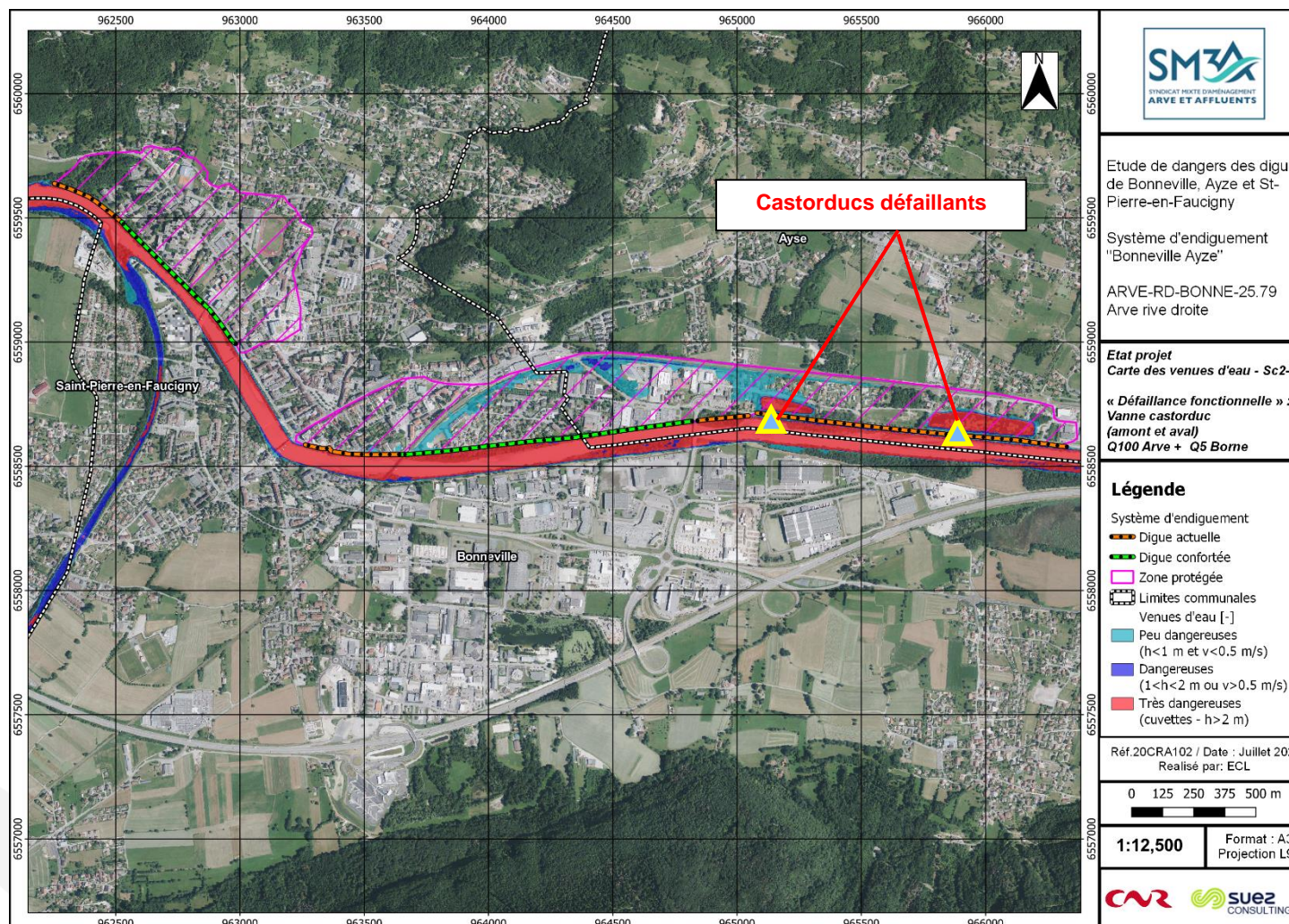


Figure 172 : Cartographie des venues d'eau du scénario 2.2

## 10.4 Scénarios 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 %**.

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.

Pour les défaillances structurelles, 2 simulations ont été réalisées à la suite du diagnostic approfondi :

- **S3.1 : Une brèche pour la Q400 (niveau de danger) de l'Arve au droit du tronçon Centre T02 ;**
- **S3.2 : Une brèche pour la Q400 (niveau de danger) de l'Arve au droit du tronçon RD-T6.**

La modélisation des brèches est basée sur les hypothèses suivantes :

- Amorçe 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.

### 10.4.1 S3.1 : Défaillance structurelle – Tronçons Centre T01 et Centre T02

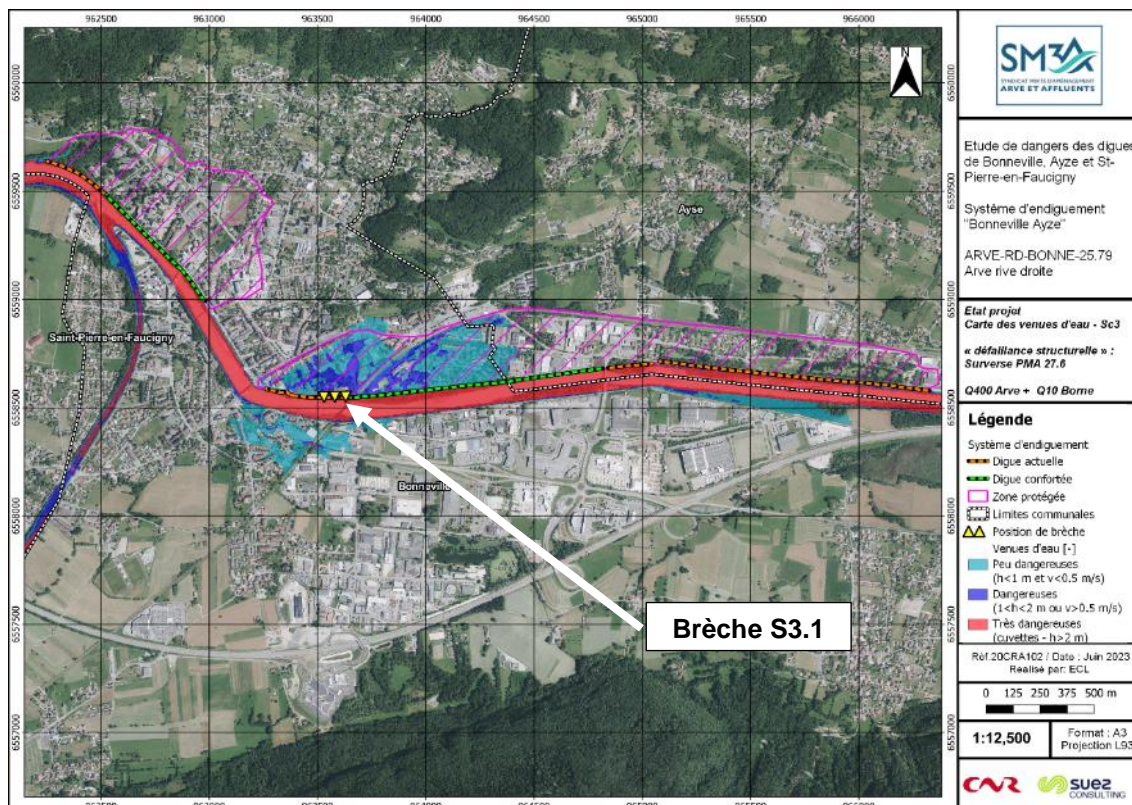


Figure 173 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurelle S3.1 (en situation projet)

Pour ce scénario de défaillance structurelle, on retrouve la cinétique de brèche suivante :

#### **T=0 h : Début de la brèche**

Initiation de la brèche pour 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. Les eaux s'écoulent dans la zone protégée au droit des tronçons Centre T02 et centre T01, et remonte sous la voie ferrée.

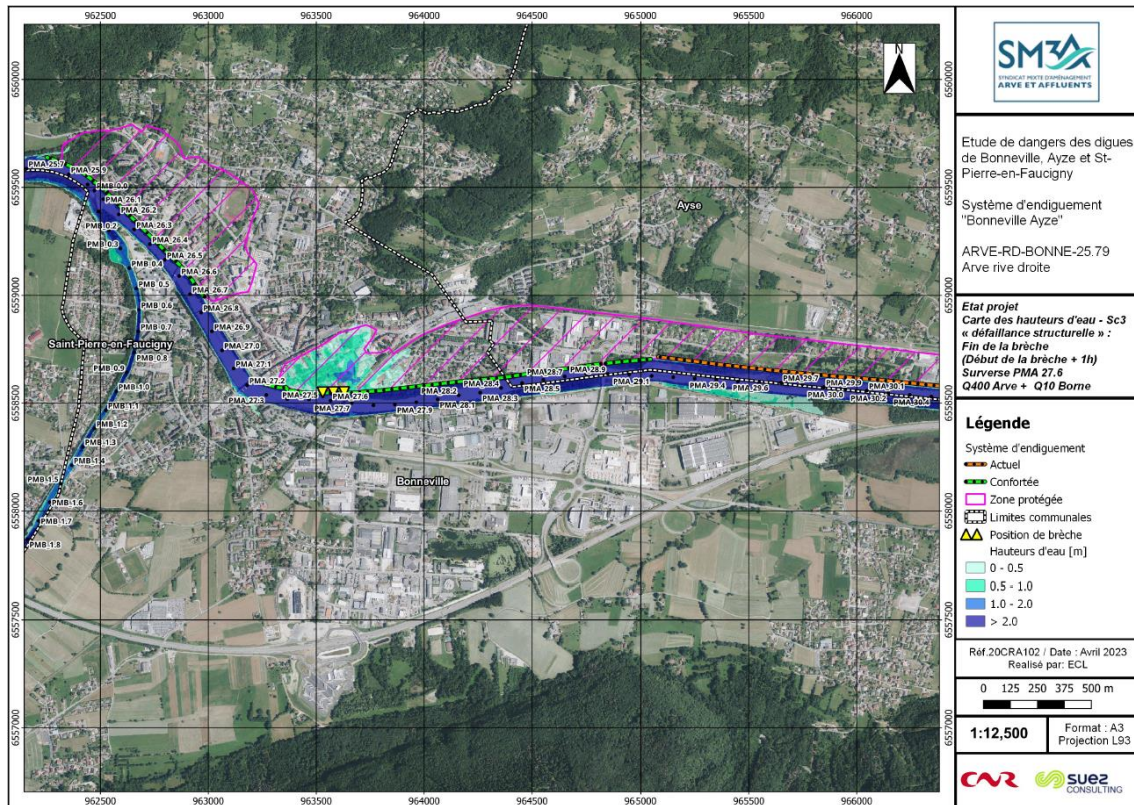


Figure 174 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T=1h après la rupture

**T=2 h : Venues d'eau dans la zone protégée**

Les eaux continuent de remonter le long des digues côté terre, et s'étendent entre les digues et le remblai ferroviaire. Des venues d'eau dangereuse s'installent derrière les digues Centre T02 et T01.

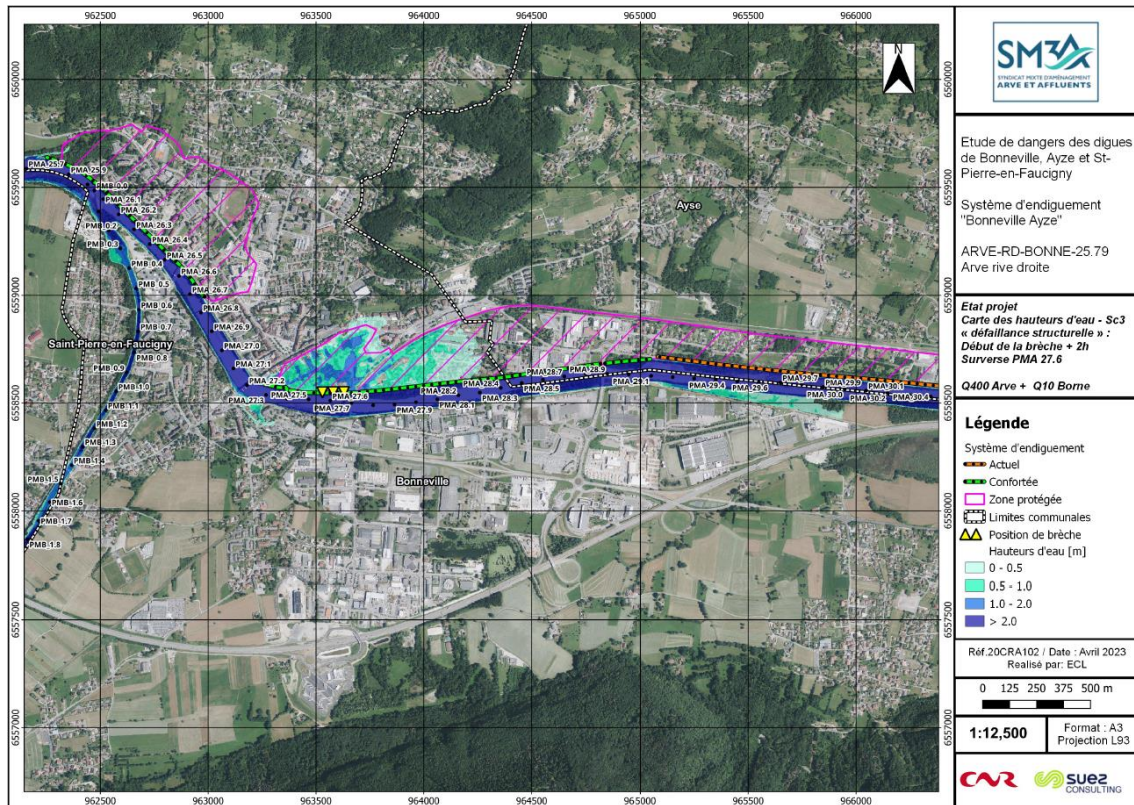


Figure 175 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T=2h après la rupture

### T=3h : remontée des eaux

L'eau continue de remonter et on observe des venues dangereuses en amont de la voie ferrée. Les accès principaux sont bloqués entre la voie ferrée et le système d'endiguement.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

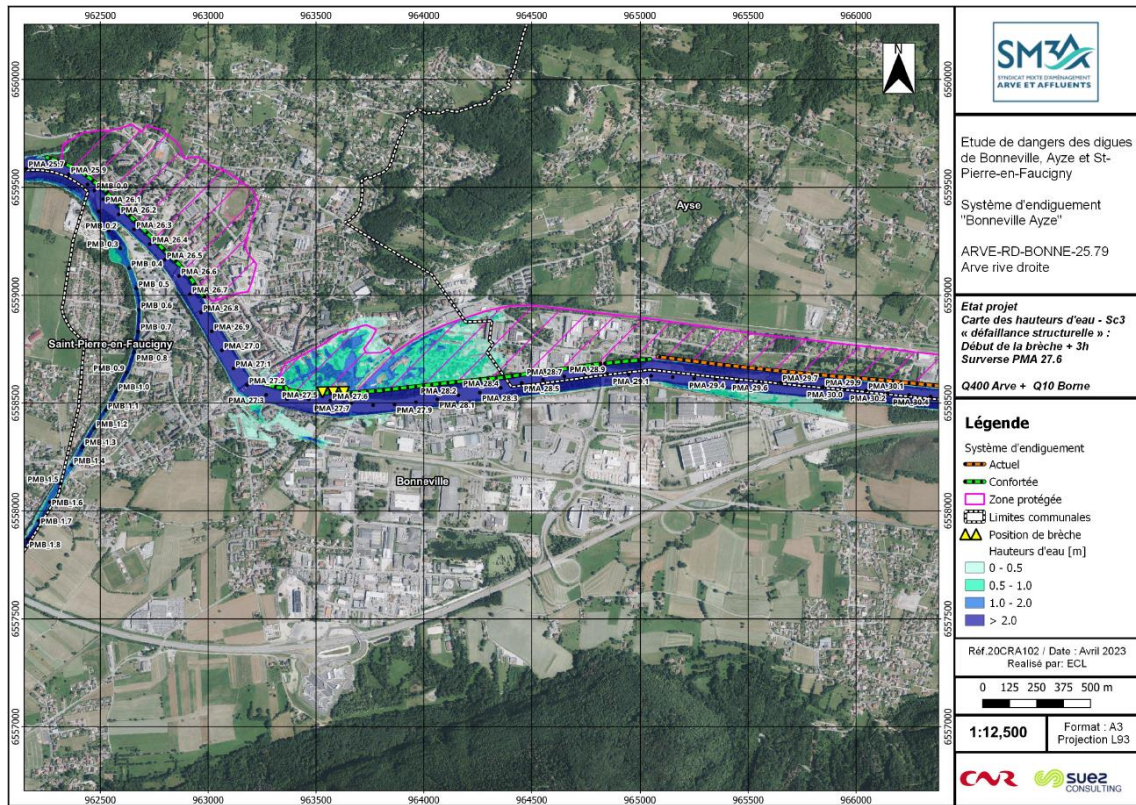


Figure 176 : Hauteurs d'eau dans la zone protégée - SC3.1 – T= 3h après la rupture  
 Les cartographies (débordements maximum) du scénario 3.1 sont données ci-après.

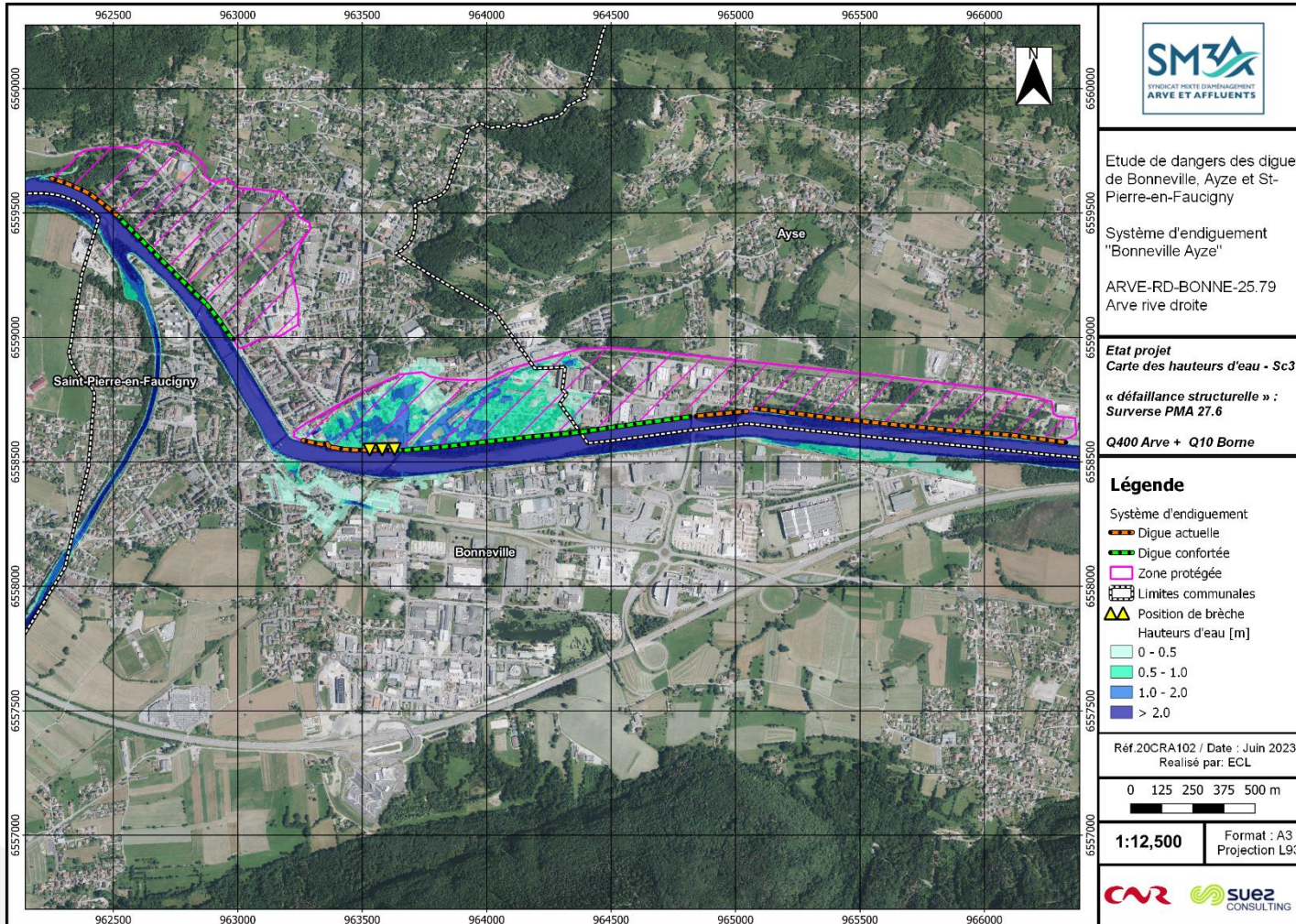


Figure 177 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.1

# Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

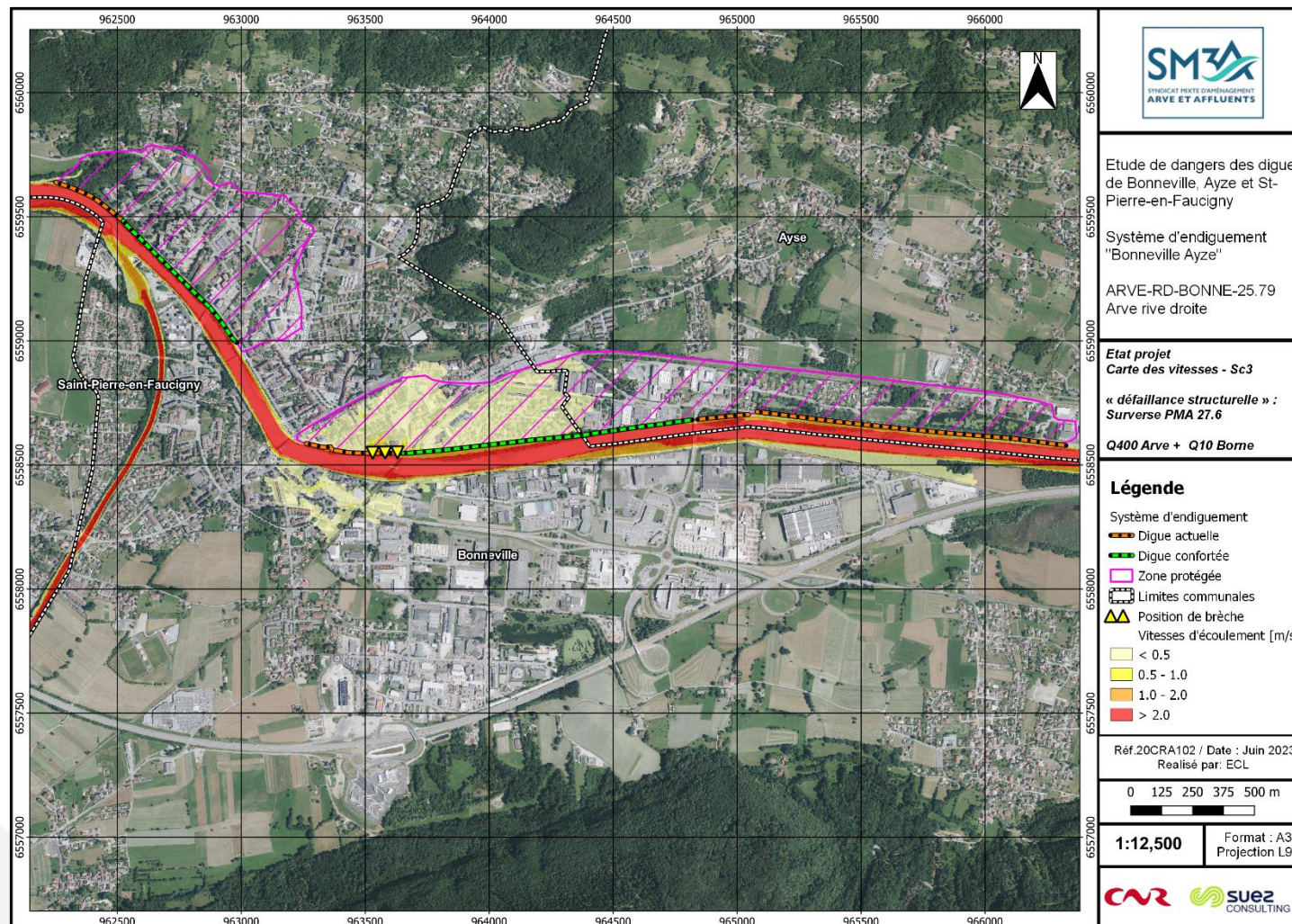


Figure 178 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.1

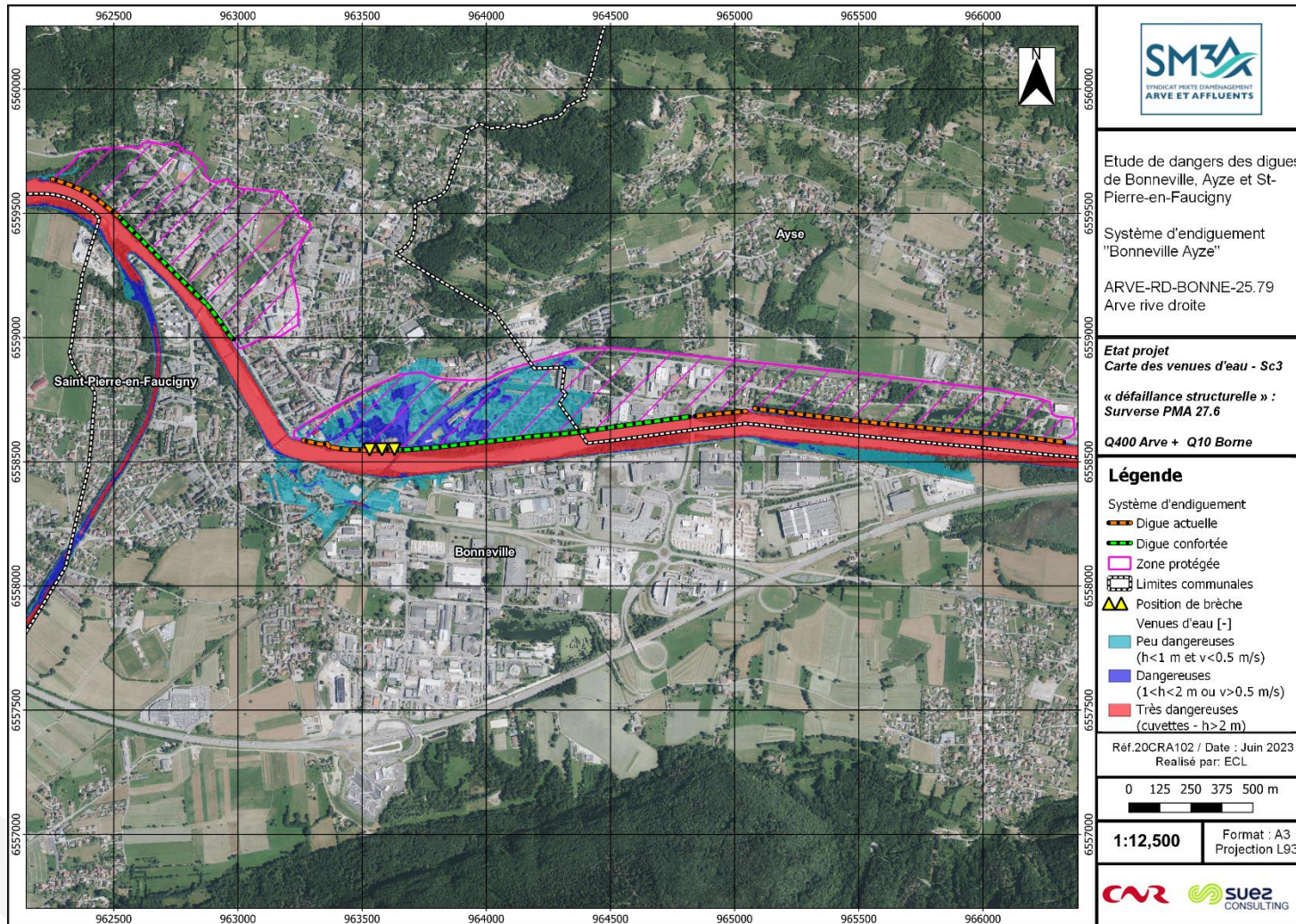


Figure 179 : Cartographie des venues d'eau du scénario 3.1

### 10.4.2 S3.2 : Défaillance structurale – Tronçons RD-T6

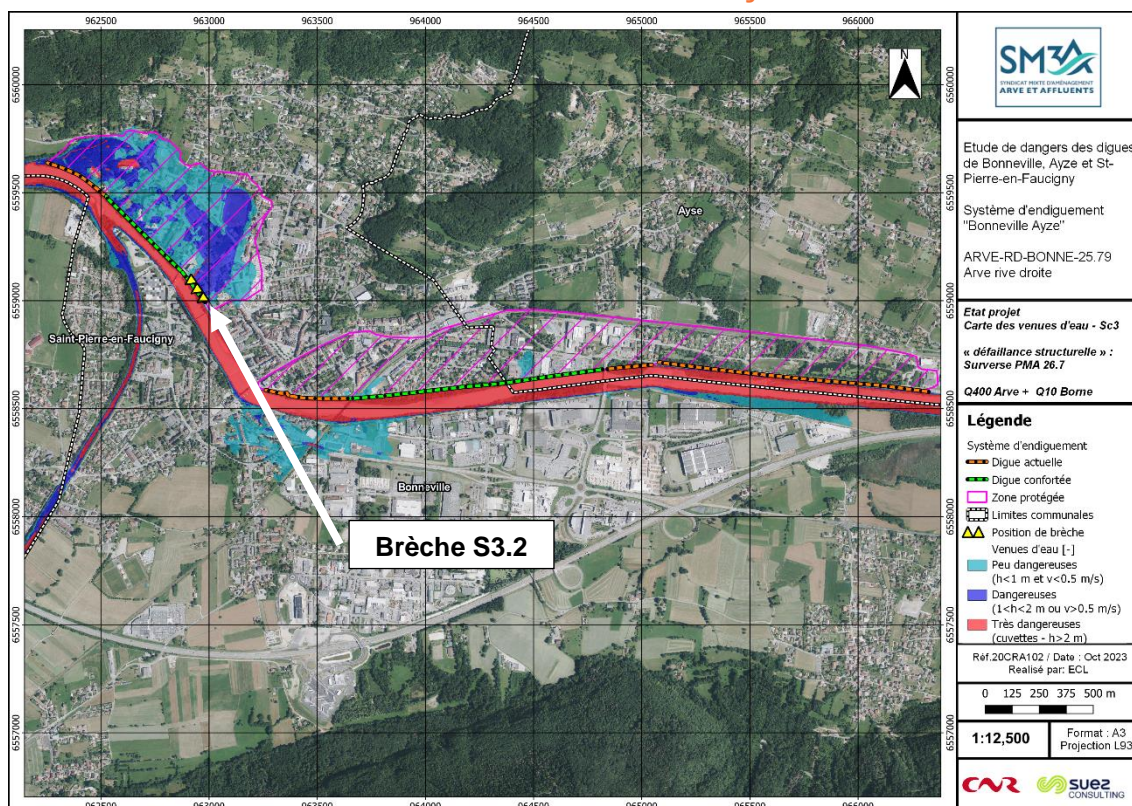


Figure 180 : Localisation de la brèche modélisée pour le scénario de défaillance structurale S3.1 (en situation projet)

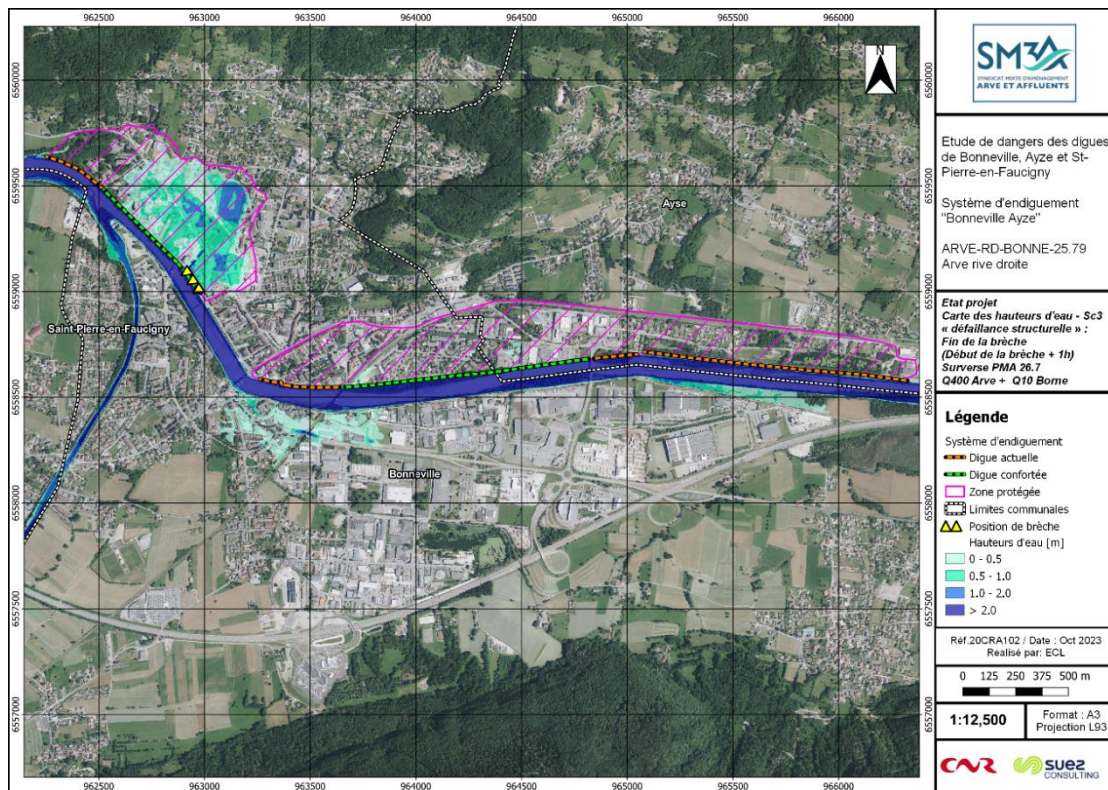
Pour ce scénario de défaillance structurale, on retrouve la cinétique de brèche suivante :

#### **T=0 h : Début de la brèche**

Initiation de la brèche pour une crue de temps de retour 400 ans de l'Arve.

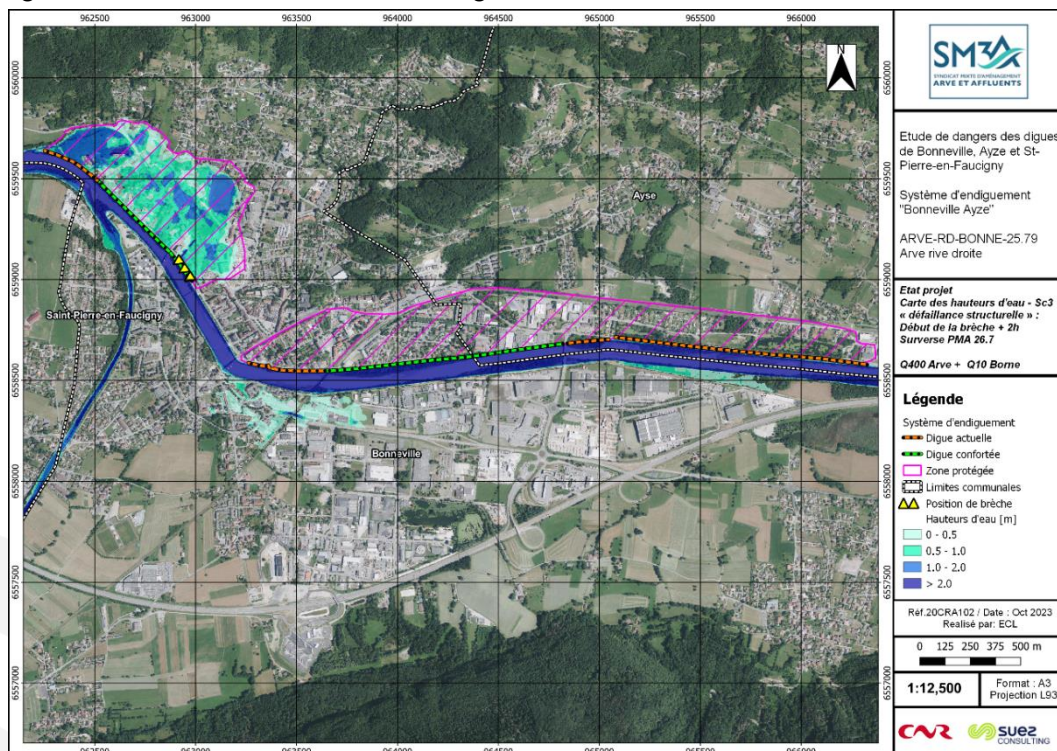
#### **T=1 h : Venues d'eau dans la zone protégée**

La brèche s'ouvre. Les eaux s'écoulent dans la zone protégée au droit du tronçon RD-T6.



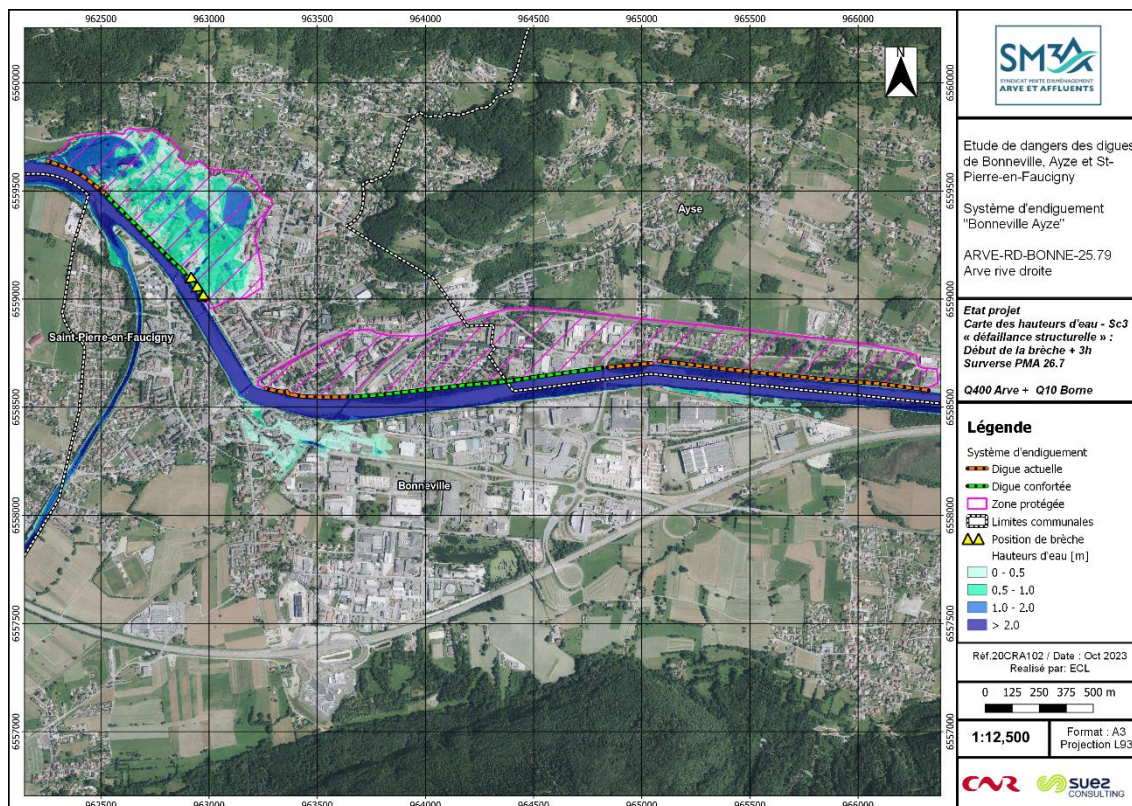
**T=2 h : Venues d'eau dans la zone protégée**

Les eaux continuent de remonter le long des digues côté terre. Des venues d'eau dangereuse s'installent derrière les digues aval.



**T=3h : remontée des eaux**

L'eau continue de remonter et on observe les venues dangereuses maximales au bout de 3h.



Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

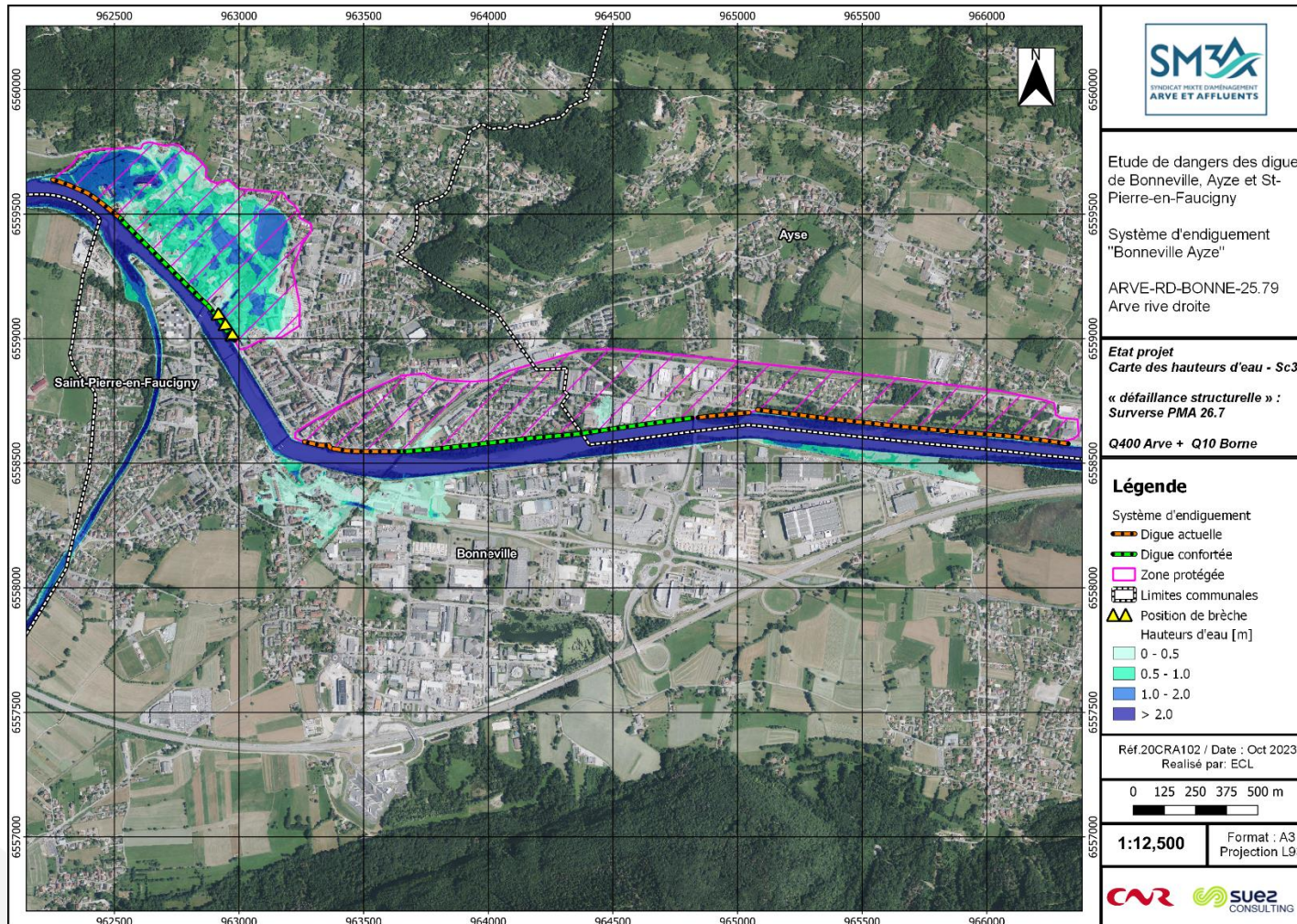


Figure 184 : Cartographie des hauteurs d'eau du scénario 3.2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

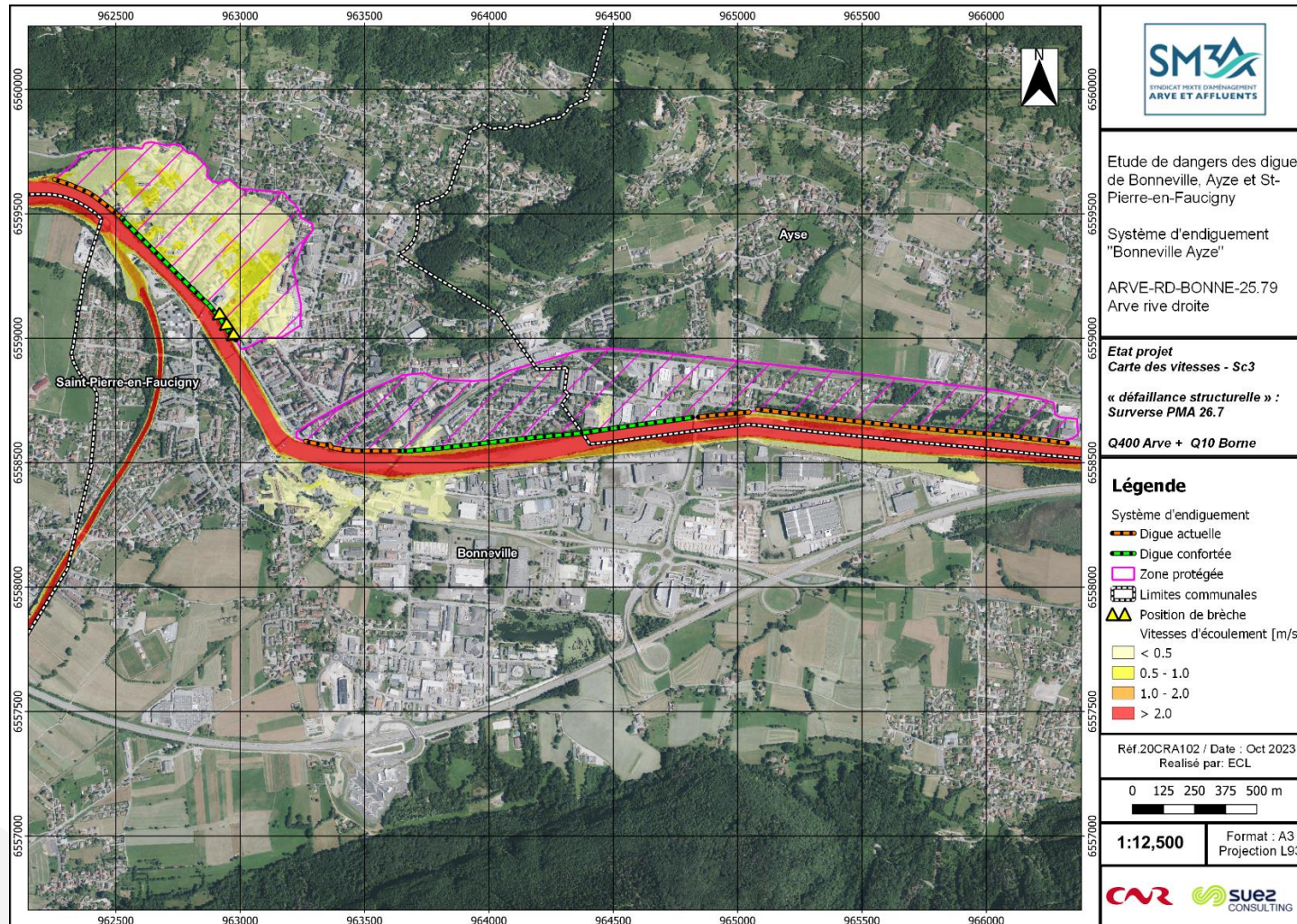


Figure 185 : Cartographie des vitesses d'écoulement du scénario 3.2

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement "Bonneville Ayze" Arve-RD-BONNE-25.79-ARVE RIVE DROITE

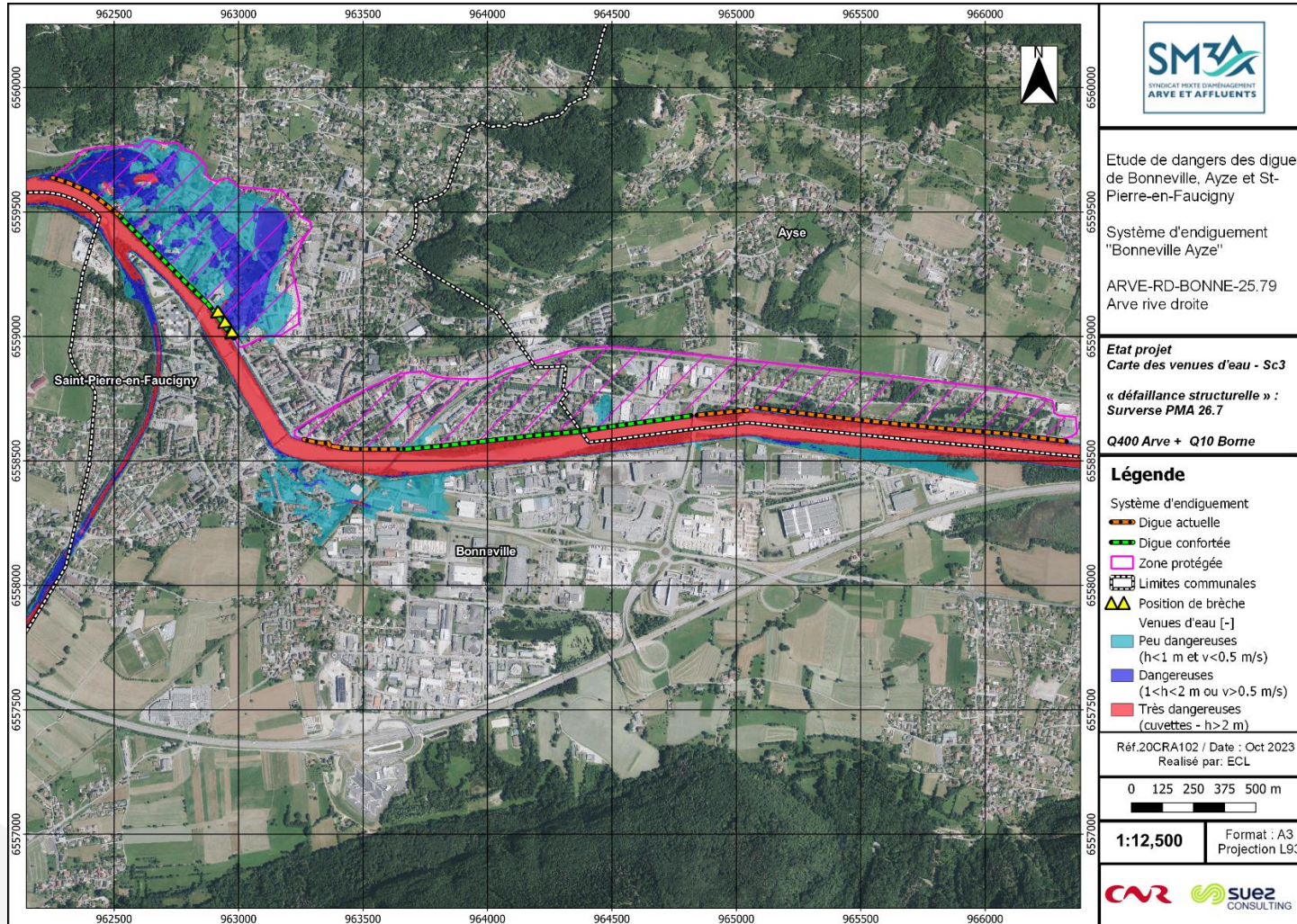


Figure 186 : Cartographie des venues d'eau du scénario

---

# 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**

