

CONSULTING

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

Système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne"

Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

Dossier réglementaire « Borne »

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 ».

Vérification des documents IMP411

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

Numéro du projet : 20CRA102

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

Intitulé du document : Etude de dangers sur le système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne" Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

Version	Rédacteur		Contrôleur 1		Contrôleur 2		Date d'envoi JJ/MM/AA	COMMENTAIRES Documents de référence / Description des modifications essentielles
	NOM	Prénom	NOM	Prénom	NOM	Prénom		
A	DVI ECL (CNR)		//		VJO		01/07/2022	Version de travail
B	DVI RWI ECL (CNR)		//		VJO		05/10/2022	Intégration des remarques du SM3A
C	FBO RWI ECL (CNR)	Boussa aa Farid <small>Signature numérique de Boussa Farid Date : 2023.07.27 18:27:24 +02'00'</small>	APE	A.PE STEL <small>Signature numérique de A.PE STEL Date : 2023.07.27 23:01:09 +02'00'</small>	VJO	Vince nt Jouve <small>Signature numérique de Vincent Jouve Date : 2023.07.31 08:06:55 +02'00'</small>	31/07/2023	Reprises suite au rapport du Pôle Ouvrage Hydraulique de la DREAL - 06/02/23
D	FBO		TVA		APE		04/07/2024	Version reprise à la suite des cinq demandes de la DREAL/POH de septembre 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	15
Résumé non technique	20
0..... Résumé non technique de l'étude de dangers	21
0.1 Contexte législatif et règlementaire	21
0.2 Présentation de l'autorité compétente	21
0.3 Description des ouvrages objet de l'étude	22
0.3.1 Cours d'eau concernés et localisation.....	22
0.3.2 Objectif de l'étude.....	22
0.3.3 Ouvrages constitutifs du système d'endiguement.....	23
0.3.4 Aménagement hydrauliques (article R562-18).....	27
0.4 Zone protégée et niveau de protection du système d'endiguement en situation de « travaux achevés »	27
0.4.1 La zone protégée.....	27
0.4.2 Les niveaux de protection, de sureté et de danger	28
0.4.3 Estimation de la population protégée	29
0.5 Présentation du fonctionnement du système d'endiguement en situation de « travaux achevés »	29
0.5.1 Fonction principale	29
0.5.2 Démarche de réalisation de l'étude de dangers.....	30
0.5.3 Présentation des scénarios	32
Document A : PRESENTATION GENERALE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT	39
1..... Renseignements administratifs	40
1.1 Gestionnaire du système d'endiguement	40
1.2 Compétence GEMAPI	40
1.3 Identification du rédacteur de l'Etude de Dangers	41
1.4 Date de remise de l'étude de dangers	42
1.5 Aménagements hydrauliques (article R562-18)	42
1.6 Classement des ouvrages	42
2..... Objet de l'étude	43
2.1 Descriptif du cadre de la demande	43

2.1.1	Contexte dans lequel s'inscrit la demande	43
2.1.2	Descriptif du cadre.....	43
2.2	Liste des communes concernées par la zone protégée	44
2.3	Localisation des limites de la zone protégée	44
2.4	Localisation en plan et description sommaire des ouvrages concernés	45
2.4.1	Localisation générale	45
2.4.2	Description sommaire des ouvrages	46

3..... Description précise de la zone protégée, du système d'endiguement, de son environnement et de ses fonctions de protection contre les inondations 51

3.1	Zone protégée en situation de travaux achevés	51
3.1.1	Limites administratives du territoire relevant du SM3A et de la zone protégée	51
3.1.2	Enjeux présents sur la zone	55
3.2	Description des conditions naturelles pouvant conduire à des crues	58
3.2.1	Facteurs naturels déterminants les risques d'inondation	58
3.2.2	Références scientifiques (hydrologie)	61
3.2.3	Données historiques de crue.....	61
3.2.4	Etude géologique.....	61
3.2.5	Classe sismique	62
3.3	Description des éléments composant le système de protection et leurs fonctions hydrauliques.....	62
3.3.1	Cours d'eau	62
3.3.2	Localisation et identification des éléments constituant le système d'endiguement	62
3.3.3	Géométrie et structure du système	65
3.3.4	Fonctionnement hydraulique du SE	72
3.3.5	Voie d'accès au système d'endiguement.....	74
3.3.6	Aménagement hydraulique autorisé conjointement avec le système d'endiguement	75
3.3.7	Analyse de la topographie existante	75
3.4	Analyse du fonctionnement du système d'endiguement	76
3.4.1	Données historiques structurelles	76
3.4.2	Fonction structurelle	77
3.4.3	Impact de l'aménagement hydraulique	78
3.4.4	Les niveaux de protection et les lieux de référence	78
3.5	Organisation du gestionnaire	82
3.6	Consignes de surveillance et d'exploitation des ouvrages hors période de crise	83
3.6.1	Consignes générales de surveillance.....	83
3.6.2	Consignes d'exploitation des ouvrages.....	84
3.7	Consignes de surveillance des ouvrages en période de crise	87

3.7.1	Chaîne de responsabilité et rôle des acteurs en gestion de crise.....	87
3.7.2	Détails et processus de décision du dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise	88
3.7.3	Visites post-crue	93
3.7.4	Interventions post-crue	94

Document B : ANALYSE DES RISQUES ET JUSTIFICATION DES PERFORMANCES 95

4..... Caractérisation des aléas naturels 96

4.1	Hydrologie, hydraulique et morphologie globale	96
4.1.1	Présentation des bassins versants de l'Arve et du Borne.....	96
4.1.2	Les données hydrométriques	98
4.1.3	Apports du Giffre (affluent de l'Arve).....	99
4.1.4	Environnement hydro-morphologique	100
4.1.5	Environnement géologique et hydrogéologique	103
4.1.6	Environnement naturel	105
4.2	Analyse hydrologique locale	108
4.2.1	Régime hydrologique au droit de notre zone d'étude	108
4.2.2	Débits caractéristiques et hydrogrammes des crues	109
4.2.3	Les crues historiques.....	111
4.2.4	Influence aval	113
4.3	Analyse hydraulique.....	114
4.3.1	Le code de calculs Telemac-2D	114
4.3.2	Emprise du modèle.....	114
4.3.3	Modélisation des ponts et ouvrages.....	115
4.3.4	Le calage du modèle	115
4.4	Risque sismique	116
4.4.1	Position des ouvrages vis-à-vis des séismes.....	116
4.4.2	Evolution de la réglementation	117
4.5	Mouvements de terrain.....	118
4.6	Les embâcles et leurs effets potentiels.....	118
4.7	Les évolutions morphologiques locales et apports solides	118
4.8	Les laves torrentielles et leurs effets potentiels	119

5..... Description du système d'endiguement 120

5.1	Ouvrages existants.....	120
5.1.1	Identification et localisation des ouvrages.....	120
5.1.2	Description générale des digues actuelles.....	120
5.1.3	Autres ouvrages	124
5.2	Description des ouvrages en phase avant-projet	127

5.2.1	Objectif de protection – digues du Borne	127
5.2.2	Description du projet d'aménagement des digues du Borne	128
5.2.3	Travaux - Mesures temporaires prises contre les crues et tempêtes	147
5.3	Description des sources d'agression	148
5.3.1	Sources d'agression anthropiques	148
5.3.2	Risques naturels	148
	Description fonctionnelle du système d'endiguement	149
6.....	Retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement.....	151
6.1	Présentation de la démarche	151
6.1.1	Obligations réglementaires.....	151
6.1.2	Méthodologie	151
6.2	Défaillances, accidents, incidents et évolutions lentes survenus sur les ouvrages	151
6.2.1	Crues historiques sur le système	151
6.2.2	Synthèse des observations – typologie des désordres (VTA)	152
6.2.3	Autres évènements particuliers survenus sur le site	162
6.2.4	Retour d'expérience sur des ouvrages gérés par le SM3A	162
6.2.5	Exemples connus d'incidents et d'accidents survenus sur des ouvrages similaires	162
6.3	Scénarios de défaillance probables.....	167
6.3.1	Analyse accidentologique.....	167
6.3.2	Synthèse sur les scénarios de défaillance probables	170
7.....	Diagnostic approfondi des éléments constitutifs du système d'endiguement et tenue des ouvrages	173
7.1	Etat actuel.....	173
7.1.1	Rappel de l'historique du diagnostic du système d'endiguement	173
7.1.2	Documents sources.....	173
7.1.3	Moyens mis en œuvre – reconnaissances de 2017.....	174
7.1.4	Caractéristiques géotechniques issues des reconnaissances géotechniques de 2017	175
7.1.5	Evaluation de la stabilité des digues existantes	180
7.1.6	Caractéristiques issues des reconnaissances géotechniques de 2021.....	182
7.1.7	Conclusions et principes d'adaptation des ouvrages au sol – AVP	183
7.2	Dimensionnement de l'avant-projet de confortement	184
7.2.1	Principes généraux.....	184
7.2.2	Objectif de protection	184
7.2.3	Rappel des profils types	185
7.2.4	Prescription pour répondre aux différents risques d'instabilité	185
7.3	Caractérisation des probabilités de rupture des digues	204
7.3.1	Méthode de vérification de la tenue des ouvrages.....	204

7.3.2	Caractérisation des probabilités de rupture des digues	206
7.4	Conclusions	257
7.4.1	Profils types et dispositions constructives	257
7.4.2	Matériaux	257
7.5	Moyens mis en œuvre pour assurer l'entretien, la surveillance et les réparations courantes des ouvrages	258
8.....	Etude des risques de venues d'eau dans et en dehors de la zone protégée	259
8.1	Modélisation hydraulique	259
8.2	Famille de scénarios.....	259
8.3	Scénarios de défaillance structurelle retenus	259
8.4	Choix des scénarios à modéliser et cartographie.....	262
8.4.1	Scénarios étudiés et retenus	262
8.4.2	Cartographie	262
8.5	Scénario 1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement	263
8.6	Scénario 3 : Défaillance structurelle du système d'endiguement	264
8.6.1	Scénario 3.1 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne.....	264
8.6.2	Scénario 3.2 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne.....	268
9.....	Présentation et analyse de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour l'exercice de ses missions	271
9.1	Organisation du gestionnaire	271
9.1.1	Pôles et services chargés de la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement.....	271
9.1.2	Organisation des missions de surveillance générale	272
9.1.3	Organisation des interventions programmées	273
9.1.4	Organisation lors d'un désordre détecté sur ouvrage	274
9.1.5	Entreprises et prestataires sous contrat.....	274
9.2	Consignes de surveillance et d'exploitation des ouvrages hors période de crise 275	
9.2.1	Consignes générales de surveillance.....	275
9.2.2	Consignes d'exploitation des ouvrages.....	276
9.3	Procédure d'information et de communication	279
9.3.1	Chaine de responsabilité	279
9.3.2	Liens avec certains acteurs spécifiques de la gestion de crise	280
9.3.3	Organisation en cas de crise	280

9.4 Moyens d'information sur les crues ou les épisodes météorologiques à risque.....	280
9.4.1 Les limites techniques	281
9.4.2 Dispositifs de veille opérés par les services de l'Etat.....	284
9.4.3 Stations hydrométriques.....	289
9.4.4 Astreinte	290
9.5 Consignes de surveillance des ouvrages en période de crise	291
9.5.1 Chaîne de responsabilité et rôle des acteurs en gestion de crise.....	291
9.5.2 Détails et processus de décision du dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise	292
9.5.3 Visites post-crue	296
9.5.4 Interventions post-crue	297
9.6 Analyse des PCS.....	297
9.7 Adéquation des moyens mis en place pour la surveillance et l'entretien courant avec l'objectif de protection garanti	298
9.7.1 Entretien, surveillance et exploitation.....	298
9.7.2 Veille et information	299
9.7.3 Alerte et mise en sécurité	299
9.8 Barrières de sécurités	299
9.8.1 Définition des barrières de sécurité.....	299
9.8.2 Respect des barrières de sécurités identifiées	300
9.9 Recommandation de l'organisme agréé qui réalise l'étude de dangers (9 bis) 300	300
9.9.1 Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau	300
9.9.2 Surveillance vis-à-vis du séisme	302
9.9.3 Gestion des ouvrages	303
9.9.4 Arrêté ministériel du 8 août 2022	303
9.9.5 Conclusion.....	303
10... CARTOGRAPHIE ET DESCRIPTION DES RESULTATS	304
10.1 Cartes administratives	304
10.1.1 Cartes des venues d'eau.....	305
10.2 Scénario 1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement	306
10.3 Scénario 3 : Défaillance structurelle du système d'endiguement	308
10.3.1 Scénario 3.1 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne.....	308
10.3.2 Scénario 3.2 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne.....	313
11... Table des Annexes.....	318

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation du système d'endiguement (fond BD-ORTHO®) – couleur jaune.....	22
Figure 2 : Localisation précise des digues actuelles.....	24
Figure 3 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne (RG-T2 à RG-T9 sur la rive gauche).....	25
Figure 4 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection.....	29
Figure 5 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des venues d'eau).....	32
Figure 6 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau).....	33
Figure 7 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche.....	34
Figure 8 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 1h00.....	34
Figure 9 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 2h00.....	35
Figure 10 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 3h00.....	35
Figure 11 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau).....	36
Figure 12 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche.....	37
Figure 13 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 1h00.....	37
Figure 14 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 2h00.....	38
Figure 15 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 3h00.....	38
Figure 16 : Localisation de la zone protégée.....	45
Figure 17 : Localisation des systèmes d'endiguement de l'Arve et du Borne sur la commune de Bonneville.....	46
Figure 18 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne (avec indication des tronçons homogènes).....	49
Figure 19 : Localisation de la zone protégée et des tronçons du système d'endiguement.....	52
Figure 20 : Communes territoire intervention SM3A.....	54
Figure 21 : Cartographie des enjeux exposés.....	58
Figure 22 : Hydrogrammes de l'Arve et du Borne pour une crue centennale du Borne.....	60
Figure 23 : Modélisation hydraulique (Q100 Borne et Q30 Arve) – digues du Borne rive gauche effacées.....	60
Figure 24 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude (Source : S.M.3.A.).....	61
Figure 25 : Localisation précise des digues actuelles sur le Borne (digues en rive gauche pour le système étudié).....	63
Figure 26 : Localisation précise des digues projetées (digues en rive gauche pour le système étudié).....	64
Figure 27 : Cartographie des ouvrages annexes (ponts, seuils, grandes buses).....	65
Figure 28 : Profils types historiques issus de l'étude historique Acthys Diffusion – Juillet 2017.....	66
Figure 29 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne (avec indication des tronçons homogènes).....	68
Figure 30 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - digues rive gauche en état actuel et lignes d'eau.....	73
Figure 31 : Profil en long Borne (Source : CNR) – calage des digues projetées.....	74
Figure 32 : Voies d'accès au système d'endiguement.....	75
Figure 33 : Crue historique à Bonneville – source : SM3A.....	76
Figure 34 : Analyse fonctionnelle externe.....	78
Figure 35 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection.....	80
Figure 36 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau).....	81
Figure 37 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau).....	82
Figure 38 : Dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise.....	90
Figure 39 : Bassin versant de l'Arve avec ces principaux affluents (source : étude ISL). En rouge la localisation du SE objet de la présente étude.....	96
Figure 40 : Bassin versant du Borne (source : étude EDF). Découpage en deux sous bassins versants.....	98
Figure 41 : Extrait des cartes géologiques d'Annemasse et d'Annecy-Bonneville au 1/50000 du BRGM.....	104
Figure 42 : Schéma en coupe de la géologie du site.....	104
Figure 43 : Débit moyen mensuel de l'Arve à Sallanches – Période 1965 – 2018 – Source banque HYDRO.....	108
Figure 44 : Débit moyen mensuel du Borne à Saint-Jean-de-Sixt – Période 1964 – 2018 – Source banque HYDRO.....	109
Figure 45 : Hydrogrammes de crues relatifs à la crue centennale du Borne.....	111
Figure 46 : Construction de la courbe de tarage à l'aval du modèle.....	114
Figure 47 : Périmètre du modèle hydraulique (rose).....	115
Figure 48 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source www.haute-savoie.gouv.fr	117

Figure 49 : Localisation précise des digues actuelles sur le Borne (deux digues en rive gauche pour le système étudié)	120
Figure 50 : Digue de Toisinges (Profils historiques - Acthys Diffusion)	122
Figure 51 : Digue de Toisinges (photos de la digue - CNR)	122
Figure 52 : Digue de de la STEP (Profils historiques - Acthys Diffusion)	123
Figure 53 : Digue de la STEP (photos de la digue - CNR)	123
Figure 54 : Seuil Métral vue vers l'aval (à gauche) et seuil amont à la confluence vue vers l'aval (à droite) – photos CNR	124
Figure 55 : Seuil aval au pont de l'Europe, vue vers l'amont - CNR	125
Figure 56 : Profil type de l'AVP structurel de 2018 (non retenu)	129
Figure 57 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne rive gauche et rive droite (avec indication des tronçons homogènes)	131
Figure 58 : Profil type RG-T2 et RG-T3 – PM1232 – vue géotechnique et hydro-écologiques	134
Figure 59 : Profil type RG-T2 et RG-T3 en aval du pont Royal – vue paysagère	135
Figure 60 : Profil type RG-T4 et RG-T5 – PM775 – vue géotechnique et hydro-écologiques	135
Figure 61 : Profil 722 RG-T4 en amont du pont de Tucinge (Avenue Ravel) – vue Paysagère	137
Figure 62 : Profil 870 RG-T4 en amont du pont de Tucinge (Avenue Ravel)	137
Figure 63 : Profil 465 RG-T5 en aval du pont de Tucinge (Avenue Ravel)	138
Figure 64 : Profil géotechnique RG-T6	139
Figure 65 : Profil type RG-T6 – PM373	139
Figure 66 : Profil géotechnique type RG-T7	140
Figure 67 : Illustration de l'élargissement au niveau de RG-T7 – PM313	140
Figure 68 : Profil 343 RG-T7 – vue paysagère	141
Figure 69 : Profil type RG-T8 et RG-T9 – PM108 – vue géotechnique et hydro-écologiques	142
Figure 70 : Profil en long de la double rampe proposée en stabilisation du lit du Borne	142
Figure 71 : Etanchéité au droit des pistes d'exploitation	144
Figure 72 : Carte de synthèse des cheminements piétons et cycles aux abords du Borne	145
Figure 73 : Travaux sous le pont de la RD1203 (hors système d'endiguement)	145
Figure 74 : Voies d'accès au système d'endiguement	146
Figure 75 : Profil en long du Borne (Source : CNR) – calage des digues projetées	147
Figure 76 : Cartographie des venues d'eau en Q100 Borne - situation de travaux achevés	150
Figure 77 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude - Source S.M.3.A	152
Figure 78 : Localisation des endiguements concernés par la VTA de 2020	154
Figure 79 : Meylan, Ile d'Amour et Isère amont, courbe de Charlet (photos : AD Isère)	164
Figure 80 : Rupture de la digue en rive gauche	166
Figure 81 : Début de renard hydraulique RG en amont de la brèche	166
Figure 82 : Schéma de principe d'une rupture par surverse	168
Figure 83 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe	168
Figure 84 : Schéma de principe d'une rupture par effet de renard hydraulique	169
Figure 85 : Schéma de principe de rupture d'ensemble	170
Figure 86 : vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [9])	170
Figure 87 : Localisation des sondages géotechniques réalisés en 2017 sur les digues objets de l'étude	175
Figure 88 : granulométries	178
Figure 89 : Toisinges – PM 1300	179
Figure 90 : STEP – PM 300	180
Figure 91 - Plan d'implantation des sondages de la campagne de reconnaissance de 2021 (a: PM 59RG à 465 RG ; b : PM 426RD à 870RD c: 979RD à 1380RD)	183
Figure 92 : RG-T(-1) – P1 à P7 – Coupe type (ici P4)	189
Figure 93 : RG-T1 – Coupe type (ici P18)	190
Figure 94 : RG-T2 – Confortement solution 1 – Coupe type	192
Figure 95 : RG-T3 – Confortement – Coupe type	193
Figure 96 : RG-T4 – Confortement – Coupe type	194
Figure 97 - Résultats des expérimentations de Burenkova (1993, à gauche) et Li&Fannin (2008, à droite)	195
Figure 98 : RG-T5 – Confortement – Coupe type	196
Figure 99 : RG-T6 – Confortement – Coupe type	198
Figure 100 : Profil en long du Borne conforté – Tronçon aval au PM400	198

Figure 101 : RG-T7 – Confortement – Coupe type.....	200
Figure 102 : RG-T8 – Confortement – Coupe type.....	201
Figure 103 : RG-T8 – Confortement – Coupe type.....	202
Figure 104 : Comparaison temps de percolation / crue – RG.....	203
Figure 105 - Arbre type de probabilité.....	204
Figure 106 - Modes de rupture considérés.....	207
Figure 107 - Vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [9]).....	207
Figure 108 - Tableau de synthèse des évolutions entre le décret 2007 et 2015 (Source : France-Digue).....	208
Figure 109 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par surverse.....	209
Figure 110 - Vitesse d'écoulement sur le talus d'une digue en surverse - Cerema [13].....	210
Figure 111 - Valeurs limites de dimensionnement de la résistance à l'érosion pour des mesures anti-érosions sélectionnées (source: Hewlett et al. – 1987 [14]).....	211
Figure 112 - mécanisme d'érosion par surverse en fonction des matériaux de la digue.....	212
Figure 113 - Largeur en crête et probabilité conditionnelle associée.....	213
Figure 114 - Profil en long de la digue en RG du Borne à l'état projet et ligne d'eau associée.....	213
Figure 115 - Profil en long pour différents temps de retour de crue (source : CNR).....	214
Figure 116 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai).....	215
Figure 117 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai avec rideau de palplanche).....	216
Figure 118 - Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source: CFBR, 2015 [15]).....	217
Figure 119 - extrapolation des valeurs de facteur de sécurité au glissement et probabilité conditionnelle.....	218
Figure 120 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – tronçon T1.....	220
Figure 121 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – tronçon T2.....	221
Figure 122 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T3.....	221
Figure 123 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T4.....	222
Figure 124 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T5.....	222
Figure 125 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T6.....	223
Figure 126 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T7.....	223
Figure 127 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T8.....	224
Figure 128 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T9.....	224
Figure 129 - Schéma du phénomène de suffusion.....	226
Figure 130 - Schéma du phénomène d'érosion de contact.....	227
Figure 131 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit.....	228
Figure 132 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T1.....	230
Figure 133 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T2.....	231
Figure 134 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T3.....	231
Figure 135 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T4.....	232
Figure 136 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T5.....	232
Figure 137 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T6.....	233
Figure 138 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T7.....	233
Figure 139 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T8.....	234
Figure 140 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T9.....	234
Figure 141 - Probabilités de défaillance par érosion de conduit des tronçons.....	235
Figure 142 - Schéma du phénomène d'érosion régressive.....	235
Figure 143 - Arbre de défaillance associé à la rupture par érosion régressive.....	236
Figure 144 - Illustration du gradient moyen.....	236
Figure 145 - Abaque de Sellmeijer.....	237
Figure 146 - Arbre de défaillance associé à la rupture par érosion régressive – Tronçon T4.....	239
Figure 147 - Arbre de défaillance associé à la rupture par érosion régressive – Tronçon T5.....	239
Figure 148 - Rose des vents à Bonneville (Source : Meteoblue).....	240
Figure 149 - Profil en long du fond (B) et des vitesses (M) avec et sans épis pour la rive gauche du Borne à Q100.....	241
Figure 150 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe.....	242
Figure 151 : Valeurs de résistance à la contrainte d'arrachement de différents matériaux et techniques en cours d'eau (source : B. Lachat).....	245
Figure 152 - Synthèse des facteurs aggravant vis-à-vis de l'érosion externe.....	249

Figure 153 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T1	250
Figure 154 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T2	251
Figure 155 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T3	251
Figure 156 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T4	252
Figure 157 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T5	252
Figure 158 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T6	253
Figure 159 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T7	253
Figure 160 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T8	254
Figure 161 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T9	254
Figure 162 : Localisation des brèches modélisées pour le scénario de défaillance structurelle (en situation projet)	261
Figure 163 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des venues d'eau).....	263
Figure 164 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)	264
Figure 165 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche	265
Figure 166 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 1h00	266
Figure 167 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 2h00	266
Figure 168 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 3h00	267
Figure 169 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)	268
Figure 170 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche	269
Figure 171 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 1h00	269
Figure 172 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 2h00	270
Figure 173 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 3h00	270
Figure 174 : Station de référence par tronçon de l'Arve.....	288
Figure 175 : Dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise	293
Figure 176 : Consignes de sécurité en cas de débordements	298
Figure 177 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection.....	301
Figure 178 : Limites administratives du territoire relevant du SM3A	304
Figure 179 : Zone protégée par le système d'endiguement « Saint Pierre en Faucigny entre Arve et Borne »	305
Figure 180 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des venues d'eau).....	306
Figure 181 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des hauteurs d'eau)	307
Figure 182 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des vitesses d'écoulement)	307
Figure 183 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)	308
Figure 184 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des hauteurs d'eau)	309
Figure 185 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des vitesses d'écoulement).....	309
Figure 186 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche	310
Figure 187 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 1h00	311
Figure 188 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 2h00	311
Figure 189 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 3h00	312
Figure 190 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)	313
Figure 191 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des hauteurs d'eau)	314
Figure 192 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des vitesses d'écoulement).....	314
Figure 193 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche	315
Figure 194 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 1h00	316
Figure 195 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 2h00	316
Figure 196 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 3h00	317

Liste des tableaux

Tableau 1 : Délimitation des digues constituant le système d'endiguement (EDD CNR, 2019).....	23
Tableau 2 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.	26
Tableau 3 : Niveaux de sureté, de protection et de danger du système d'endiguement en état de travaux achevés.....	28
Tableau 4 : Synthèse des scénarios modélisés.....	31
Tableau 5 : Descriptif du cadre de la demande (arrêté du 30 septembre 2019)	43

Tableau 6 : Délimitation des digues constituant le système d'endiguement.....	46
Tableau 7 : Synthèse des conclusions du diagnostic mené sur les digues du Borne – CNR 2018, actualisé en 2020 ..	47
Tableau 8 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.	50
Tableau 9 : Population exposée dans l'ensemble de la zone protégée « Saint-Pierre-en-Faucigny entre Borne et Arve »	57
Tableau 10 : Population exposée selon les scénarios d'inondation considérés	57
Tableau 11 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze (pour les crues du Borne de différentes périodes de retour) – source CNR.....	59
Tableau 12 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants	66
Tableau 13 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.	69
Tableau 14 : Niveaux de sureté, de protection et de danger du système d'endiguement en état de travaux achevés...	79
Tableau 15 : Technique de confortement de digue après dessouchage	86
Tableau 16 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO	99
Tableau 17 : Débits de pointe pour des crues de l'Arve et du Giffre	100
Tableau 18 : Faune à enjeux écologiques moyen et fort - indicatif	108
Tableau 19 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze pour les crues du Borne - CNR.....	110
Tableau 20 : Description des crues historiques – source étude historique réalisée par Acthys Diffusion [DA37].....	113
Tableau 21 : Ponts présents sur la zone d'étude	118
Tableau 22 : Ponts présents sur la zone d'étude	124
Tableau 23 : Liste des seuils dans le lit de l'Arve et du Borne sur la zone d'étude.....	124
Tableau 24 : Concessionnaires des réseaux sur le secteur d'étude	125
Tableau 25 : Synthèse des conclusions du diagnostic mené sur les digues du Borne – CNR 2018, actualisé en 2020	126
Tableau 26 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.	132
Tableau 27 : Débits estimés et mesurés durant différentes crues de l'Arve et/ou du Borne dans le secteur de l'endiguement.....	152
Tableau 28 : Hiérarchisation de l'état de fragilité des endiguements du Borne	156
Tableau 29 : Identification des situations dangereuses et potentiels de danger pouvant intervenir sur une digue de protection contre les inondations (source : CNR)	172
Tableau 30 : Contenu des reconnaissances géophysiques 2017	174
Tableau 31 : Contenu des reconnaissances géotechniques 2017	175
Tableau 32 : Résultats des essais de cisaillement	177
Tableau 33 : Résultats des essais d'identification	178
Tableau 34 : Résultats des analyses physico-chimiques.....	179
Tableau 35 : Rive gauche – Paramètres géomécaniques	180
Tableau 36 : Stabilité actuelle – Conclusion générale - Borne.....	181
Tableau 37 : synthèse extraite de l'EDD de 2019 avec Arve en état actuel	181
Tableau 38 : Découpage en tronçons homogènes – RG.....	184
Tableau 39 : Objectifs de protection du système d'endiguement	184
Tableau 41 - Probabilité conditionnelle proposée par Vick (2002)	206
Tableau 42 - grille de probabilités conditionnelles pour la progression de l'érosion par surverse jusqu'à la rupture	212
Tableau 43 - Probabilités conditionnelles de surverse pour une crue Q_{100}	214
Tableau 44 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après le CFBR (pour $F_s > 1,10$).....	217
Tableau 45 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après Vicks (Pour $F_s < 1,10$)	217
Tableau 46 - probabilités conditionnelles pour l'instabilité des talus au glissement.....	218
Tableau 47 - Facteurs de sécurité de stabilité pour les différents tronçons.....	219
Tableau 48 - Probabilités conditionnelles pour la propagation du glissement jusqu'à la rupture	220
Tableau 49 - Evaluation de la probabilité conditionnelle d'initiation de l'érosion régressive.....	238
Tableau 50 - évaluation de la probabilité de présence d'une couche érodable amont/aval - érosion régressive	238
Tableau 51 : Vitesses et contraintes tractrices maximales pour l'érosion externe pour la Q_{100}	244
Tableau 52 : Principaux critères de dimensionnement / bien-fondé des techniques de protection en génie végétal (SUEZ CONSULTING)	245
Tableau 53 - Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale Q_{100}	255
Tableau 54 - Estimation du niveau de danger de chacun des tronçons	256
Tableau 55 : Technique de confortement de digue après dessouchage	278

Tableau 56 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO290
Tableau 57 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés301

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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.
- [2] *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.*
- [3] *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).*
- [4] *LOI n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République (1).*
- [5] *SM3A, Convention cadre de mutualisation de moyens et de gestion des systèmes d'endiguement de l'Etat, C18-008, 19 janvier 2017.*
- [6] *LOI n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles.*
- [7] *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).*
- [8] *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.*
- [9] *SOGREAH pour S.M.3.A., Etude Hydrologique, 1991.*
- [10] *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.*
- [11] *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.*
- [12] *SOGREAH pour S.M.3.A., Etude des transports solides sur l'Arve, Réf. 550490, Avril 2000.*
- [13] *SOGREAH LEDOUX CONSULTANTS pour S.M.3.A., Plan de Gestion des Matériaux solides de l'Arve, Réf. 2814036, Janvier 2004.*
- [14] *Hydratech pour S.M.3.A., Analyse des évolutions topographiques du lit de l'Arve, Ref 0163102, Juillet 2013..*
- [15] *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.*
- [16] *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.*

- [17] *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.*
- [18] «Etude des crues extrêmes du Borne à Saint-Pierre-en-Faucigny (149 km²) par la méthode SCHADEX pour SM3A, EDF, indice A, H-44200966-2020-000007, 14/01/2020».
- [19] «Estimation de l'aléa crue de l'Arve à Bonneville (1353 km²), à la station EDF/DTG du Pont Neuf à Arthaz/Reignier (1635 km²) et au Pont d'Etrembières (1875 km²) par la méthode SCHADEX pour SM3A, EDF, indice A, H-44200966-2020-000284, 07/10/2020».
- [20] *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.*
- [21] *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.*
- [22] *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.*
- [23] *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.*
- [24] *HYDROGÉOTECHNIQUE pour SM3A, RAPPORT D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE, Mission G1 (ES), Réf. : C.17.52067, Septembre 2017.*
- [25] *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.*
- [26] *Mosaïque environnement pour SM3A - Diagnostic environnemental Aménagement des digues de l'Arve et du Borne aval – Rapport Provisoire – Avril 2018.*
- [27] *SOGREAH pour SM3A, ETUDE GENERALE D'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE DU BORNE, Novembre 1998.*
- [28] *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..*
- [29] *Circulaire du 16 avril 2010 relative aux études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales.*
- [30] *Arbeausolutions pour SM3A, SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC DE LA VEGETATION IMPLANTÉE SUR 3 DES SYSTÈMES D'ENDIGUEMENTS DU SM3A, Version 1 du 13/07/2017.*
- [31] *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.*
- [32] *Degrees of Belief : Subjective Probability and Engineering Judgment – Steven G. Vick – 2002.*

- [33] 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>.
- [34] *Risque sismique et sécuritié des ouvrages hydraulique - MEDDE-DGPR, Octobre 2014.*
- [35] The International Levee Handbook. CIRIA. (2013).
- [36] *Guide international sur les digues - CEREMA - 2019.*
- [37] 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.*
- [38] *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai - CFBR, Octobre 2015.*
- [39] *LOI n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles.*
- [40] *SM3A, Consignes générales de surveillance et d'exploitation. Ouvrages classés en systèmes d'endiguement, 30 novembre 2015..*
- [41] «Document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM) – Commune de Bonneville - en cours d'élaboration».
- [42] «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.».
- [43] «Plan communal de sauvegarde – Commune de Saint Pierre en Faucigny – 10/10/2014».
- [44] «Plan communal de sauvegarde – Commune de Bonneville – 13/04/2016».
- [45] «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.».
- [46] «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.».
- [47] «ETRM et TERE0 pour S.M.3.A., Plan de gestion des matériaux solides du Borne et de ses affluents, Novembre 2018».
- [48] «Document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM) – Commune de Saint Pierre en Faucigny - approuvé en 2017».
- [49] «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».
- [50] «VTA Notice générale référencée DIGP 2017-087-01 et fiches synthèses de Mai 2017, CNR/Arbeausolutions».
- [51] «Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Comité Français des Barrages et Réservoirs. DRAFT Juin 2010».
- [52] «RAPPORT D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE, Mission G1 (ES), Réf. : C.17.52067, Septembre 2017,» HYDROGEOTECHNIQUE pour SM3A.

- [53] «MALLET T., DEGOUTTE G., ROYET P., Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales : définitions, conséquences et responsabilités, Colloque sur les Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence.».
- [54] «ARTELIA pour SM3A INVENTAIRES ET DIAGNOSTICS DES OUVRAGES DE PROTECTION HYDRAULIQUE SUR L'ARVE RAPPORT DE PHASE 2 : Recueil et analyse des données Dignes de Corbière, Bouchet, Bois Jolivet A, Jean Baptiste Rey (Crotte), Merlon Prison, Place T01 et T02, B.» ARTELIA pour SM3A.
- [55] «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.».
- [56] [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>.
- [57] [En ligne]. Available: <http://www.franceseisme.fr/donnees/intensites/carte.php>.
- [58] [En ligne]. Available: <http://www.legifrance.gouv.fr>.
- [59] «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».
- [60] «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.
- [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».

RESUME NON TECHNIQUE

0. RESUME NON TECHNIQUE DE L'ETUDE DE DANGERS

Ce résumé non technique est destiné au grand public dans le but de présenter des informations objectives et factuelles sur le système d'endiguement qui fait l'objet de cette présente Etude de Dangers (EDD).

0.1 Contexte législatif et réglementaire

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 et les décrets n°2007-1735 et n°2015-526 rénovent en profondeur les règles de sécurité et de sûreté des ouvrages hydrauliques (barrages de retenue et digues de protection des populations).

Ces textes posent le principe d'un recensement des ouvrages hydrauliques et imposent aux propriétaires, exploitants ou concessionnaires d'une digue de classe A, B, ou C, une étude de dangers.

Le nouvel arrêté sur le plan des études de dangers en date du 30 septembre 2019 modifiant celui du 7 avril 2017 précise 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

En s'appuyant sur ces textes, la présente étude a pour vocation d'exposer les risques que présentent les ouvrages pour la sécurité publique, directement ou indirectement, en cas d'accident. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité d'occurrence de ces accidents potentiels et les effets de ces accidents.

0.2 Présentation de l'autorité compétente

Le gestionnaire du système d'endiguement qui fait établir la présente Etude de Dangers est le Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents (SM3A) située à l'adresse suivante :



SYNDICAT MIXTE D'AMENAGEMENT DE L'ARVE ET DE SES AFFLUENTS

Etablissement public – Syndicat mixte fermé

Représenté par M. Bruno FOREL, Président

300 Chemin des Près Moulin

74800 Saint-Pierre-en-Faucigny

Mail : sm3a@sm3a.com

Tel : 04 50 25 60 14

Par arrêté préfectoral n°12-007 du 10 janvier 2012 et sur avis du préfet coordinateur de Bassin Rhône-Méditerranée, le SM3A, créé en 1995, est reconnu Syndicat Mixte EPTB. Depuis 2017, il exerce également les missions d'EPAGE, au sens de l'art.76 de la loi Notre (codifié au L213-12 du code de l'environnement), l'ensemble de ses membres ayant pris par anticipation la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux aquatiques et prévention des inondations) au 01/01/2017.

Depuis le 19 janvier 2017, l'Etat (via la DDT 74) a délégué par anticipation, l'exploitation des ouvrages de l'Etat au SM3A. Cette délégation a été cristallisée via la signature d'une convention cadre de mutualisation [DA13].

0.3 Description des ouvrages objet de l'étude

0.3.1 Cours d'eau concernés et localisation

Le système d'endiguement de « St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne » est localisé (Figure 1) en rive gauche du Borne, du Pont Royal (RD1203) jusqu'à la confluence avec l'Arve.

Les cours d'eau concernés : Le Borne et l'Arve.

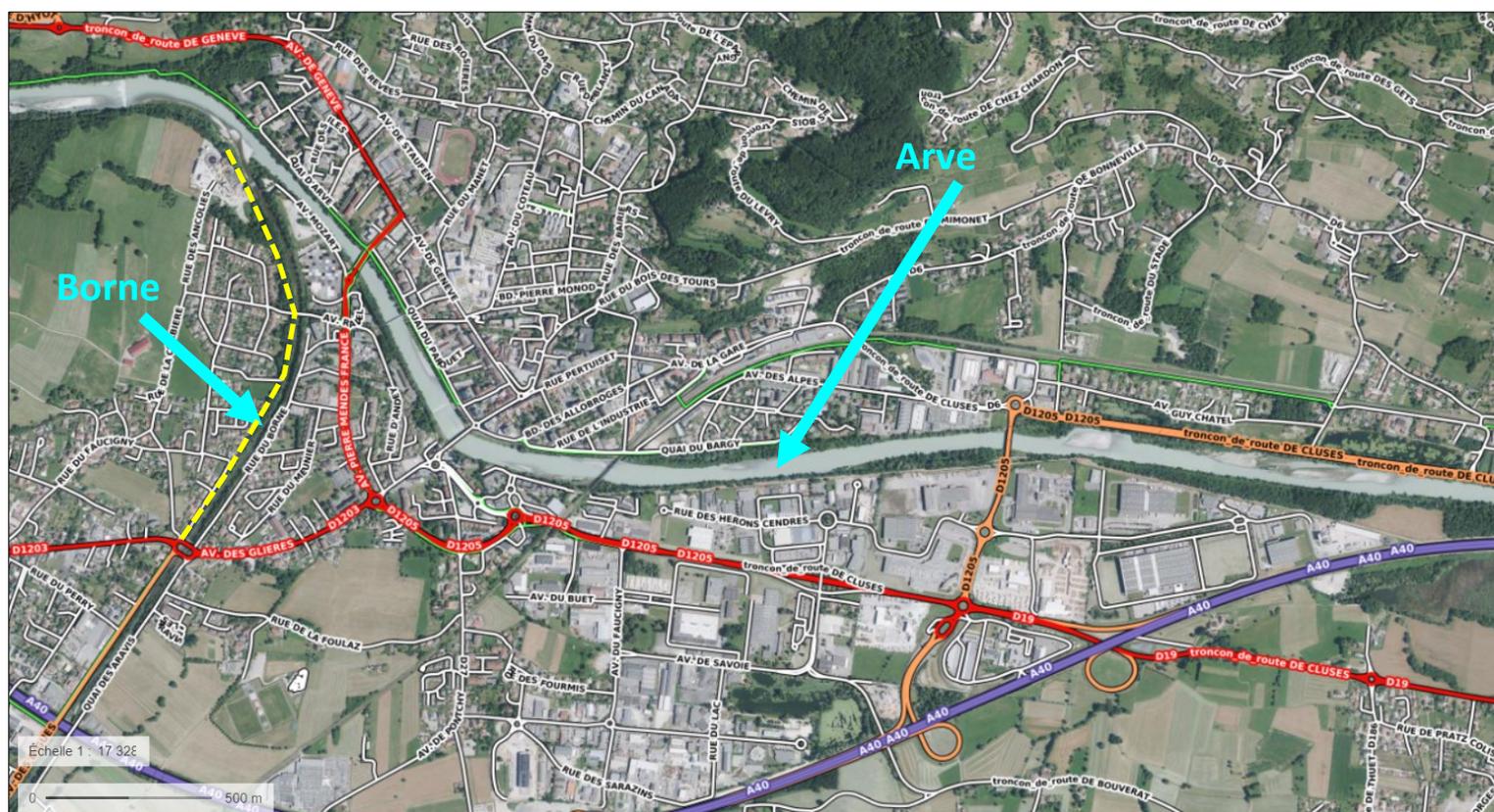


Figure 1 : Localisation du système d'endiguement (fond BD-ORTHO®) – couleur jaune

0.3.2 Objectif de l'étude

La présente étude de dangers (EDD) porte sur le système d'endiguement ARVE-RG-STPIE-24.17 dit « Borne rive gauche » qui protège les communes de Bonneville et de Saint-Pierre en Faucigny contre les inondations du Borne. L'EDD répond aux objectifs principaux suivants :

- Description exhaustive du système d'endiguement ;
- Détermination du niveau de protection du système d'endiguement ;
- Détermination de la zone protégée et des enjeux ;
- Etude des risques de défaillance du système d'endiguement ;
- Présentation de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour l'exercice de ses missions.

Le système d'endiguement « ARVE-RG-STPIE-24.17 – SAINT-PIERRE ENTRE ARVE ET BORNE » est constitué par les digues suivantes :

Les digues en rive gauche du Borne, entre le pont de la RD1203 et la confluence avec l'Arve, après travaux de confortement et de reconstruction.

Il est donc considéré l'état conforté sur le Borne suivant les préconisations de l'avant-projet décrit dans ce rapport.

Suivant l'annexe 1 de l'Arrêté du 30 avril 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 décrivant le plan des études de danger d'un système d'endiguement, le système d'endiguement « St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne » rentre dans le cadre :

« Cas 2 : demande d'autorisation initiale d'un système d'endiguement ou d'un aménagement hydraulique comportant des travaux ».

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

Article 3 -

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

0.3.3 Ouvrages constitutifs du système d'endiguement

0.3.3.1 Système d'endiguement actuel

Le système d'endiguement actuel est constitué des unités suivantes (Tableau 1) cartographiées sur la Figure 2 ci-après.

Tableau 1 : Délimitation des digues constituant le système d'endiguement (EDD CNR, 2019)

DIGUE	IDENTIFIANT_SIRS	COURS_EAU	RIVE	GESTIONNAIRE	LONGUEUR (m)	PK amont	PK aval
DIGUE DE TOISINGES	BORNE-RG-BONNE-0.61	BORNE	GAUCHE	SM3A	768	0.61	1.39
STEP	BORNE-RG-BONNE-0.05	BORNE	GAUCHE	SM3A	536	0.00	0.59

Comme susmentionné, le gestionnaire du système d'endiguement est le S.M.3.A. Les actions principales en tant que gestionnaires sont :

- Entretien courant et maintenance notamment concernant la végétation ;
- Suivi de l'état des ouvrages par des visites régulières ;
- Suivi de la tenue des ouvrages en crue et appel aux entreprises si nécessaire lors d'évènements exceptionnels ;

- Suivi post-événement (séisme ou crue) et préconisation de travaux de confortement en cas de désordres significatifs pouvant engager la sécurité de l'ouvrage lors de prochains événements.

La cartographie suivante précise l'emplacement des digues du Borne existantes sur le secteur d'étude. Les digues concernées par la présente étude sont situées en rive gauche du Borne.

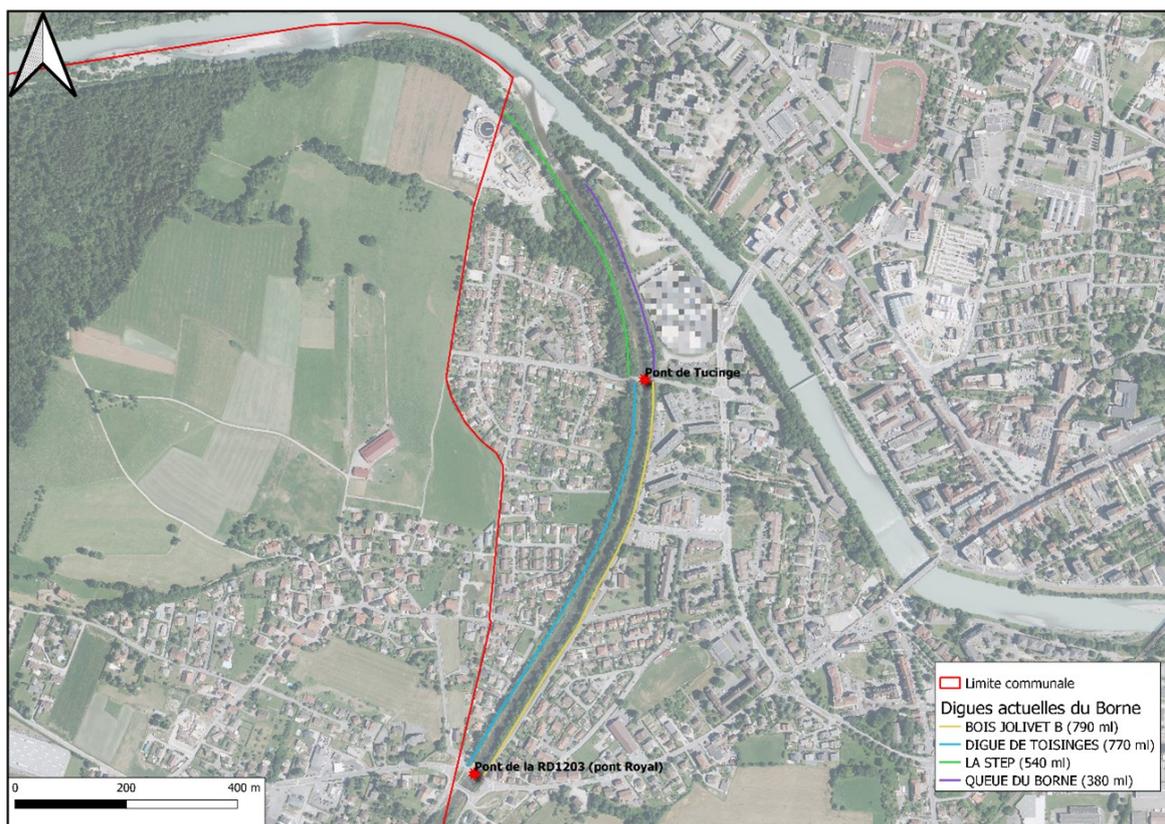


Figure 2 : Localisation précise des digues actuelles

0.3.3.2 Système d'endiguement après travaux

Les travaux de confortement des digues du Borne sont données par la vue en plan AVP ci-après.

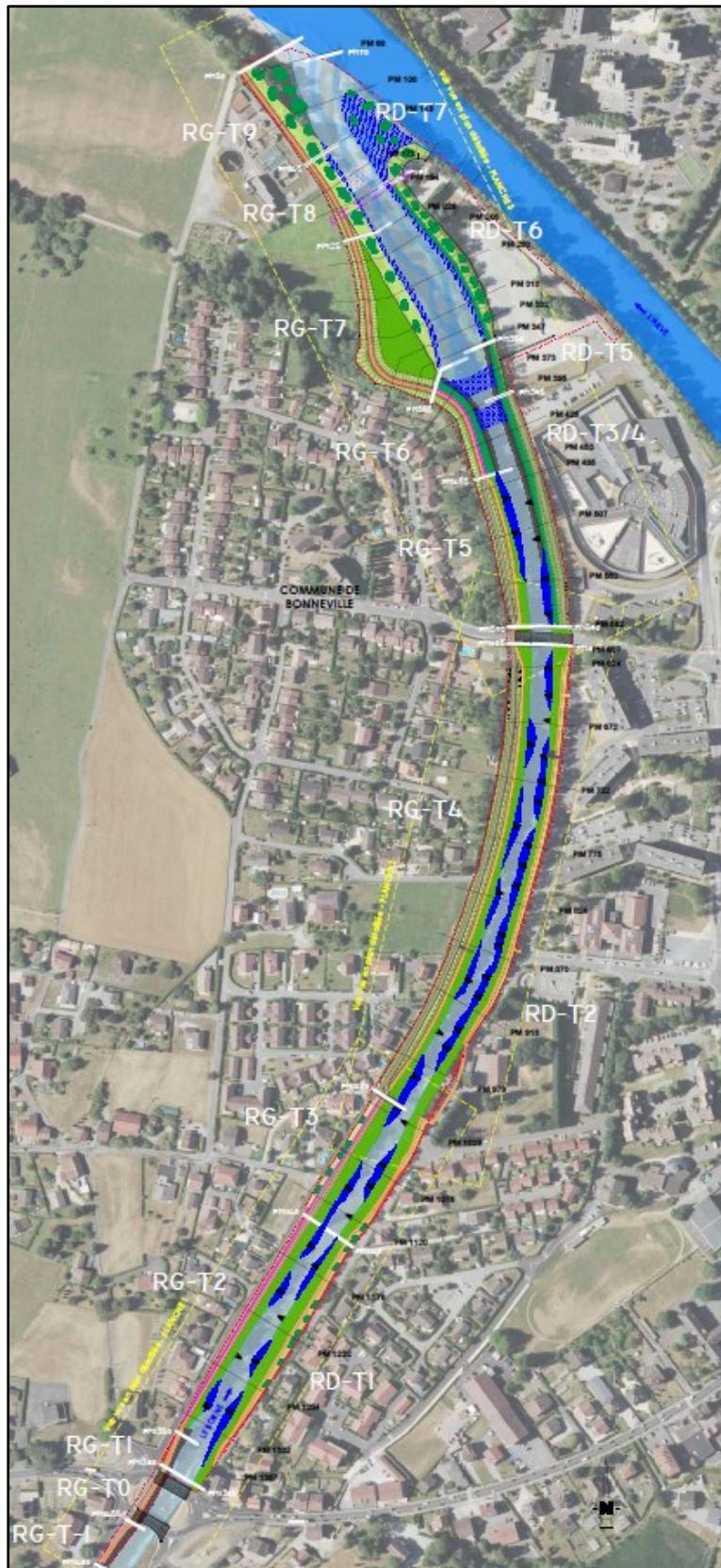


Figure 3 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne (RG-T2 à RG-T9 sur la rive gauche)

Tableau 2 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.

Digue	Tronçon homogène	PM Amont	PM Aval	Type d'intervention
Rive gauche				
-	(RG-T-1)	1480	1440	(Passage piste cyclable) – HORS SYSTEME D'ENDIGUEMENT
	(RG-T0)	1440	1380	
	(RG-T1)	1380	1350	
Toisings	RG-T2	1350	1140	Confortement interne (palplanches)
	RG-T3	1140	1020	
	RG-T4	1020	605	Confortement par l'aval (épaulement)
Step	RG-T5	590	455	Reprise intégrale de la digue
	RG-T6	455	355	
	RG-T7	355	225	Reprise intégrale de la digue (avec recul)
	RG-T8	225	145	Reprise intégrale de la digue
	RG-T9	145	50	

Description sommaire des travaux sur les digues du Borne :

L'endiguement du Borne, très ancien, puis l'urbanisation du lit majeur (ancien cône de déjection) limitent très fortement toute possibilité d'élargissement de l'espace alluvial.

Une des seules emprises disponibles sur le secteur d'étude est représentée par la partie aval, avec en rive droite des possibilités d'élargissement en aval de la prison à la confluence avec l'Arve (tronçons RD-T6 et T7) et en rive gauche, en face, soit en amont immédiat de la STEP (tronçon RG-T7). Ces élargissements étendent le secteur de confluence dynamique avec l'Arve, en créant un contexte alluvial varié et évolutif dans le temps (alternance de bancs graveleux, de surfaces de végétation pionnière, de surfaces plus ou moins en eau, de granulométrie variée des fonds, etc.). La création de cet élargissement nécessite le déplacement vers l'amont du point de contrôle de la cote des fonds du lit du Borne, avec la création d'une double rampe franchissable en blocs d'enrochements et le déplacement de la canalisation des eaux usées qui lui est associée.

La réflexion s'est faite pour maintenir au maximum la végétation en place. Aucun secteur n'est totalement défriché dans le cadre de l'opération. Il est proposé la gestion de la végétation en place avec la suppression des espèces végétales exotiques à tendance invasive, l'abattage sélectif des sujets arborés menaçant de basculer en berge puis l'enlèvement de la végétation existante uniquement au droit des ouvrages construits (ancrages des protections de berge, ancrages des épis, etc.). La lutte contre les espèces exotiques envahissantes se réalisent principalement par la coupe des tiges aériennes des renouées asiatiques et buddleias, leur mise en bigs-bags avec évacuation puis le terrassement en déblais des substrats contaminés par les racines de ces espèces puis le broyage-concassage de ces matériaux.

Les interventions permettant de préserver tout ou partie de la végétation des berges sont les suivantes :

- **Confortement interne** : il s'agit de créer un voile imperméable à l'intérieur de la digue, afin d'assurer une coupure hydraulique supprimant tout risque d'érosion interne de l'ouvrage (lié à la végétation, aux caractéristiques du remblais en place, etc.). Si la digue dans laquelle le voile est disposé n'est pas stable (glissement ou érosion externe), le voile est rendu auto-stable ; il constitue alors à lui seul l'ouvrage de protection contre les inondations.

- **Confortement par l'aval** : il s'agit de créer un ouvrage au droit du talus aval de la digue actuelle, qui joue le rôle de digue. Le type d'ouvrage retenu (mur, remblais) dépend notamment de l'emprise disponible. Le nouvel ouvrage doit être stable en cas de glissement ou érosion de l'ancienne digue.
- **Création complète d'une nouvelle digue en retrait de la végétation existante** : lorsque les emprises le permettent, l'élargissement de l'espace alluvial peut être opéré en maintenant les franges de végétation actuelles puis en recréant une nouvelle digue complète auto-stable et étanche en retrait.

Afin de délester les pieds de berges d'une partie de leurs contraintes hydrauliques, une série d'épis est proposée, essentiellement en rive droite qui marque un léger extrados de courbure. Le calage de la cote supérieure des épis est établi quelques 50 cm au-dessus de la cote atteinte par les hautes eaux moyennes du mois de mai (fonte des neiges). On verra plus loin que les épis n'ont pas pour seule fonction de participer à la stabilisation des pieds de berge mais jouent également un rôle prépondérant dans la restauration hydro-écologique du lit vif du Borne. Ils sont également le support ou le "squelette" au maintien et au développement de risbermes graveleuses au pied des berges ; élément essentiel à la fonction de corridor écologique du cours d'eau.

Lorsque des protections de berge sont néanmoins nécessaires (par exemple sur les tronçons RD-T3/T4 au droit du secteur de la prison, soit en remplacement d'anciens enrochements/remblais), des techniques mixtes sont proposées, combinant une base sous-fluviale et de pied de berge en enrochement et une partie supérieure issue du génie biologique, illustrée par la technique des lits de plants et plançons (la limite d'implantation de la végétation au-dessus des enrochements est calée quelques 20 cm au-dessus de la cote atteinte par les hautes eaux moyennes du mois de mai).

0.3.4 Aménagement hydrauliques (article R562-18)

Sur l'aménagement, aucun ouvrage hydraulique au sens de l'article R562-18 n'est recensé.

0.4 Zone protégée et niveau de protection du système d'endiguement en situation de « travaux achevés »

0.4.1 La zone protégée

La zone protégée correspond au territoire inondé par un événement hydrologique correspondant au niveau de protection sans la présence du système d'endiguement.

Le niveau de protection a été fixé par le gestionnaire à la **crue centennale (Q100)** pour l'ensemble du système d'endiguement (situation après travaux).

L'endiguement a été construit pour éviter le débordement en rive gauche du Borne. **La zone protégée concerne les communes de St-Pierre-en-Faucigny et de Bonneville (voir Figure 4).**

La zone protégée correspond à l'emprise protégée en arrière des endiguements. Cette emprise est calculée en effectuant des scénarios de modélisations sans système d'endiguement à l'hydrologie correspondant au niveau de protection retenu (Q100).

Le contour de la zone protégée est dessiné à partir des résultats bruts de modélisation en adoucissant le contour sur la base d'une analyse topographique incluant notamment la

topographie urbaine qui joue un rôle structurant sur les écoulements (positions des bâtiments, des routes...).

0.4.2 Les niveaux de protection, de sureté et de danger

0.4.2.1 Définitions

En crue, différents niveaux d'eaux sont identifiés réglementairement :

- Niveau de sûreté : Situation jusqu'à laquelle la probabilité de rupture de la digue est très faible (bornée à 5% par la réglementation) ;
- Niveau de protection : Niveau relevant d'un engagement du maître d'ouvrage, ce niveau est inférieur ou égal au niveau de sûreté ;
- Niveau de danger : Situation au-delà de laquelle la rupture de l'ouvrage est très probable (bornée à 50% par la réglementation).

0.4.2.2 Cas du système d'endiguement étudié

Le niveau de protection est défini par l'article R. 214-119-1 du code de l'environnement. C'est la hauteur maximale définie par le gestionnaire que peut atteindre l'eau sans que la zone protégée soit inondée en raison du débordement, du contournement, ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. Le niveau de protection est apprécié au regard, soit d'un débit du cours d'eau en crue ou d'une cote de niveau atteinte par celui-ci, soit d'un niveau marin pour le risque de submersion marine.

Dans le cadre des études de dangers de systèmes d'endiguements, l'arrêté du 07 Avril 2017 définit ce niveau de protection comme présentant un risque résiduel de rupture de l'ouvrage d'au plus 5%.

Le niveau de protection du système d'endiguement en état de travaux achevés sur les digues du Borne (rive gauche) correspond à une crue centennale du Borne, soit un débit de pointe de 178.4 m³/s.

Le tableau suivant permet de synthétiser les niveaux de protection, de sureté et de danger.

Tableau 3 : Niveaux de sureté, de protection et de danger du système d'endiguement en état de travaux achevés

Niveau	Lieu de référence	Cote Z	Débit correspondant
Sureté	Echelle n°1 - Pont Royal	451.97 m NGF	Q100 = 178 m ³ /s
	Echelle n°2 - Confluence	443.06 m NGF	
Protection	Echelle n°1 - Pont Royal	451.97 m NGF	Q100 = 178 m ³ /s
	Echelle n°2 - Confluence	443.06 m NGF	
Danger	Echelle n°1 - Pont Royal	452.19 m NGF	Q300 = 213 m ³ /s
	Echelle n°2 - Confluence	443.52 m NGF	

A noter que le niveau de protection apparent des digues après achèvement des travaux correspond à la cote $Z_{Q100} + 1$ m de revanche.

La zone protégée par le système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne" et les niveaux de protection au droit des lieux de références sont présentés dans la figure ci-après :

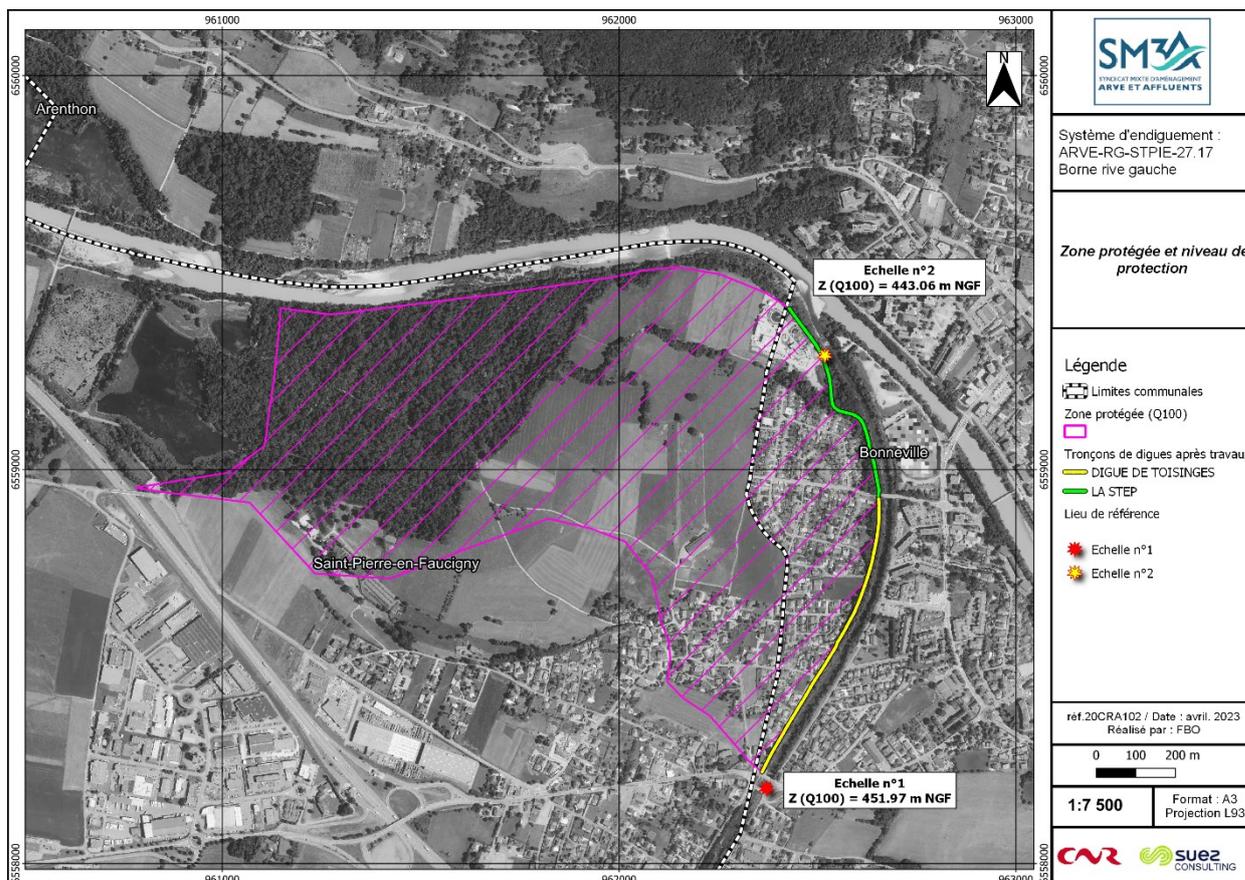


Figure 4 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection

0.4.3 Estimation de la population protégée

La superficie de la zone protégée est d'environ 117 ha.

Une évaluation de la population protégée, présentée dans le chapitre 3, fait état de **697 personnes impactées par les crues**.

Les principaux enjeux présents dans la zone protégée : habitations, siège du SM3A (établissement participant à la gestion de crise), La STEP de Bonneville et la crèche Babilou (ERP).

La population protégée par le système d'endiguement de St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne est comprise entre 30 et 3 000 personnes. **Le système d'endiguement sera donc de classe C au sens de l'article R214-113** du décret sur la sécurité des ouvrages hydrauliques n°2015-526 du 12 mai 2015.

0.5 Présentation du fonctionnement du système d'endiguement en situation de « travaux achevés »

0.5.1 Fonction principale

La fonction principale de l'endiguement est la protection de la plaine de St-Pierre-en-Faucigny et de Bonneville contre les inondations du Borne.

Les fonctions secondaires sont la résistance aux pressions de l'eau, le maintien de voies d'accès et des réseaux, la continuité avec les autres systèmes de protection et la continuité hydrogéologique.

Conformément au décret en vigueur, l'étude s'attache à étudier les risques vis-à-vis des écoulements à surface libre du fait d'une rupture d'endiguement ou d'une surverse. En effet, ces ruptures ou surverses peuvent, par effet domino, entraîner un risque pour les populations situées en zone protégées du fait des vitesses et les montées d'eau rapides qu'elles génèrent. Les écoulements souterrains, phénomènes beaucoup plus lents, ne sont pas considérés dans cette étude.

0.5.2 Démarche de réalisation de l'étude de dangers

Afin de présenter le fonctionnement du système d'endiguement à l'occasion des différents scénarios de montée des eaux sous l'effet d'évènements (crues) d'intensités variées, nous avons étudié les scénarios suivants :

➤ **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). On admet que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus ;

➤ **Scénario 2 : défaillance fonctionnelle**

Le scénario 2 prévu dans l'arrêté du 30 septembre 2019 correspond à une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement quand le niveau des écoulements correspond au niveau de protection. Cette défaillance fonctionnelle est liée à une défaillance d'un dispositif de régulation des écoulements hydrauliques, sans être accompagné par une défaillance structurelle des ouvrages. Dans le cas du système d'endiguement de la présente étude, aucun dispositif de régulation des écoulements hydrauliques n'étant présent, ce scénario n'a pas lieu d'être. Il n'est par conséquent pas étudié de scénario 2 dans cette étude.

➤ **Scénario 3 : défaillance structurelle**

Ce scénario correspond à une défaillance structurelle du système d'endiguement. D'après l'arrêté du 30 septembre 2019, le niveau de l'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture supérieure à 50 %. Dans le cas du système d'endiguement en rive gauche du Borne, la défaillance structurelle est représentée par l'ouverture de deux brèches dans le corps de la digue suite à une crue d'occurrence tri-centennale du Borne.

Suivant l'annexe de l'arrêté du 30 septembre 2019, l'objectif de l'analyse est d'évaluer le risque lié à l'inondation en estimant les situations potentiellement dangereuses pour les différents scénarios et les probabilités de ces mises en danger.

Le tableau suivant synthétise les principaux résultats pour chaque scénario testé en état projet.

A noter que le modèle hydraulique a été adapté pour intégrer les principales modifications prévues dans le projet de confortement des digues du Borne.

Tableau 4 : Synthèse des scénarios modélisés

Nom du scénario	Crue de protection – fonctionnement nominal	Rupture par brèche (défaillance structurelle)	Rupture par brèche (défaillance structurelle)
Numéro de scénario	S 1	S 3-1	S 3-2
Cours d'eau	Borne	Borne	Borne
Mode et localisation de défaillance	/	PMB 0.95 – 0.85	PMB 0.52 – 0.42
Débit / occurrence de crue	Q100 Borne – Q30 Arve	Q300 Borne – Q50 Arve	Q300 Borne – Q50 Arve
Hauteurs d'eau et vitesses maximales dans la zone protégée	Pas d'écoulement dans la zone protégée	Présences d'eaux dangereuses (hauteurs > 1m ou vitesse > 0.5 m/s)	Présences d'eaux dangereuses (hauteurs > 1m ou vitesse > 0.5 m/s)
Temps d'atteinte des premières habitations	Sans objet	Moins de 30 min	Moins de 30 min

Les débits de pointe en hydrologie de crue sur les cours d'eau concernés sur la zone d'étude sont les suivants :

Débit de pointe [m3/s]	Q10	Q30	Q50	Q100	Q200	Q300
Borne aval	108	149	162	178	195	213
Arve – amont Borne	623	825	917	1094	1258	1359

Choix des scénarios de brèches :

La défaillance structurelle est représentée par deux scénarios de brèches pour une occurrence de crue tricentenaire (Q300).

Les caractéristiques des brèches sont données dans le chapitre 8.

Pour les deux scénarios 3, la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps est donnée sous forme de hauteurs d'eau dans la zone protégée.

Le sous chapitre suivant présente les cartographies des venues d'eau pour chaque scénario modélisé.

0.5.3 Présentation des scénarios

0.5.3.1 Scénario 1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'étude de dangers, le scénario 1 représente le fonctionnement nominal du système d'endiguement dans le cas du passage d'une crue correspondant au niveau de protection du système (Q100). On admettra que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus.

Sur la carte des venues d'eau ci-dessous, on constate que la crue centennale ne déborde pas dans la zone protégée par le système d'endiguement en situation de travaux achevés.

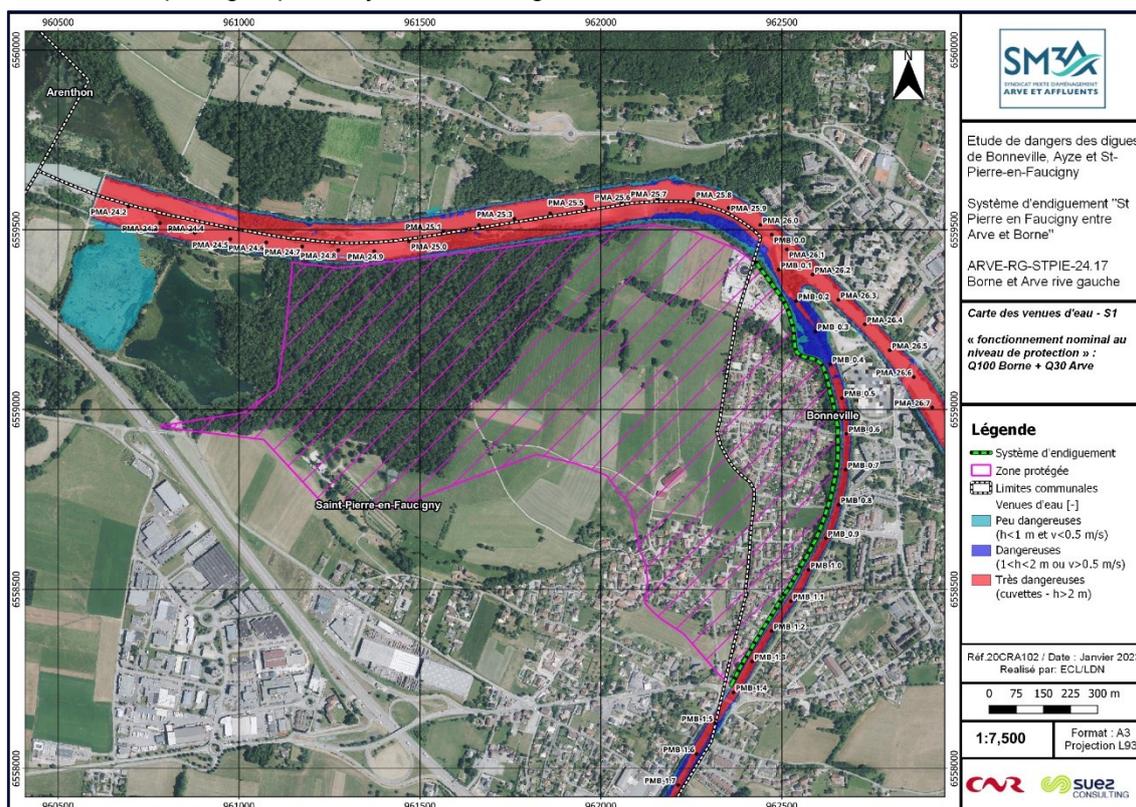


Figure 5 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

0.5.3.2 Scénario 3 : Défaillance structurelle du système d'endiguement

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'étude de dangers, 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 de l'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture supérieur à 50 %.

Dans le cas du système d'endiguement de Saint-Pierre en Faucigny entre Arve et Borne, la défaillance structurelle est représentée par l'ouverture de deux brèches dans le corps de la digue, sur une occurrence de crue tricentenaire (Q300).

Deux sous-scénarios sont modélisés (S3.1 et S3.2). Les caractéristiques des brèches sont données dans le chapitre 8.

Sur les deux sous-scénarios, les cartographies des venues d'eau montrent qu'une partie de la zone protégée est inondée.

A la suite des cartographies (valeurs maximales des inondations), la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps est donnée sous forme de figures successives des animations de la modélisation (à partir du moment du début de l'ouverture des brèches).

0.5.3.2.1 Scénario 3.1 : ouverture d'une brèche dans la digue de Toisinges

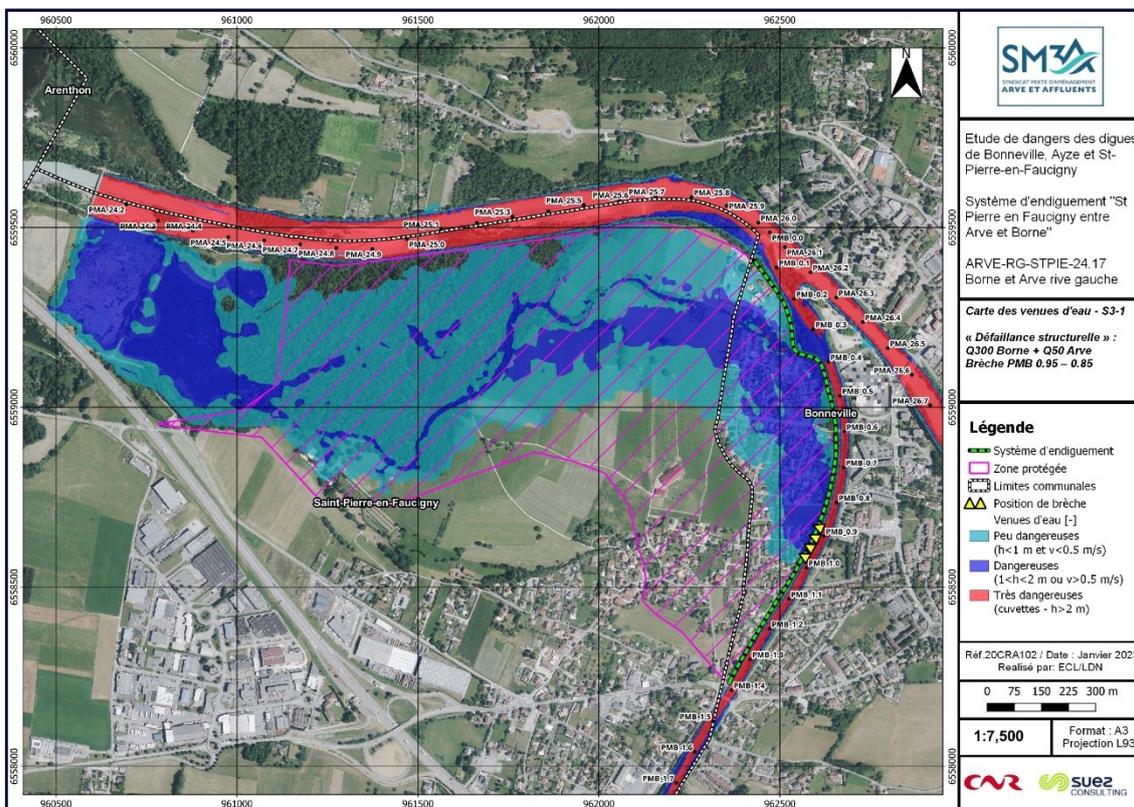


Figure 6 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

Ci-dessous une description et une série de cartographies de la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps (l'onde de submersion est représentée sous forme de hauteurs d'eau) :

- ✓ Environ 1 heures après l'ouverture de la brèche dans la digue de Toisinges, la quasi-totalité du quartier de Tucinge, située en aval de la brèche, est inondée. La moitié de la STEP de Bonneville est inondée.
- ✓ Environ 2 heures après l'ouverture, l'inondation se propage en aval et inonde la forêt communale de Bonneville. Les étangs situés en amont de la passerelle du SM3A sont également submergés. A noter que ces derniers secteurs ne présentent pas d'enjeu particuliers. Enfin, le site du SM3A est inondé.
- ✓ Environ 3 heures après l'ouverture de la brèche, l'enveloppe inondée est sensiblement la même que à deux heures de l'ouverture. Néanmoins, les hauteurs d'eau augmentent au niveau des étangs.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

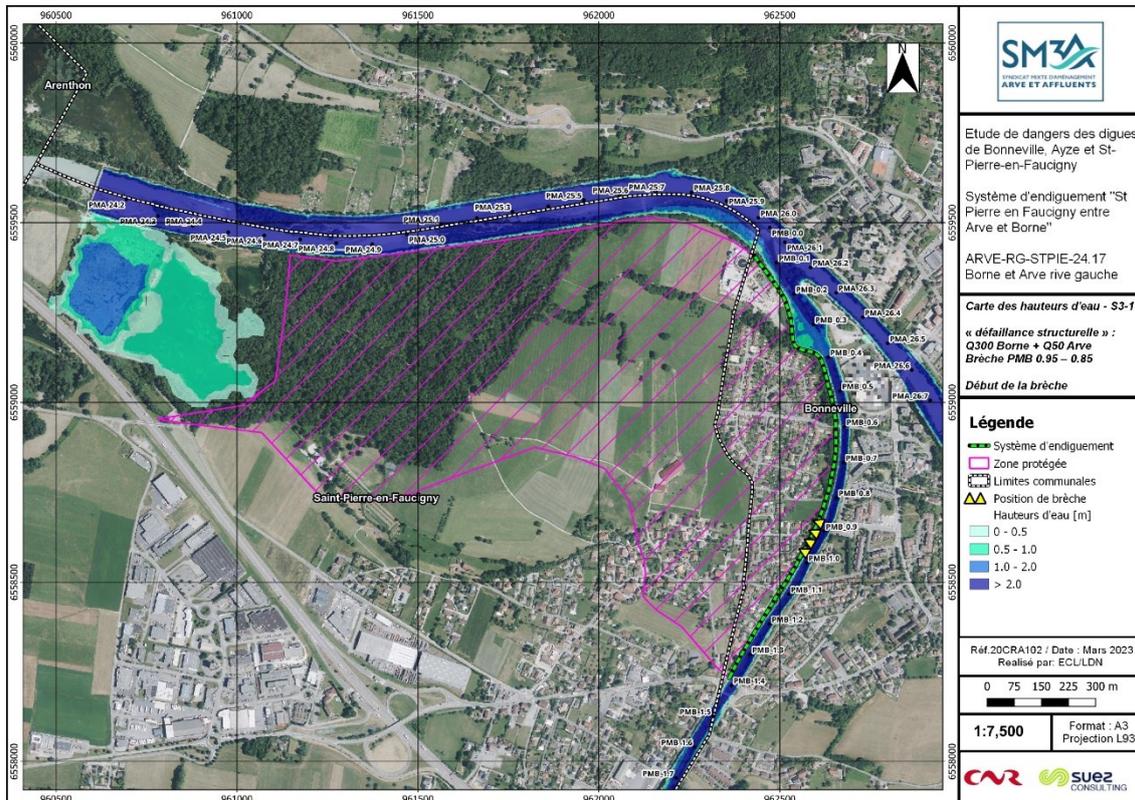


Figure 7 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche

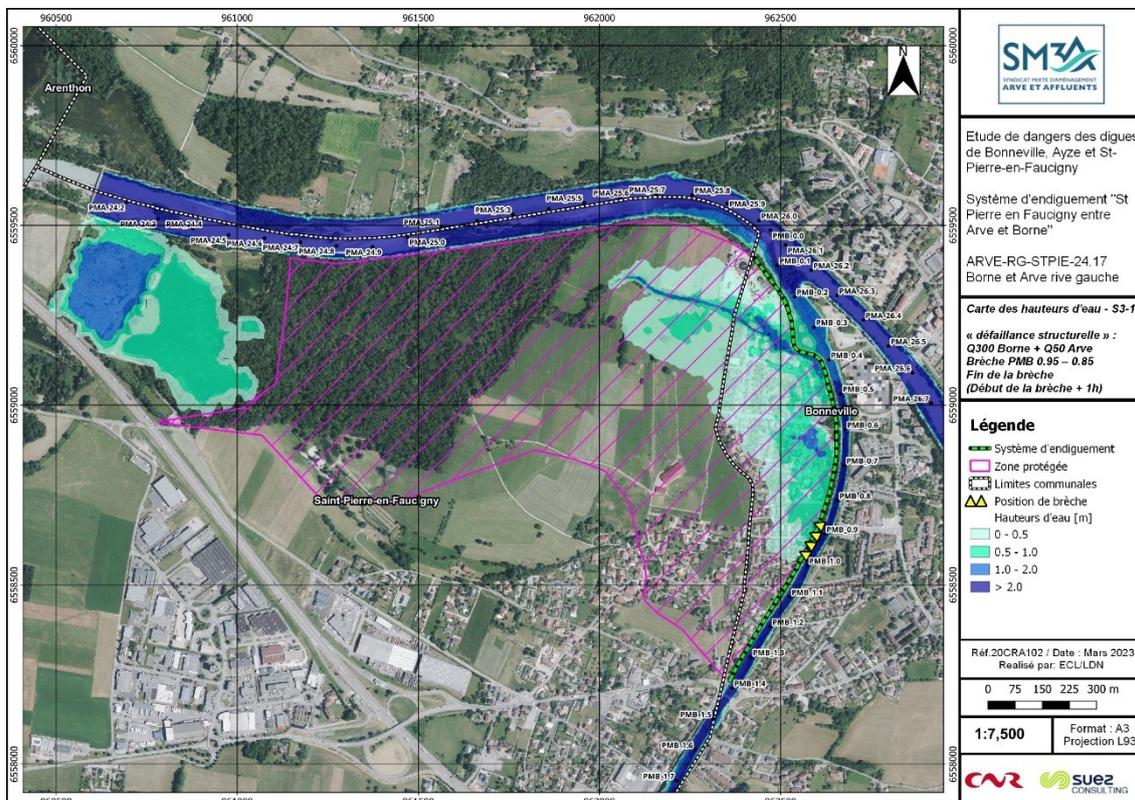


Figure 8 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 1h00

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

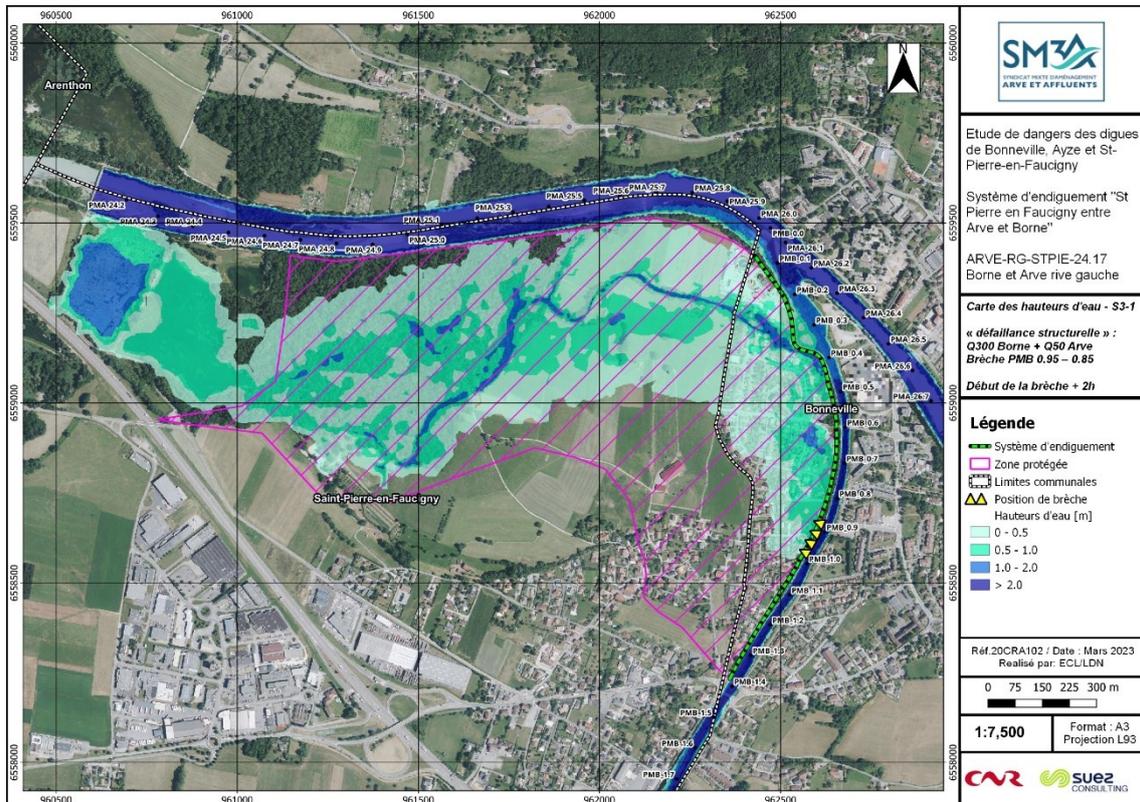


Figure 9 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 2h00

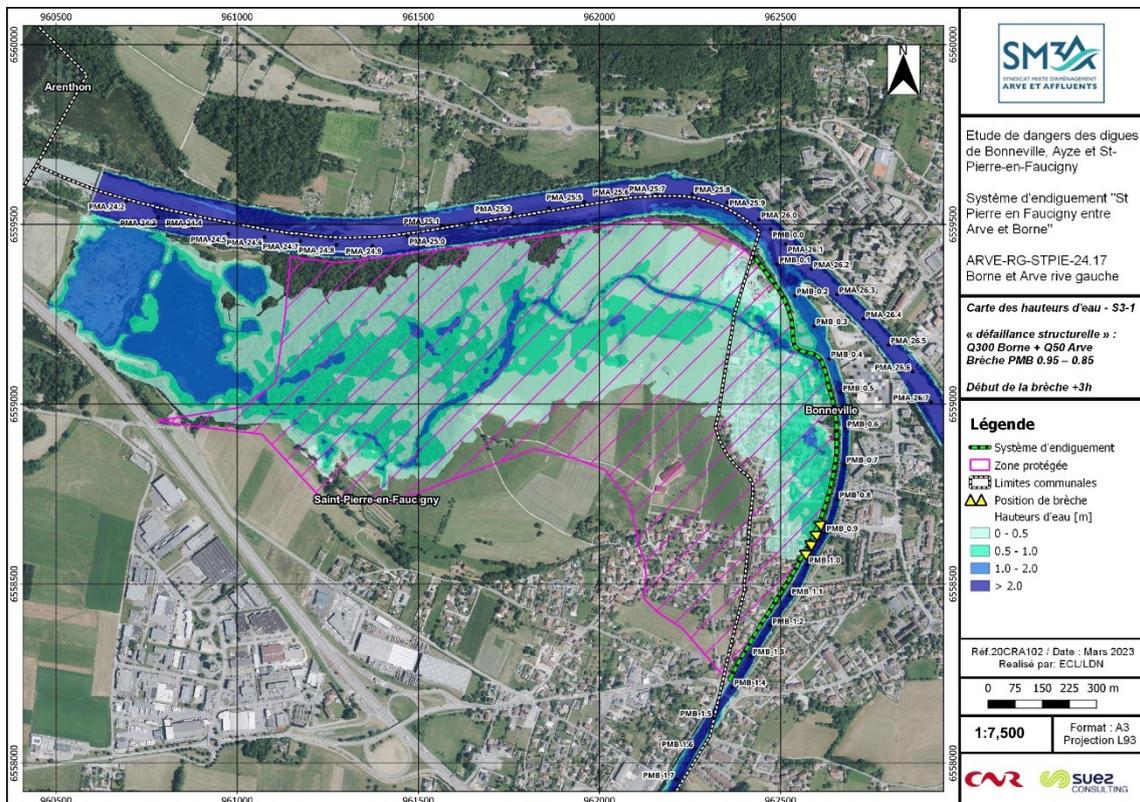


Figure 10 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 3h00

0.5.3.2.2 Scénario 3.2 : ouverture d'une brèche dans la digue de la STEP

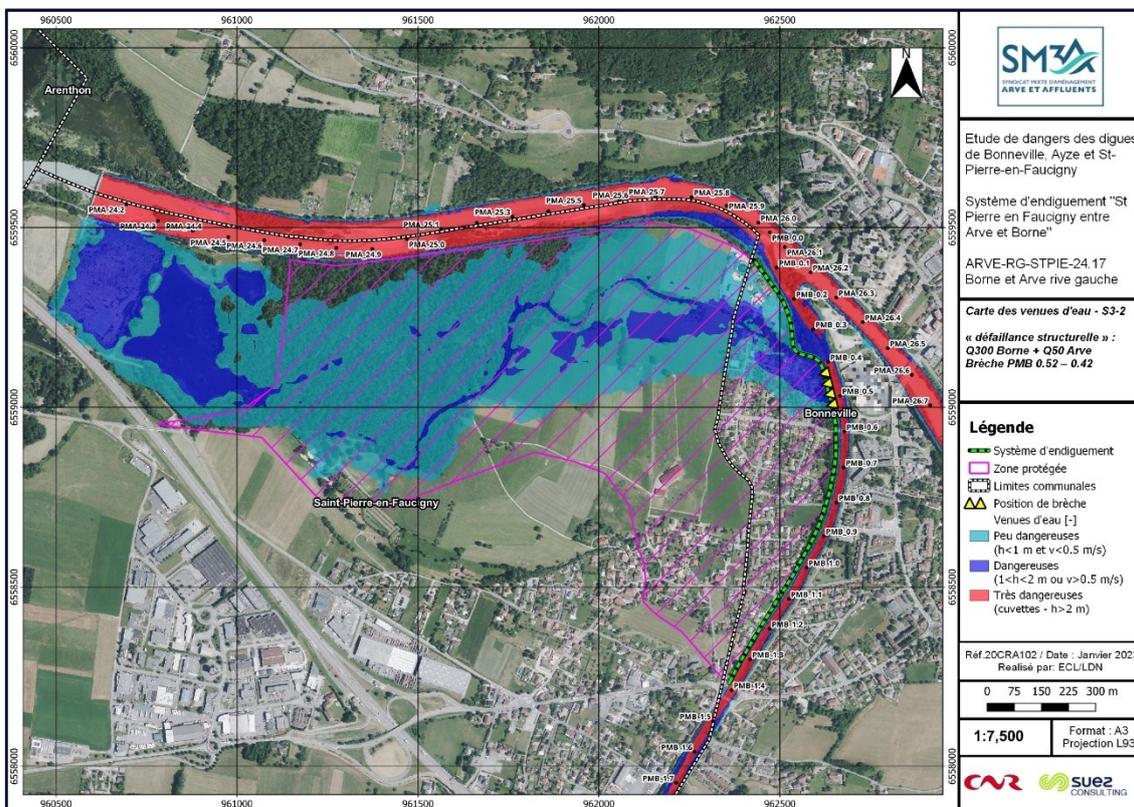


Figure 11 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

Ci-dessous une description et une série de cartographies de la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps (l'onde de submersion est représentée sous forme de hauteurs d'eau) :

- ✓ Environ 1 heures après l'ouverture de la brèche dans la digue de la STEP, une partie du quartier de Tucinge, située en aval du pont de Toisinges, est inondée. La moitié de la STEP de Bonneville est inondée.
- ✓ Environ 2 heures après l'ouverture de la brèche, l'inondation se propage en aval et inonde la forêt communale de Bonneville. Les étangs situés en amont de la passerelle du SM3A sont également submergés. A noter que ces derniers secteurs ne présentent pas d'enjeux particuliers. Enfin, le site du SM3A est inondé.
- ✓ Environ 3 heures après l'ouverture de la brèche, l'enveloppe inondée est sensiblement la même que à deux heures de l'ouverture. Néanmoins, les hauteurs d'eau augmentent au niveau des étangs.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

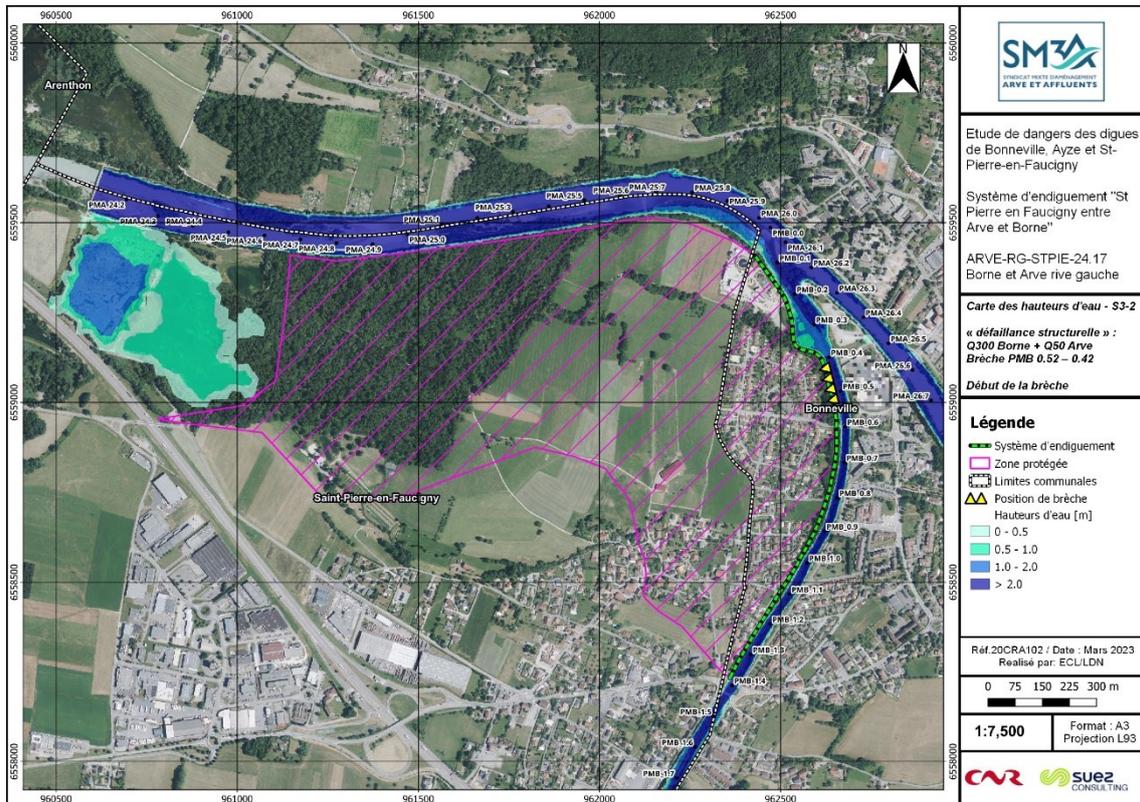


Figure 12 : Défaillance structurale 3-2 – début de la brèche

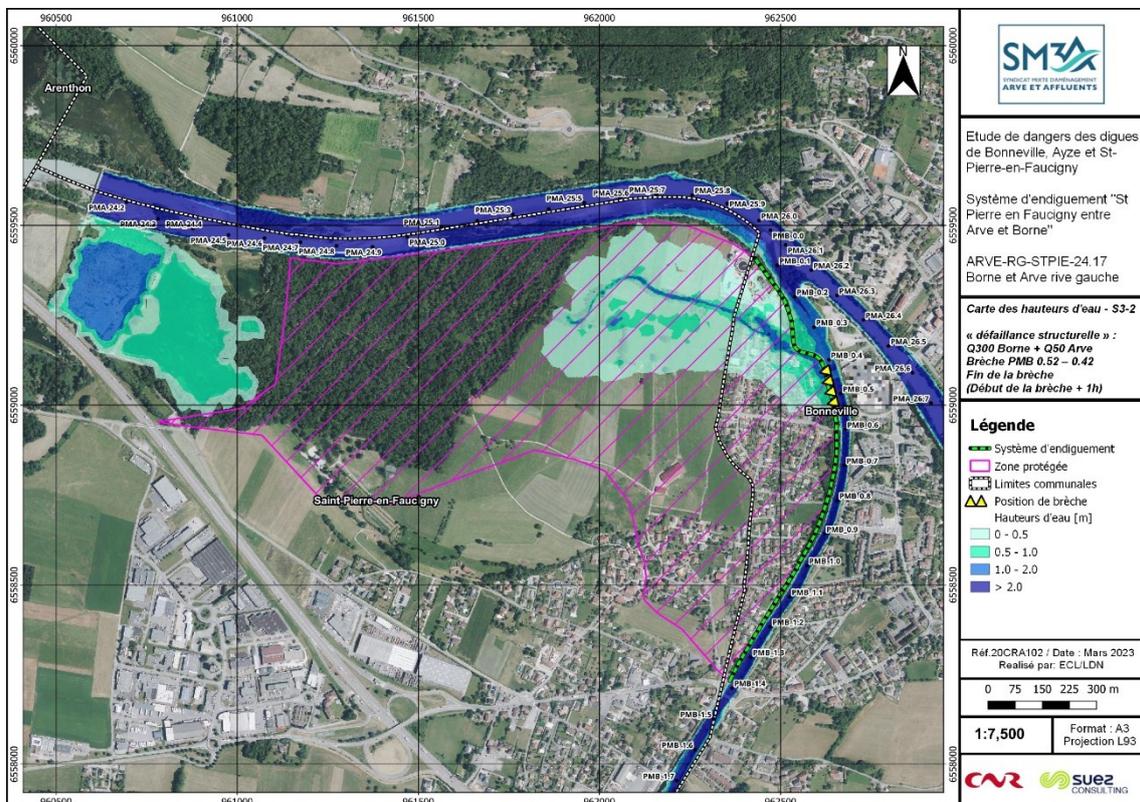


Figure 13 : Défaillance structurale 3-2 – début de la brèche + 1h00

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

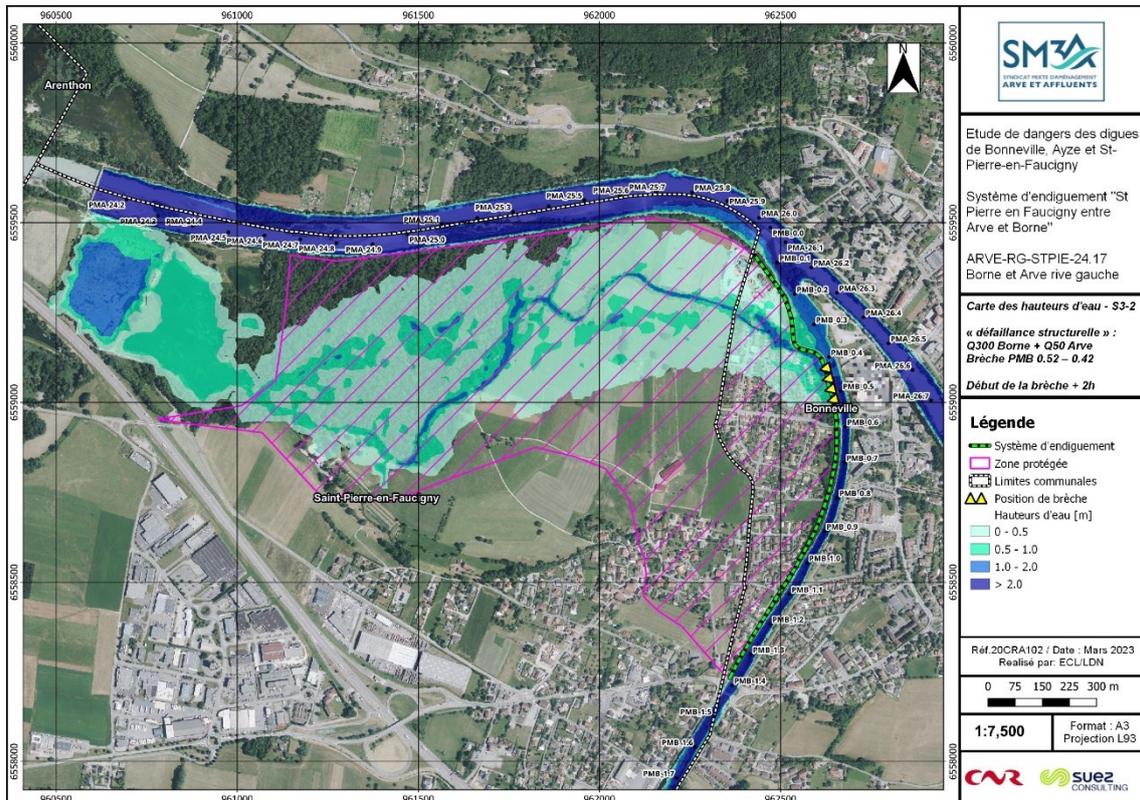


Figure 14 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 2h00

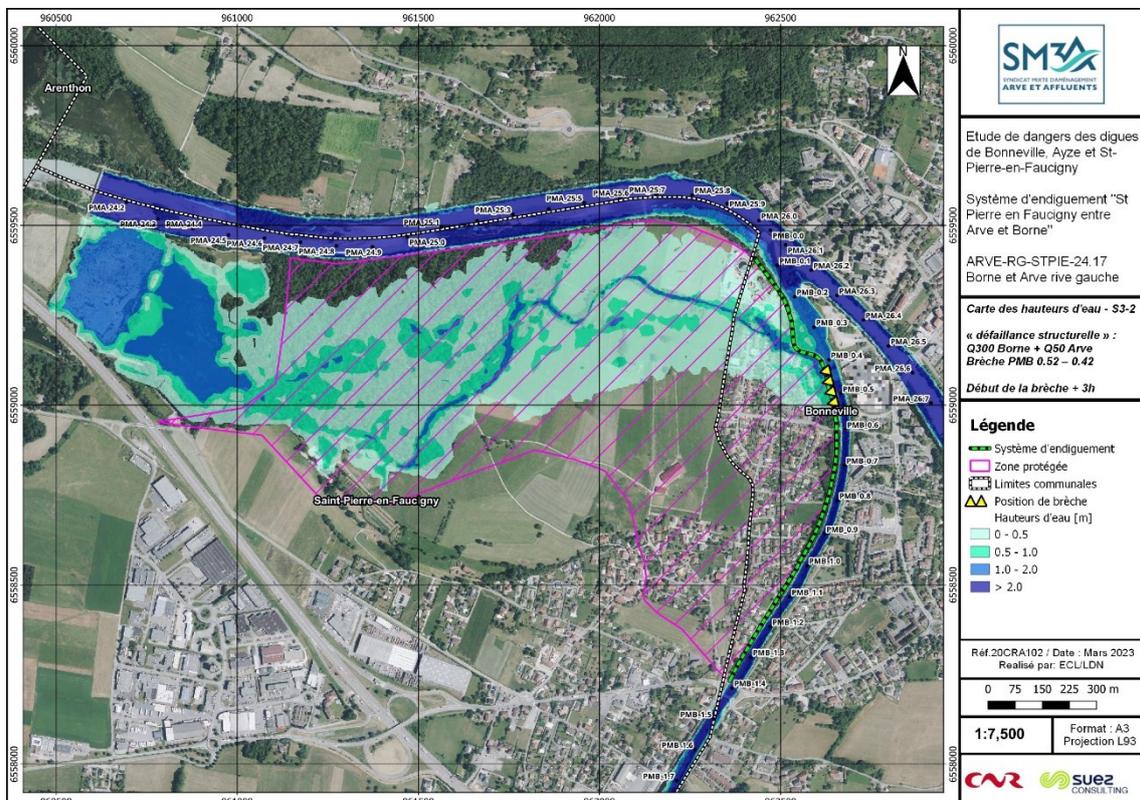


Figure 15 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 3h00

DOCUMENT A : PRESENTATION GENERALE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

1. RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

1.1 Gestionnaire du système d'endiguement

Le gestionnaire du système d'endiguement qui fait établir la présente Etude de Dangers est le Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents (SM3A) située à l'adresse suivante :



SYNDICAT MIXTE D'AMENAGEMENT DE L'ARVE ET DE SES AFFLUENTS

Etablissement public – Syndicat mixte fermé

Représenté par M. Bruno FOREL, Président

300 Chemin des Près Moulin

74800 Saint-Pierre-en-Faucigny

Mail : sm3a@sm3a.com

Tel : 04 50 25 60 14

Par arrêté préfectoral n°12-007 du 10 janvier 2012 [1] et sur avis du préfet coordinateur de Bassin Rhône-Méditerranée, le SM3A, créé en 1995, est reconnu Syndicat Mixte EPTB. Depuis 2017, il exerce également les missions d'EPAGE, au sens de l'art.76 de la loi Notre [2] (codifié au L213-12 du code de l'environnement), l'ensemble de ses membres ayant pris par anticipation la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux aquatiques et prévention des inondations) au 01/01/2017.

Depuis le 19 janvier 2017, l'Etat (via la DDT 74) a délégué par anticipation, l'exploitation des ouvrages de l'Etat au SM3A. Cette délégation a été cristallisée via la signature d'une convention cadre de mutualisation [3].

1.2 Compétence GEMAPI

La gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI) est une compétence confiée aux intercommunalités (métropoles, communautés urbaines, communautés d'agglomération, communautés de communes) par les lois de décentralisation n° 2014-58 du 27 janvier 2014 [4] et n° 2015-991 du 7 août 2015, depuis le 1er janvier 2018.

La loi n° 2017-1838 du 30 décembre 2017 [5] relative à l'exercice des compétences des collectivités territoriales dans le domaine de la GEMAPI a introduit plusieurs éléments de souplesse permettant une mise en œuvre plus rapide et plus efficace, avec la possibilité pour les départements et les régions de continuer à exercer certaines missions en accord avec les EPCI bénéficiaires et la possibilité pour ces EPCI d'ajuster plus finement la gouvernance de cette compétence.

Les actions les plus structurantes en matière de prévention des inondations pour les territoires consistent en la surveillance, l'entretien et la réhabilitation des digues qui sont des ouvrages passifs faisant rempart entre le cours d'eau en crue et le territoire devant être protégé. La réglementation (le décret n° 2015-526 du 12 mai 2015, dit "décret digues" [6]) impose que ces ouvrages soient désormais réorganisés en "système d'endiguement".

Sur le territoire d'étude, le SM3A est l'autorité compétente par transfert des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI).

Une convention de mutualisation des moyens entre l'Etat (via la DDT74) et le SM3A a été signée le 22 décembre 2017 (cf. [3]). Elle précise que :

« A la date de la signature de la convention, l'Etat est propriétaire et gestionnaire des ouvrages dont la consistance est propriétaire des ouvrages dont la consistance est précisée à l'article 3 ci-après. Ces ouvrages sont situés en rives droite et gauche de l'Arve entre la confluence du Bon Nant et la frontière Suisse. Ils ont été érigés par l'administration à l'époque sarde et ont fait l'objet d'un suivi et entretien par les services de l'état depuis 2004.

La convention reste sans effet sur la propriété des ouvrages et des terrains de leur emprise qui restent domaniaux.

Dans le cadre de la loi n°2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (loi MAPTAN) [4], la compétence de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI) est confiée exclusivement aux établissements publics de coopération à fiscalité propre. Les établissements publics de coopération intercommunale de l'Arve ont choisi d'anticiper la prise de compétence GEMAPI et de la transférer, sur ce linéaire de l'Arve, au SM3A.

Le SM3A est donc l'autorité gestionnaire des ouvrages de prévention des inondations au sens du point 5 de l'article L211-7-I du Code de l'environnement et à ce titre intervient sur les ouvrages de protection contre les inondations. (...)

L'article R562-14VI du Code de l'environnement précise que l'exonération de responsabilité du gestionnaire d'une digue a raison des dommages qu'elle n'a pu prévenir est subordonnée à l'inclusion de celle-ci dans un système d'endiguement autorisé.

Par ailleurs, l'article 59-IV de la loi MAPTAM précise que lorsque l'Etat assurait la gestion de ses ouvrages à la date du 28 janvier 2014, il est tenu de poursuivre cette gestion pour le compte de l'autorité compétente pour la prévention des inondations pendant une période transitoire prenant fin au 28 janvier 2024. »

1.3 Identification du rédacteur de l'Etude de Dangers

L'organisme rédacteur de l'étude de dangers est le bureau d'études SUEZ Consulting (SAFEGE).



SUEZ Consulting (SAFEGE)

SAVOIE Technolac

48 avenue du Lac du Bourget BP 30318

73377 LE BOURGET DU LAC

SUEZ Consulting (SAFEGE) est un organisme agréé en tant qu'intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, conformément à l'arrêté du 13 juillet 2021. Cet agrément est en vigueur jusqu'au 31 juillet 2029.

SUEZ Consulting est accompagné par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) dans l'élaboration de cette étude de dangers.



Compagnie Nationale du Rhône

2 Rue André Bonin
69004 LYON

1.4 Date de remise de l'étude de dangers

La présente étude de dangers est jointe à un dossier d'autorisation environnementale (DAE pour les travaux sur les digues du Borne). Le DAE a été déposé en décembre 2022.

La présente étude de dangers a fait l'objet d'une phase amont (relecture et remarques) par les services de la DREAL.

Il est à noter qu'en 2019, la CNR a réalisé une étude de dangers sur le présent système d'endiguement en état travaux. Cette étude de dangers repose sur un avant-projet CNR dit « structurel » de confortement des digues du Borne. L'AVP CNR en question n'a pas été retenu par le SM3A par la suite et l'étude de dangers réalisée par CNR n'a pas fait l'objet d'une instruction officielle pour classement. Néanmoins, cette étude de dangers est toujours valide pour l'état actuel des ouvrages.

1.5 Aménagements hydrauliques (article R562-18)

Sans objet.

Il n'y a pas d'aménagement hydraulique (au sens de l'article R.562-18 du code de l'environnement) qui participe à la protection de la zone inondable.

Sur le linéaire, seuls des ouvrages annexes type : seuils transversaux, ponts, buses, vannes et clapets sont identifiés.

1.6 Classement des ouvrages

Conformément à l'article R.214-113 du décret n°2015-526 du 12 mai 2015 (relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques), les classes des systèmes d'endiguement sont déterminées suivants le tableau ci-dessous :

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

La population protégée par le système d'endiguement de « St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne » est comprise entre 30 et 3000 personnes. **Le système d'endiguement sera donc de classe C au sens de l'article R214-113.**

2. OBJET DE L'ETUDE

2.1 Descriptif du cadre de la demande

2.1.1 Contexte dans lequel s'inscrit la demande

Dans le cadre du Programme d'Action de Prévention des Inondations (PAPI) du territoire du SAGE de l'Arve, le Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents (SM3A) souhaite engager des travaux de confortement et reconstruction des digues du Borne et de l'Arve, pour un niveau de protection centennal.

La présente étude de dangers porte sur le système d'endiguement « ARVE-RG-STPIE-24.17 – SAINT-PIERRE ENTRE ARVE ET BORNE » constitué par les digues suivantes :
Les digues en rive gauche du Borne, entre le pont de la RD1203 et la confluence avec l'Arve, après travaux de confortement et de reconstruction.
Il est donc considéré l'état conforté sur le Borne suivant les préconisations de l'avant-projet décrit dans ce rapport.

2.1.2 Descriptif du cadre

Le descriptif du cadre de la demande est précisé sur le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Descriptif du cadre de la demande (arrêté du 30 septembre 2019)

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

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

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

Article 3 -

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

2.2 Liste des communes concernées par la zone protégée

La zone protégée par le système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne" est située sur **les communes de Bonneville et de Saint-Pierre-en-Faucigny en Haute-Savoie.**

2.3 Localisation des limites de la zone protégée

D'après la circulaire du 8 juillet 2008, une zone protégée par un système d'endiguement est une zone non inondée par la crue pour laquelle le système a été dimensionné.

Le contour de la zone protégée a été déterminé à partir d'une modélisation hydraulique sans la présence des digues.

Le niveau de protection assuré par le système d'endiguement (Borne RG) une fois les travaux achevés est la crue centennale.

Une analyse topographique à partir du Lidar le plus récent (ombrage lidar + courbes de niveaux) a permis d'ajuster à la marge le contour brut issu de la modélisation hydraulique permettant d'intégrer d'éventuels phénomènes locaux de divagation des écoulements non appréhendés par la modélisation en particulier dans les secteurs urbanisés (mouvements de mobiliers urbains, obstacles aux écoulements, présence de véhicules...).

La cartographie de la zone protégée par le système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne" en situation de travaux achevés est donnée par la Figure ci-après. La zone protégée est située sur les communes de Bonneville et de Saint-Pierre en Faucigny.

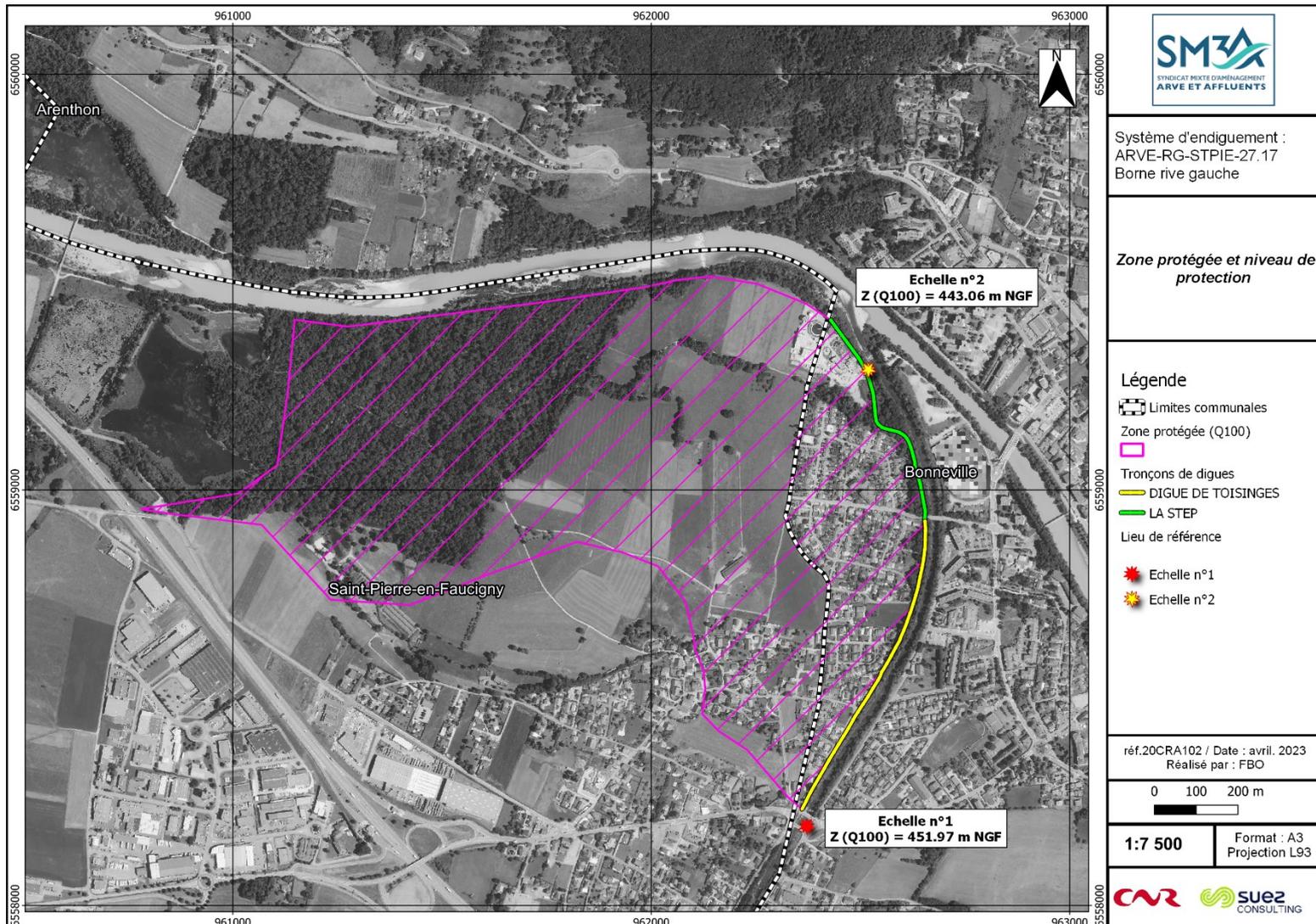


Figure 16 : Localisation de la zone protégée

2.4 Localisation en plan et description sommaire des ouvrages concernés

2.4.1 Localisation générale

Le système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne" fait partie d'un ensemble plus vaste de trois systèmes qui s'étendent majoritairement sur la commune de Bonneville. Ces systèmes permettent la protection des populations contre les inondations de l'Arve et du Borne.

La cartographie de la Figure 17 présente ces trois systèmes sur une vue générale. Les digues RG et RD du Borne sont représentées en état projeté.

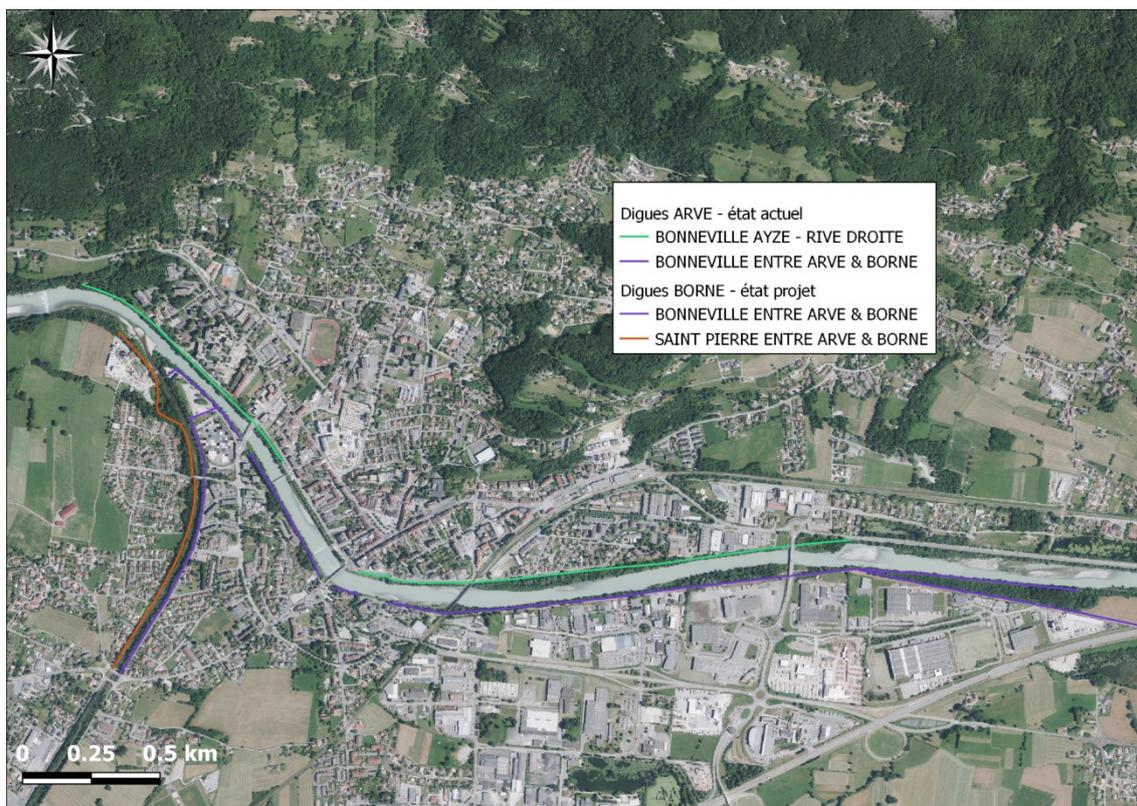


Figure 17 : Localisation des systèmes d'endiguement de l'Arve et du Borne sur la commune de Bonneville

D'un point de vue local, la cartographie de la Figure 16 présente les deux digues constitutives du système d'endiguement « St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne » sur un fond de plan BD-ORTHO®.

2.4.2 Description sommaire des ouvrages

2.4.2.1 Découpage en tronçons

Le système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne" est localisé en rive gauche du Borne, du pont de la RD1203 jusqu'à la confluence avec l'Arve. Il est découpé en deux tronçons par le pont de Toisinges :

DIGUE	IDENTIFIANT_SIRS	COURS_EAU	RIVE	GESTIONNAIRE	LONGUEUR (m)	PK amont	PK aval
DIGUE DE TOISINGES	BORNE-RG-BONNE-0.61	BORNE	GAUCHE	SM3A	768	0.61	1.39
STEP	BORNE-RG-BONNE-0.05	BORNE	GAUCHE	SM3A	536	0.00	0.59

Tableau 6 : Délimitation des digues constituant le système d'endiguement

2.4.2.2 Diagnostic des digues actuelles (avant travaux)

Un diagnostic de stabilité complet a été réalisé en 2018/2019 par CNR sur les digues du linéaire d'étude (digues rive gauche et rive droite du Borne).

Le tableau suivant reprend, à la maille des tronçons globaux, les conclusions apportées par le diagnostic. Il présente 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.

Tableau 7 : Synthèse des conclusions du diagnostic mené sur les digues du Borne – CNR 2018, actualisé en 2020

Rive	Tronçon	Charge	Surverse	Erosion interne	Erosion externe Affouillement	Glissement	Risque
Droite	Bois Jolivet B	Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui	Talus rivière instable	4
	Queue du Borne	Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui	Talus rivière instable	4
Gauche	Toisinges	< Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui	Talus rivière instable	5
	STEP	< Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui partie amont au PM145	Talus rivière et terre instables	5

De façon générale, l'ensemble des endiguements du secteur présente :

- un risque de rupture par surverse nul à la crue de projet considérée,
- un risque de rupture par brèche important, lié aux phénomènes d'érosion interne, d'érosion externe, et de glissement.

En conséquence, l'ensemble des digues du secteur est à conforter sur l'ensemble du linéaire. Pour rappel, la présente EDD concerne les digues en rive gauche du Borne (Toisinges et STEP).

2.4.2.3 Les digues du Borne après travaux

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 associée a conduit à définir 7 tronçons homogènes en rive droite et 9 tronçons homogènes en rive gauche.

Les typologies d'interventions sur les digues sont les suivantes :

- **Confortement interne** : il s'agit de créer un voile imperméable à l'intérieur de la digue, afin d'assurer une coupure hydraulique supprimant tout risque d'érosion interne de l'ouvrage (lié à la végétation, aux caractéristiques du remblais en place, etc.). Si la digue dans laquelle le voile est disposé n'est pas stable (glissement ou érosion externe), le voile est rendu auto-stable ; il constitue alors à lui seul l'ouvrage de protection contre les inondations.
- **Confortement par l'aval** : il s'agit de créer un ouvrage au droit du talus aval de la digue actuelle, qui joue le rôle de digue. Le type d'ouvrage retenu (mur, remblais) dépend notamment de l'emprise disponible. Le nouvel ouvrage doit être stable en cas de glissement ou érosion de l'ancienne digue.
- **Création complète d'une nouvelle digue en retrait de la végétation existante** : lorsque les emprises le permettent, l'élargissement de l'espace alluvial peut être opéré en maintenant les franges de végétation actuelles puis en recréant une nouvelle digue complète auto-stable et étanche en retrait.

La vue en plan des travaux envisagées (avec indication des tronçons homogènes) est donnée par la figure ci-après :

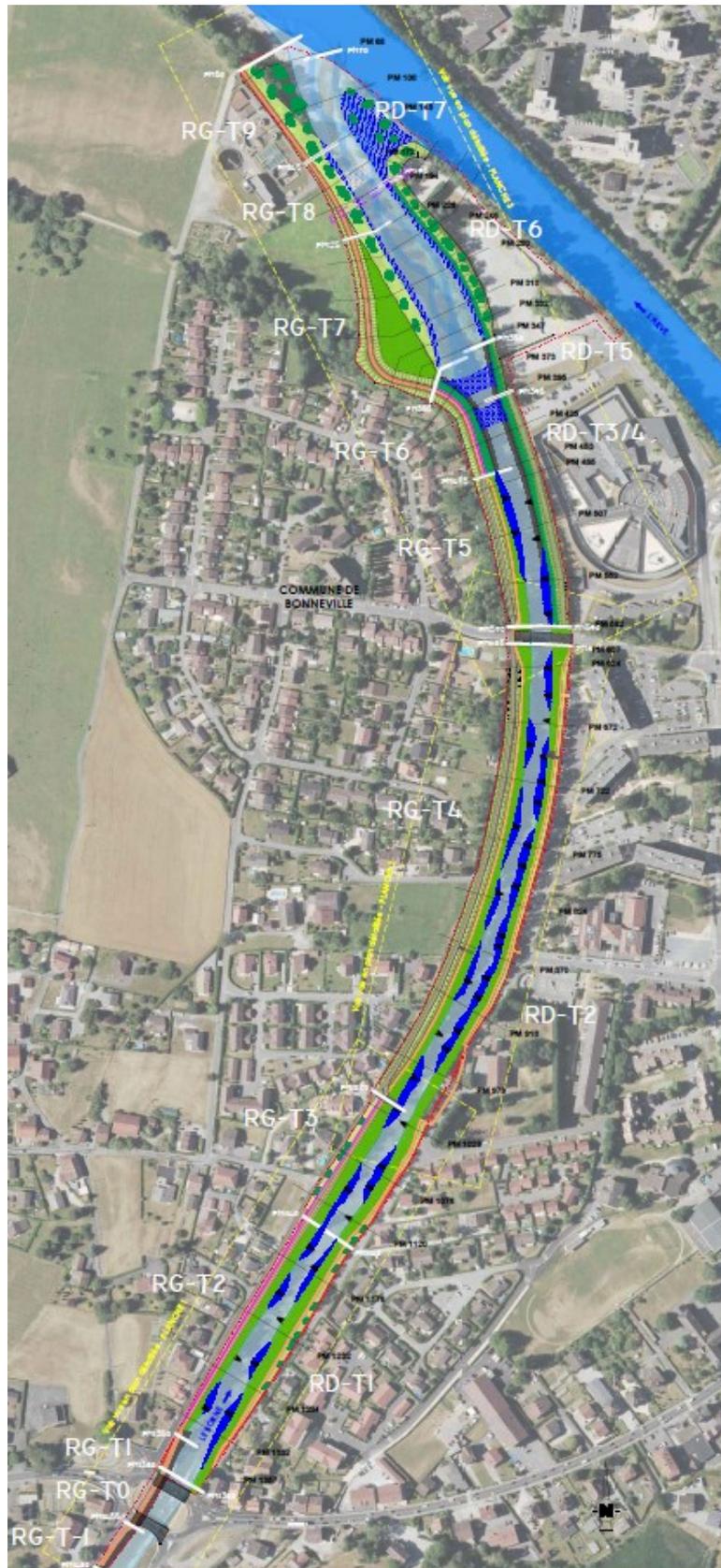


Figure 18 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne (avec indication des tronçons homogènes)

La répartition des typologies d'interventions par tronçons est présentée sur le tableau suivant (digues rive gauche).

Tableau 8 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.

Digue	Tronçon homogène	PM Amont	PM Aval	Type d'intervention
Rive gauche				
-	(RG-T-1)	1480	1440	(Passage piste cyclable) – HORS SYSTEME D'ENDIGUEMENT
	(RG-T0)	1440	1380	
	(RG-T1)	1380	1350	
Toisinges	RG-T2	1350	1140	Confortement interne (palplanches)
	RG-T3	1140	1020	
	RG-T4	1020	605	Confortement par l'aval (épaulement)
Step	RG-T5	590	455	Reprise intégrale de la digue
	RG-T6	455	355	
	RG-T7	355	225	Reprise intégrale de la digue (avec recul)
	RG-T8	225	145	Reprise intégrale de la digue
	RG-T9	145	50	

Le calage des crêtes de digues (niveau de protection apparent) est fixé à $Z_{Q100} + 1$ m de revanche.

3. DESCRIPTION PRECISE DE LA ZONE PROTEGEE, DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT, DE SON ENVIRONNEMENT ET DE SES FONCTIONS DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

3.1 Zone protégée en situation de travaux achevés

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

3.1.1 Limites administratives du territoire relevant du SM3A et de la zone protégée

3.1.1.1 Cartographie

L'ensemble du système d'endiguement étudié se situe dans les limites administratives des communes de Bonneville et Saint Pierre en Faucigny. La cartographie suivante présente : les limites administratives des différentes communes, les limites de la zone protégée, la localisation des tronçons constitutifs de l'endiguement.

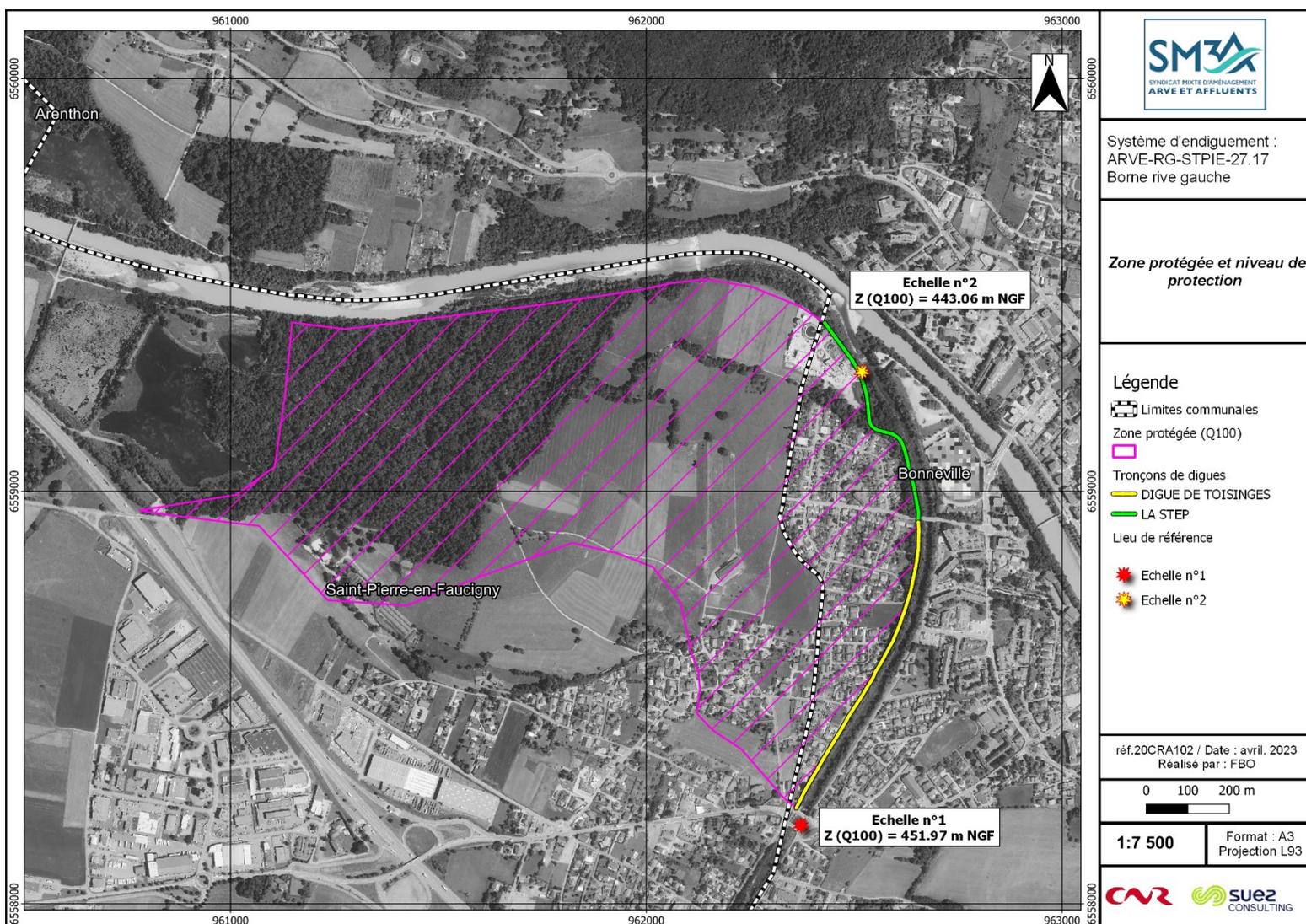


Figure 19 : Localisation de la zone protégée et des tronçons du système d'endiguement

3.1.1.2 Liste des collectivités relevant du SM3A pour la prévention des inondations

Le syndicat mixte est composé de collectivités, EPCI à fiscalité propre et syndicats du périmètre de l'EPTB pour l'exercice des champs de compétence GEMAPI qu'elles/ils lui transfèrent :

- Communauté de communes de la Vallée de Chamonix Mont-Blanc (CCVCMB), incluant le bassin versant de l'Eau Noire (vallorcine) ;
- Communauté de communes du Pays du Mont-Blanc (CCPMB) ;
- Communauté de communes Cluses Arve et Montagne (2CCAM) ;
- Syndicat Intercommunal du Haut-Giffre (représentant la Communauté de communes des Montages du Giffre CCMG) ;
- Communauté de Communes du Haut Chablais (CCHC) (communes des Gets, de Bellevaux et de la Côte d'Arbroz) ;
- Syndicat des Eaux des Rocailles et de Bellecombe (SRB) ;
- Communauté de communes Faucigny Glières (CCFG), à l'exception de Contamine sur Arve ;

- Communauté de communes du Pays Rochois (CCPR) ;
- Communauté de communes des 4 Rivières (CC4R) ;
- Communauté de communes de la Vallée Verte (CCVV) ;
- Annemasse les Voirons Agglomération ;
- Thonon Agglomération (communes de Bons en Chablais (Foron du Chablais genevois), Veigy Foncenex (Le Chambet) et Draillant (zone des Moises)) ;
- Communauté de Communes de la vallée de Thônes (Communes du Grand Bornand, Saint-Jean de Sixt et Entremont).

3.1.1.3 Liste récapitulative des communes intégrées en tout ou partie dans la zone protégée

La zone protégée se situe sur les deux communes suivantes : Saint-Pierre en Faucigny et Bonneville.

A noter que l'ensemble du système d'endiguement se situe dans les limites administratives de la commune de Bonneville.

3.1.1.4 Liste récapitulative des autres communes qui relèvent de l'autorité compétente pour la prévention des inondations, le SM3A

L'Arve s'écoule presque entièrement en Haute-Savoie, à l'exception des derniers kilomètres dans le canton de Genève en Suisse. En France, l'Arve parcourt les communes de Chamonix-Mont-Blanc, Les Houches, Servoz, Passy, Sallanches, Magland, Cluses, Scionzier, Thyez, Marnaz, Vougy, Marignier, Ayze, Bonneville, Arenthon, Faucigny, Scientrier, Reignier, Contamine-sur-Arve, Nangy, Arthaz-Pont-Notre-Dame, Monnetier-Mornex, Vétraz-Monthoux, Étrembières, Annemasse et Gaillard.

A ses communes s'ajoutent l'ensemble de celles composant le bassin versant de l'Arve, soit un total de 94 communes qui relèvent de l'autorité compétente pour la prévention des inondations (Le SM3A).

La liste récapitulative des communes qui relèvent de l'autorité compétente pour la prévention des inondations du SM3A est présenté ci-dessous.

<p>CCVCMB</p> <p>1 Vallorcine 2 Chamonix 3 Les Houches 4 Servoz</p>	<p>SRB</p> <p>38 Contamine sur Arve 39 Arbusigny 40 Arthaz 41 La Muraz 42 Monnetier-Mornex 43 Nangy 44 Pers-Jussy 45 Reignier-Esery 46 Scientrier</p>	<p>CC Vallée Verte</p> <p>78 Boège 79 Bogève 80 Burdignin 81 Habère-Lullin 82 Habère-Poche 83 Saint André 84 Saxel 85 Villards</p>
<p>CCPMB</p> <p>5 Passy 6 Saint-Gervais 7 Contamines-Montjoie 8 Sallanches 9 Domancy 10 Cordon 11 Demi-Quartier 12 Combloux</p>	<p>CC4R</p> <p>47 Saint-Jeoire 48 Onnion 49 La Tour 50 Peillonex 51 Mégevette 52 Viuz en Sallaz 53 Fillinges 54 Ville en Sallaz 55 Marcellaz 56 Faucigny 57 Saint-Jean de Tholomé</p>	<p>CC Haut Chablais</p> <p>86 Les Gets 87 La Côte d'Arboz 88 Belleveaux</p>
<p>2CCAM</p> <p>13 Magland 14 Cluses 15 Scionzier 16 Marnaz 17 Saint-Sigismond 18 Arâches 19 Nancy sur Cluses 20 Le Reposoir 21 Mont-Saxonnex 22 Thyez</p>	<p>SIVM du Haut-Giffre</p> <p>58 Châtillon sur Cluses 59 La Rivière Enverse 60 Mieussy 61 Morillon 62 Samoëns 63 Sixt Fer à Cheval 64 Taninges 65 Verchaix</p>	<p>CC des vallées de Thônes</p> <p>89 Entremont 90 Le Grand Bornand 91 Saint Jean de Sixt</p>
<p>CCFG</p> <p>23 Marignier 24 Ayze 25 Bonneville 26 Vougy 27 Brison 28 Petit-Bornand</p>	<p>Annemasse Agglo</p> <p>66 Ambilly 67 Bonne 68 Annemasse 69 Cranves Sales 70 Gaillard 71 Etrembières 72 Juvigny 73 Lucinges 74 Machilly 75 Saint-Cergues 76 Vétraz-Monthoux 77 Ville-la-Grand</p>	<p>Thonon Agglo</p> <p>92 Draillant 93 Bons-en-Chablais 94 Veigy Foncenex</p>
<p>CCPR</p> <p>29 Arenthon 30 Cornier 31 Saint-Pierre en Faucigny 32 Saint Laurent 33 Saint-Sixt 34 La Roche sur Foron 35 Eteaux 36 Amancy 37 La Chapelle Rambaud</p>		

Figure 20 : Communes territoire intervention SM3A

3.1.2 Enjeux présents sur la zone

L'étude complète d'analyse des enjeux réalisée par SEPIA est présente en annexe 1 de ce rapport.

3.1.2.1 Présentation des enjeux situés dans le périmètre d'étude

Le périmètre d'étude, situé à cheval sur les communes de Bonneville et Saint-Pierre-en-Faucigny, est constitué de trois secteurs distincts :

- le quartier de la route des Gorges du Borne, entre le Haut-Rumilly et la voie ferrée,
- les quartiers d'habitation Tucinge et Toisinges à proximité de la confluence du Borne dans l'Arve,
- une vaste zone naturelle en rive gauche de l'Arve entre la confluence et l'autoroute A40.

3.1.2.1.1 Habitations

L'habitat constitue le principal enjeu de la zone protégée (près de 290 habitations au total). Ces habitations sont principalement concentrées autour de la route des Gorges du Borne et du Clos du Val de Borne à l'amont et dans les quartiers Toisinges et Tucinge à l'aval.

L'habitat de ce secteur est majoritairement individuel, dont 70% dans des bâtiments de plain-pied.

3.1.2.1.2 Etablissements recevant du public (ERP)

Un unique ERP est situé dans la zone protégée ; il s'agit de la microcrèche Babilou. Cet enjeu est particulièrement sensible au vu du public accueilli (enfants en bas âge), ce qui doit être pris en compte en cas de nécessité d'évacuation.

3.1.2.1.3 Etablissements publics

Le siège du SM3A, acteur incontournable de la gestion de crise à l'échelle de la vallée de l'Arve, est situé dans la zone protégée. Le bâtiment est également exposé pour les scénarios de brèches considérés dans le cadre de cette EDD.

Par ailleurs, la station d'épuration de Bonneville, ayant fait l'objet d'une extension sur le territoire de Saint-Pierre-en-Faucigny en 2020 (capacité doublée pour atteindre 54'000 équivalents habitants), est également située dans la zone protégée, à proximité de la confluence Borne-Arve. En cas de mise en défaut de l'installation, le traitement des eaux usées des communes d'Ayze, Bonneville, Mont-Saxonnex et Vougy pourraient ne plus être traitées, ou ne l'être que partiellement.

3.1.2.1.4 Activités économiques et industrielles

Les activités économiques sont globalement peu nombreuses dans la zone protégée. Les activités sont principalement tertiaires, avec généralement 1 ou 2 emplois (services à la personne, petits travaux...). Un siège d'exploitation agricole est également situé rue du Grand Pré.

3.1.2.2 Estimation des populations exposées

3.1.2.2.1 Méthodologie - Populations prises en compte

Le décret du 12 mai 2015 définit la population protégée comme « la population maximale exprimée en nombre d'habitants qui résident et travaillent dans la zone protégée, en incluant notamment les populations saisonnières ».

Le décret n°2019-895 du 28 août 2019, modifiant l'Article R214-113 du Code de l'Environnement, définit la population protégée comme « la population maximale, exprimée en nombre de personnes, qui est susceptible d'être exposée dans la zone protégée. »

Nous avons donc estimé :

- le nombre total de personnes habitant ou travaillant dans la zone protégée,
- la capacité d'accueil des établissements recevant du public ayant une activité d'hébergement (établissements hospitaliers, maisons de retraites, foyers, centres de détention, hôtels et campings...)
- le nombre de personne potentiellement présente dans leur véhicule sur les axes de voirie structurants (voies non communales) au moment de la survenue d'une inondation.

3.1.2.2.1.1 Personnes résidant dans la zone protégée

L'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques fournit un ensemble de données statistiques relatives à la composition et la répartition de la population du territoire français. Ces données peuvent notamment être récupérées sous la forme d'une couche SIG présentant un carroyage de 200 mètres de côté et fournissant des informations sur les populations résidant à l'intérieur de chaque carreau.

Nous avons évalué le nombre d'habitants résidant en zone inondable selon la méthodologie de référence du guide méthodologique relatif aux Analyses Multicritères des programmes de travaux de protection contre les inondations. Cette méthodologie se base sur un croisement entre le carroyage INSEE 200 mètres (population 2016) et les contours des bâtiments de la zone protégée.

Pour les bâtiments d'habitations ayant manifestement été construits postérieurement à la publication de cette base de données, nous avons complété cette estimation sur la base des ratios surfacique d'occupation des bâtiments voisins.

3.1.2.2.1.2 Personnes travaillant dans la zone protégée

Nous avons estimé le nombre d'emplois à l'intérieur de la zone protégée ou des zones inondables à partir de la base de données SIRENE 2022. Toutefois, cette base de données de référence présente parfois des défauts de complétude, notamment concernant le nombre d'emplois associé à chaque établissement.

Lorsqu'aucune information n'était disponible dans la base SIRENE 2022 concernant le nombre d'employés, nous avons donc mobilisé les données des millésimes plus anciens (2017-2020), ou avons à défaut pris l'hypothèse d'un employé minimum par entreprise.

3.1.2.2.1.3 Personnes circulant sur les axes structurants

Le périmètre concerné par la présente note ne comprend pas de route non communale structurante. De plus, on considère que les usagers des routes communales du périmètre d'étude y résident ou y travaillent (ils sont donc inclus dans les totaux présentés dans les 2 paragraphes précédents).

3.1.2.2.2 Estimation du nombre total de personnes dans la zone protégée

Le Tableau 9 présente l'estimation du nombre de personnes résidant ou travaillant dans la zone protégée :

Tableau 9 : Population exposée dans l'ensemble de la zone protégée « Saint-Pierre-en-Faucigny entre Borne et Arve »

Nombre de bâtiments d'habitations	HABITANTS		EMPLOIS		ERP		TOTAL
	Nombre total d'habitants	dont habitants dans des logements de plain-pied	Nombre d'établissements	Nombre d'emplois	Nombre d'ERP	Nombre d'enfants	
291	607	292	40	80	1	10	697

3.1.2.2.3 Estimation du nombre de personnes exposées dans différents scénarios d'inondation

Le tableau ci-dessous présente l'estimation des personnes résidant ou travaillant dans les zones exposées aux inondations selon les différents scénarios d'inondation considérés :

Tableau 10 : Population exposée selon les scénarios d'inondation considérés

Scénario de brèche considéré	HABITATIONS			EMPLOIS		ERP		TOTAL
	Nombre de bâtiments d'habitations	Nombre total d'habitants	dont habitants dans des logements de plain-pied	Nombre d'établissements	Nombre d'emplois	Nombre d'ERP	Nombre d'enfants	
Borne Rive Gauche amont	178	391	229	18	55	1	10	456
Borne Rive Gauche aval	68	161	74	5	42	1	10	213

La Figure 21 présente la cartographie de l'ensemble des enjeux.

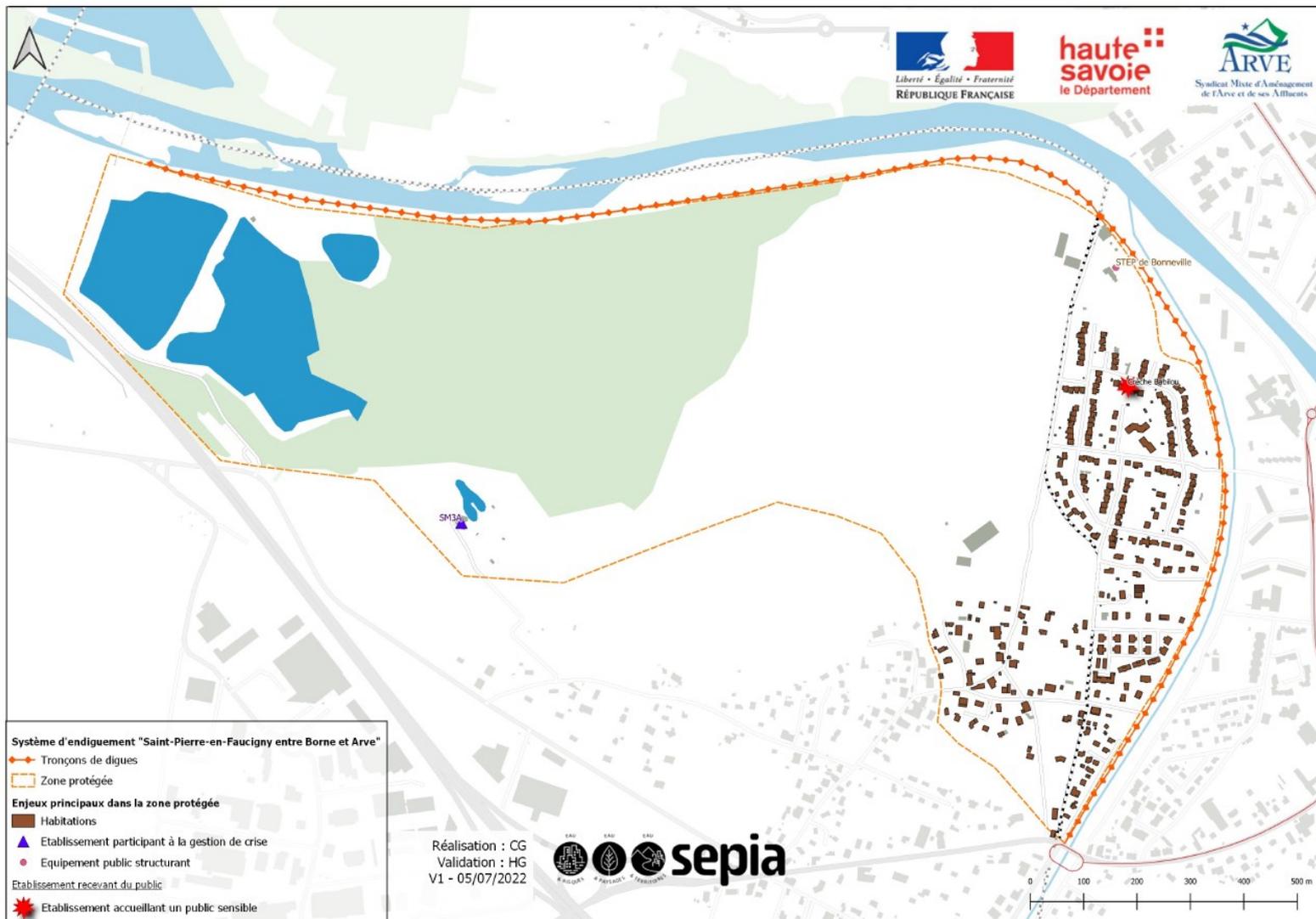


Figure 21 : Cartographie des enjeux exposés

Le nombre de personnes protégées (697) étant supérieur à 30 et inférieure à 3000, le système d'endiguement est donc de classe C au sens de l'article R.214-113 du décret sur la sécurité des ouvrages hydrauliques n°2015-526 du 12 mai 2015.

3.2 Description des conditions naturelles pouvant conduire à des crues

Les conditions induisant une sollicitation des endiguements sont décrites ci-dessous. Ces conditions sont majoritairement liées aux crues. Les données géologique et le risque sismique est aussi abordé dans ce paragraphe. Une critique des références scientifiques sur la partie hydrologique est aussi apportée.

3.2.1 Facteurs naturels déterminants les risques d'inondation

Les facteurs naturels déterminant les risques d'inondation sont les crues de l'Arve et du Borne. Les principales crues ont lieu essentiellement en période de fonte des neiges, elles peuvent également intervenir à l'automne lors d'épisodes pluvieux intenses. Les crues de l'Arve et du

Borne peuvent être concomitantes. Par ailleurs, un point de référence a été ajouté en amont de la confluence Borne/Arve.

L'hydrologie de crue a été récemment actualisée sur la base de deux études EDF, portées par le SM3A :

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

Dans le cadre des EDDs du Borne, le tableau ci-dessous précise les débits de pointe pour les différentes crues caractéristiques :

Tableau 11 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze (pour les crues du Borne de différentes périodes de retour) – source CNR

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

La figure ci-après présente les hydrogrammes de la crue Q100 du Borne, correspondant au fonctionnement nominal du système d'endiguement « St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne » :

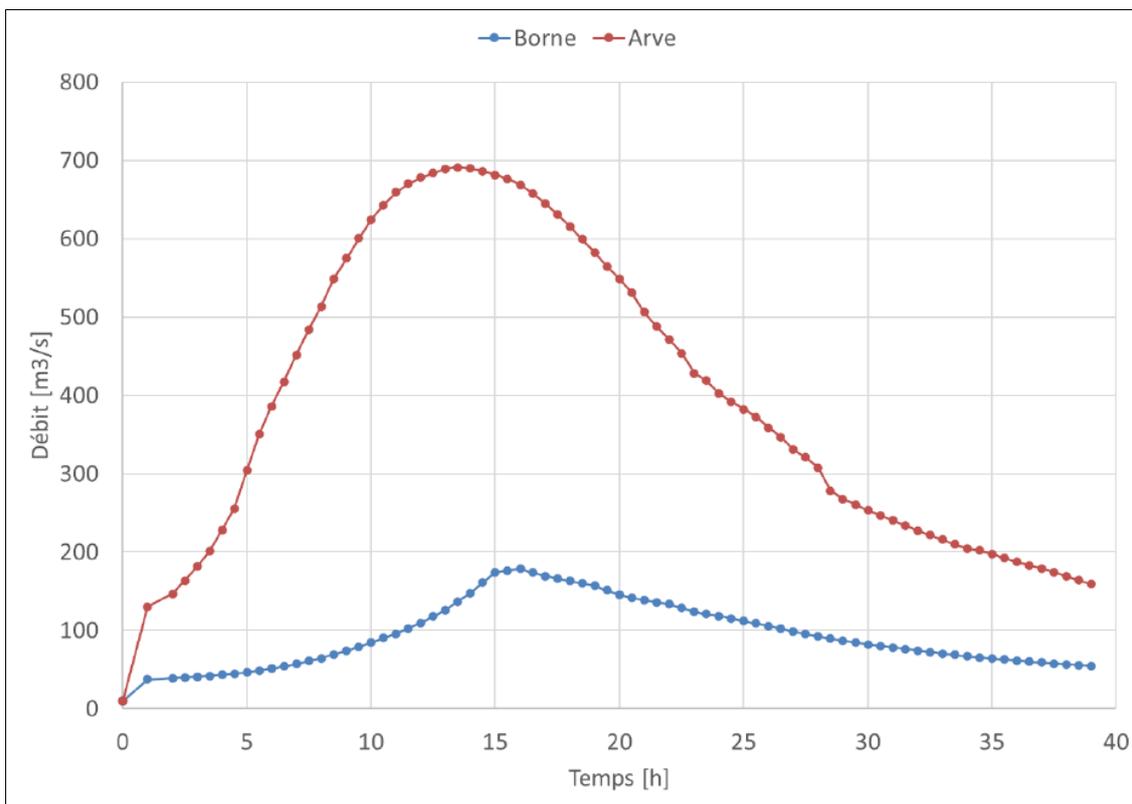


Figure 22 : Hydrogrammes de l'Arve et du Borne pour une crue centennale du Borne

Pour plus d'information, voir l'annexe 6 de la présent étude de dangers.

La cartographie des hauteurs d'eau en absence des digues rive gauche du Borne (dans le cas Q100 Borne et Q30 Arve) qui a servi à la définition des limites de la zone protégée est donnée ci-dessous :



Figure 23 : Modélisation hydraulique (Q100 Borne et Q30 Arve) – digues du Borne rive gauche effacées

3.2.2 Références scientifiques (hydrologie)

L'étude hydrologique ayant définie les évènements caractéristiques du Borne et de l'Arve repose sur l'étude EDF de 2021. En effet, cette étude avec la méthode SCHADDEX est jugée la plus pertinente et est retenue par le SM3A.

Il est à noter que les débits de pointe retenus sont sécuritaires par rapport aux débits des différentes autres études hydrologiques menées sous maîtrise d'ouvrage du SM3A.

3.2.3 Données historiques de crue

Une étude historique a été réalisée dans le cadre du présent marché (étude Denis Cœur sur digues de la présente études). Elle a permis de recenser et décrire précisément les crues majeures ayant eu lieu sur l'endiguement. Parmi ces crues, sont retenues :

- La crue de 1968 qui a conduit à une rupture du merlon de Corbière. L'occurrence de cette crue est estimée entre Q50 et Q100 à dire d'expert ;
- La crue de mai 2015, proche d'une Q30 d'après une étude d'ISL, qui n'a pas engendré de rupture dans la traversée de Bonneville.

La cartographie suivante présente l'inondation des secteurs ces derniers siècles. On remarquera une baisse significative des inondations sur le 20ème siècle par rapport au 18ème et 19ème siècle.

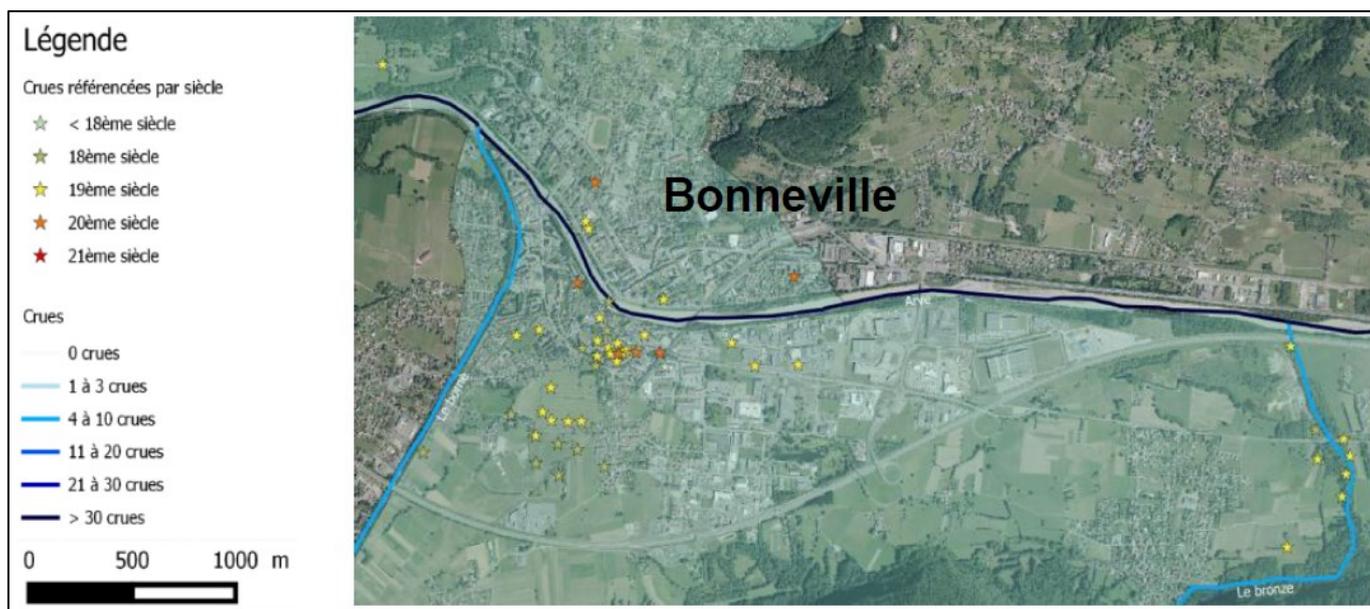


Figure 24 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude (Source : S.M.3.A.)

3.2.4 Etude géologique

L'étude géologique (CNR 2019) a permis de conclure que les schistes marno-micacés (Molasses ou Grès de Bonneville), 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.

Les reconnaissances géotechniques réalisées ont permis de confirmer cet apport de sédiment sachant que les fondations des digues sont majoritairement composées de Graves sablo-limoneuses.

3.2.5 Classe sismique

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 St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne se situent en zone 4 (sismicité moyenne).

A noter que le risque d'apparition simultanée d'une crue et d'un séisme est très peu probable.

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

Après avoir décrit la zone protégée et les phénomènes naturels sollicitant l'endiguement, ce paragraphe décrit la structure de l'endiguement en présentant notamment les profils en travers types et les profils en long.

3.3.1 Cours d'eau

Les cours d'eau en objet de cette étude sont :

- Le Borne du PK 1.4 au droit du pont de la D1203 au PK0 à la confluence avec l'Arve.
- L'Arve du PK32.6 en aval du seuil de Marignier au PK24.2 à la passerelle SM3A. L'Arve est couvert par le modèle hydraulique.

3.3.2 Localisation et identification des éléments constituant le système d'endiguement

Les deux tronçons de digues constitutifs du système d'endiguement « Saint Pierre en Faucigny entre Arve et Borne », en état actuel et en état projet, sont localisés sur les deux cartographies suivantes (**en rive gauche du Borne**). **Les digues en rive droite du Borne font l'objet d'une autre étude de dangers.**

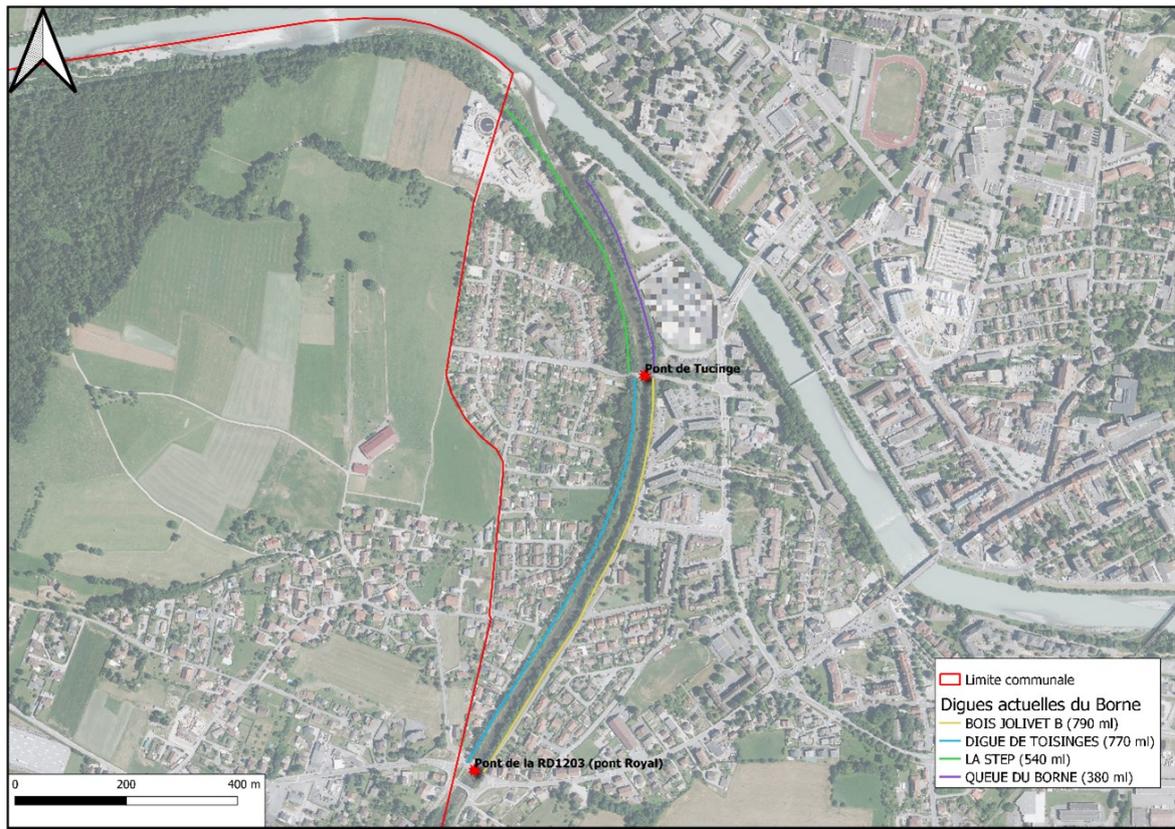


Figure 25 : Localisation précise des digues actuelles sur le Borne (digues en rive gauche pour le système étudié)

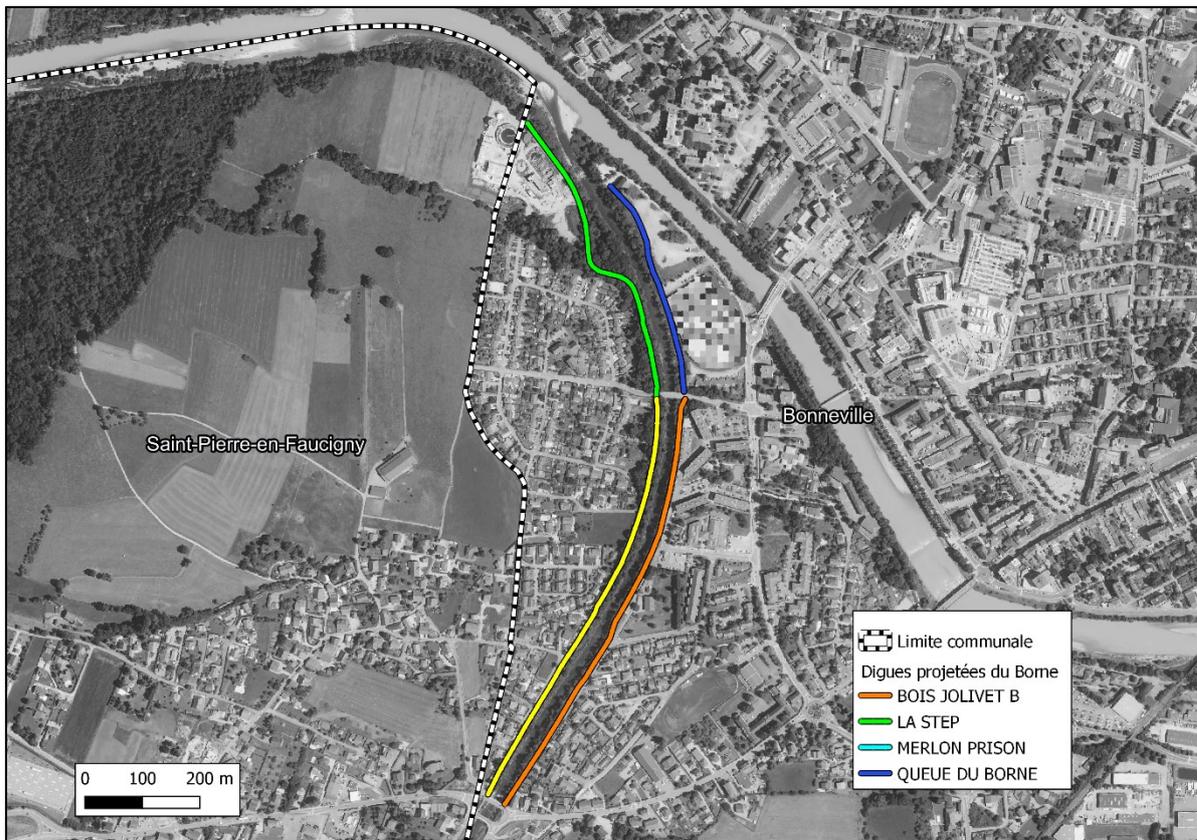


Figure 26 : Localisation précise des digues projetées (digues en rive gauche pour le système étudié)

Le plan suivant localise les ouvrages particuliers sur le secteur de l'étude.

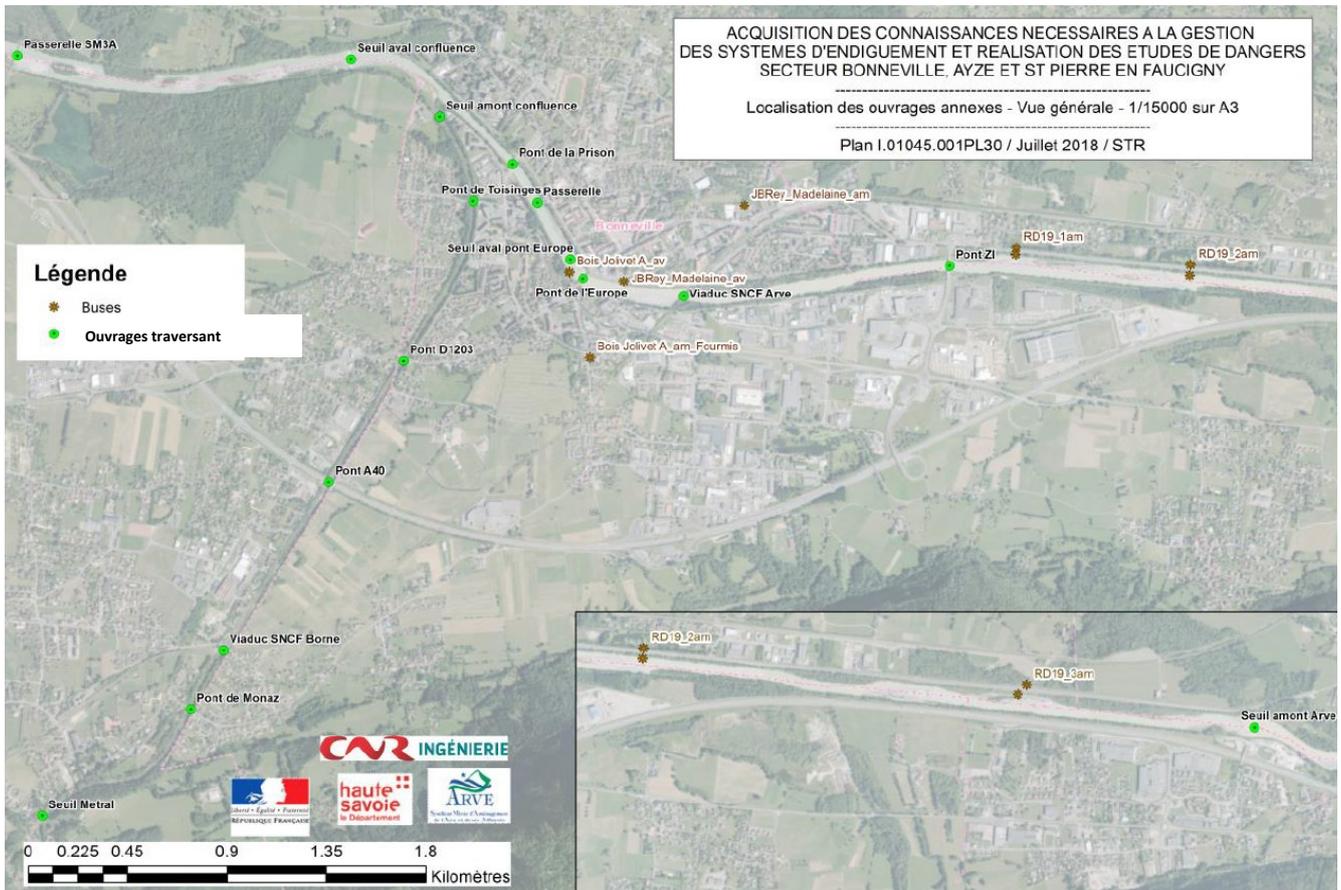


Figure 27 : Cartographie des ouvrages annexes (ponts, seuils, grandes buses)

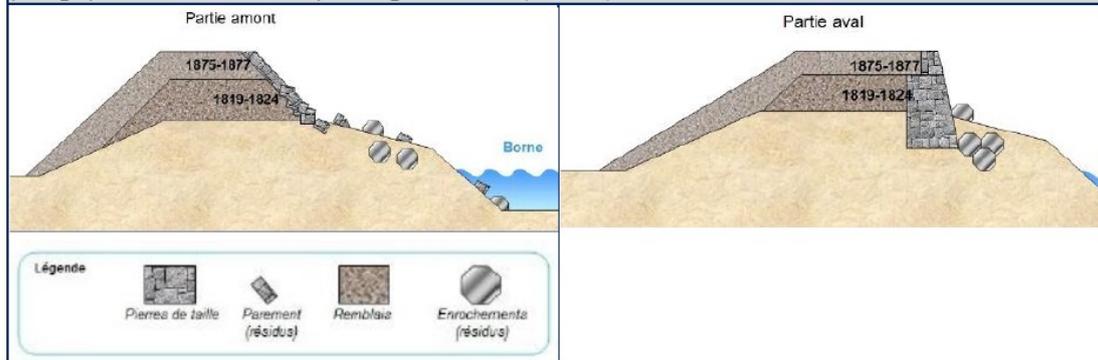
3.3.3 Géométrie et structure du système

3.3.3.1 Etat actuel

3.3.3.1.1 Profils types

Les paragraphes suivants présentent succinctement les profils types pour chaque ouvrage en état actuel. Le dernier paragraphe est une synthèse des caractéristiques générales de chaque tronçon et précise le niveau de charge pour chacun d'entre eux.

Toisings : Digue en remblai protégée par un perré ou mur en pierre de taille. Reprise successive. Pied de digue protégé par des enrochements épars. Digue ancienne (XIX^{ème}).



STEP : Digue en remblai protégée par un perré ou mur en pierre de taille. Reprise successive. Digue ancienne (XIX^{ème}). Pied de digue protégé par des enrochements épars.

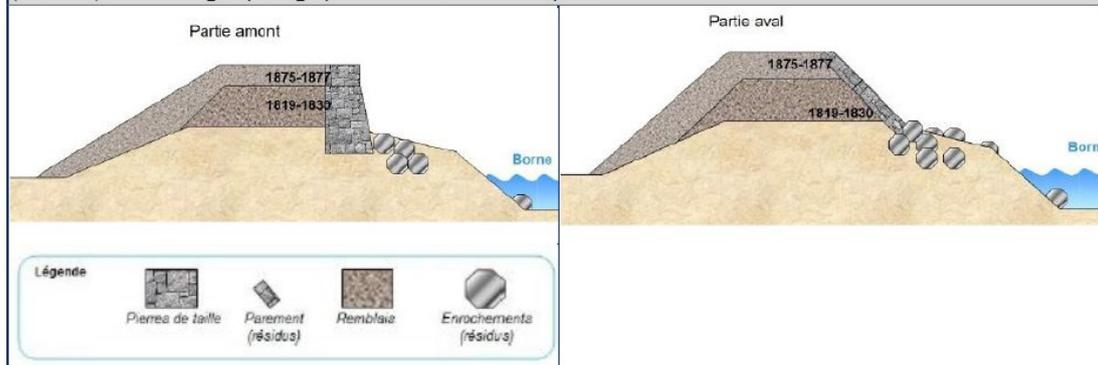


Figure 28 : Profils types historiques issus de l'étude historique Acthys Diffusion – Juillet 2017

3.3.3.1.2 Conclusion sur la géométrie externe des ouvrages existants

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques géométriques externes de chaque portion de système et la composition générale des protections.

SYSTÈME	IDENTIFIANT_SIRS	DIGUE	LONGUEUR (m)	PK amont	PK aval	Hauteur moyenne aval (m)	Charge	LARGEUR MOYENNE EN CRETE (m)	Risberme
PIERRE ENTRE BORNE RVE-RG-STPIE-2	BORNE-RG-BONNE-0.05	STEP	212	3.66	3.87	2.00	>Q1000	1.5 à 2 et 1m ponctuellement	non
	BORNE-RG-BONNE-0.61	DIGUE DE TOISINGS	86	3.56	3.66	1.00	>Q1000	1.5 à 2 et 1m ponctuellement	Partiellement

Tableau 12 : Résumé des caractéristiques géométriques externes des ouvrages existants

3.3.3.2 Etat projet

3.3.3.2.1 Sectorisation en linéaires de digues

Les travaux concernent uniquement les digues du Borne.

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 associée a conduit à définir 7 tronçons homogènes en rive droite et 9 tronçons homogènes en rive gauche.

Les typologies d'interventions sur les digues sont les suivantes :

- **Confortement interne** : il s'agit de créer un voile imperméable à l'intérieur de la digue, afin d'assurer une coupure hydraulique supprimant tout risque d'érosion interne de l'ouvrage (lié à la végétation, aux caractéristiques du remblais en place, etc.). Si la digue dans laquelle le voile est disposé n'est pas stable (glissement ou érosion externe), le voile est rendu auto-stable ; il constitue alors à lui seul l'ouvrage de protection contre les inondations.
- **Confortement par l'aval** : il s'agit de créer un ouvrage au droit du talus aval de la digue actuelle, qui joue le rôle de digue. Le type d'ouvrage retenu (mur, remblais) dépend notamment de l'emprise disponible. Le nouvel ouvrage doit être stable en cas de glissement ou érosion de l'ancienne digue.
- **Création complète d'une nouvelle digue en retrait de la végétation existante** : lorsque les emprises le permettent, l'élargissement de l'espace alluvial peut être opéré en maintenant les franges de végétation actuelles puis en recréant une nouvelle digue complète auto-stable et étanche en retrait.

La vue en plan des travaux envisagées (avec indication des tronçons homogènes) est donnée par la figure ci-après :

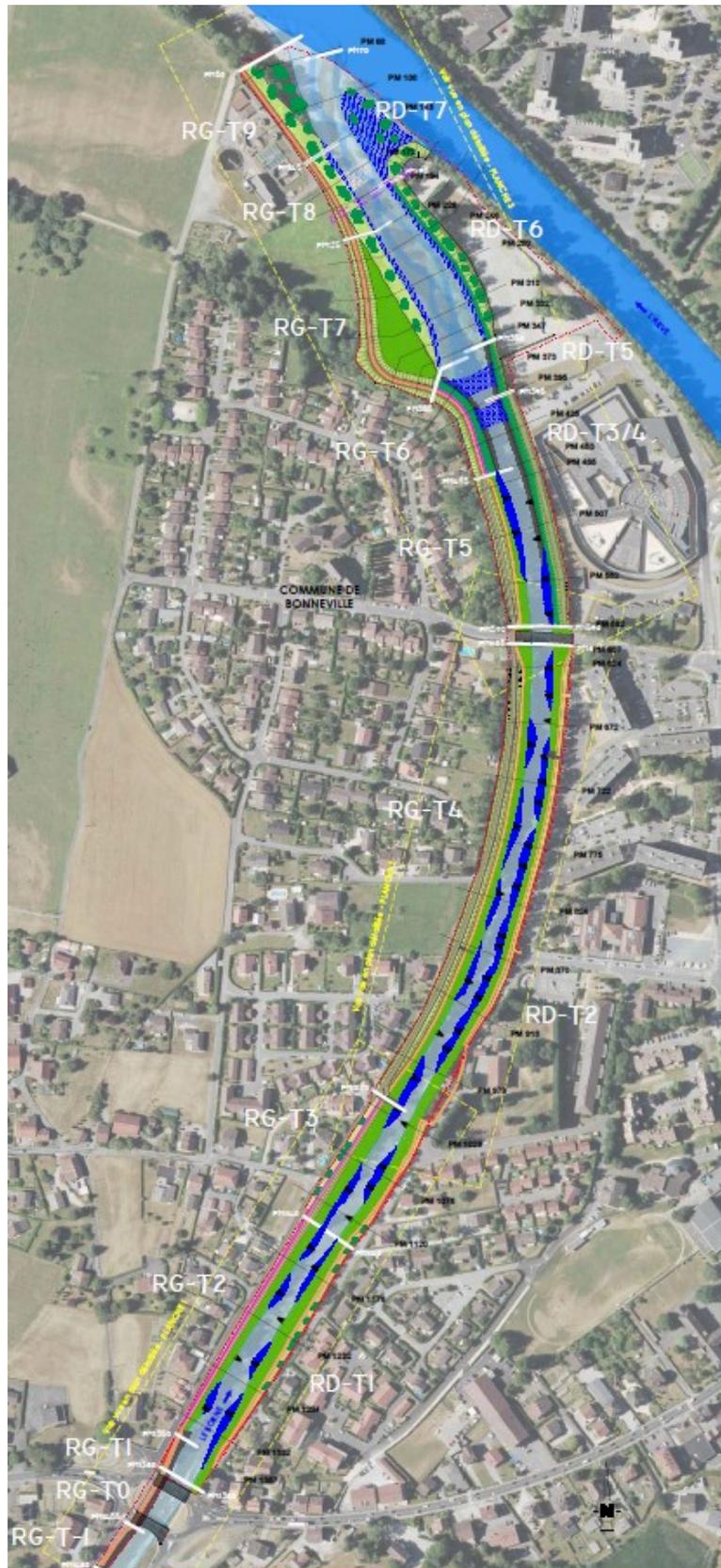


Figure 29 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne (avec indication des tronçons homogènes)

La répartition des typologies d'interventions par tronçons est présentée sur le tableau suivant (digues rive gauche).

Tableau 13 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.

Digue	Tronçon homogène	PM Amont	PM Aval	Type d'intervention
Rive gauche				
-	(RG-T-1)	1480	1440	(Passage piste cyclable) – HORS SYSTEME D'ENDIGUEMENT
	(RG-T0)	1440	1380	
	(RG-T1)	1380	1350	
Toisinges	RG-T2	1350	1140	Confortement interne (palplanches)
	RG-T3	1140	1020	
	RG-T4	1020	605	Confortement par l'aval (épaulement)
Step	RG-T5	590	455	Reprise intégrale de la digue
	RG-T6	455	355	
	RG-T7	355	225	Reprise intégrale de la digue (avec recul)
	RG-T8	225	145	Reprise intégrale de la digue
	RG-T9	145	50	

Le calage des crêtes de digues (niveau de protection apparent) est fixé à $Z_{Q100} + 1$ m de revanche.

3.3.3.2 Principe général de conception

Pour mémoire, tel que susmentionné, l'endiguement du Borne, très ancien, puis l'urbanisation du lit majeur (ancien cône de déjection) limitent très fortement toute possibilité d'élargissement de l'espace alluvial.

Une des seules emprises disponibles sur le secteur d'étude est représentée par la partie aval, avec en rive droite des possibilités d'élargissement en aval de la prison à la confluence avec l'Arve (tronçons RD-T6 et T7) et en rive gauche, en face, soit en amont immédiat de la STEP (tronçon RG-T7). Ces élargissements étendent le secteur de confluence dynamique avec l'Arve, en créant un contexte alluvial varié et évolutif dans le temps (alternance de bancs graveleux, de surfaces de végétation pionnière, de surfaces plus ou moins en eau, de granulométrie variée des fonds, etc.). La création de cet élargissement nécessite le déplacement vers l'amont du point de contrôle de la cote des fonds du lit du Borne, avec la création d'une double rampe franchissable en blocs d'enrochements et le déplacement de la canalisation des eaux usées qui lui est associée.

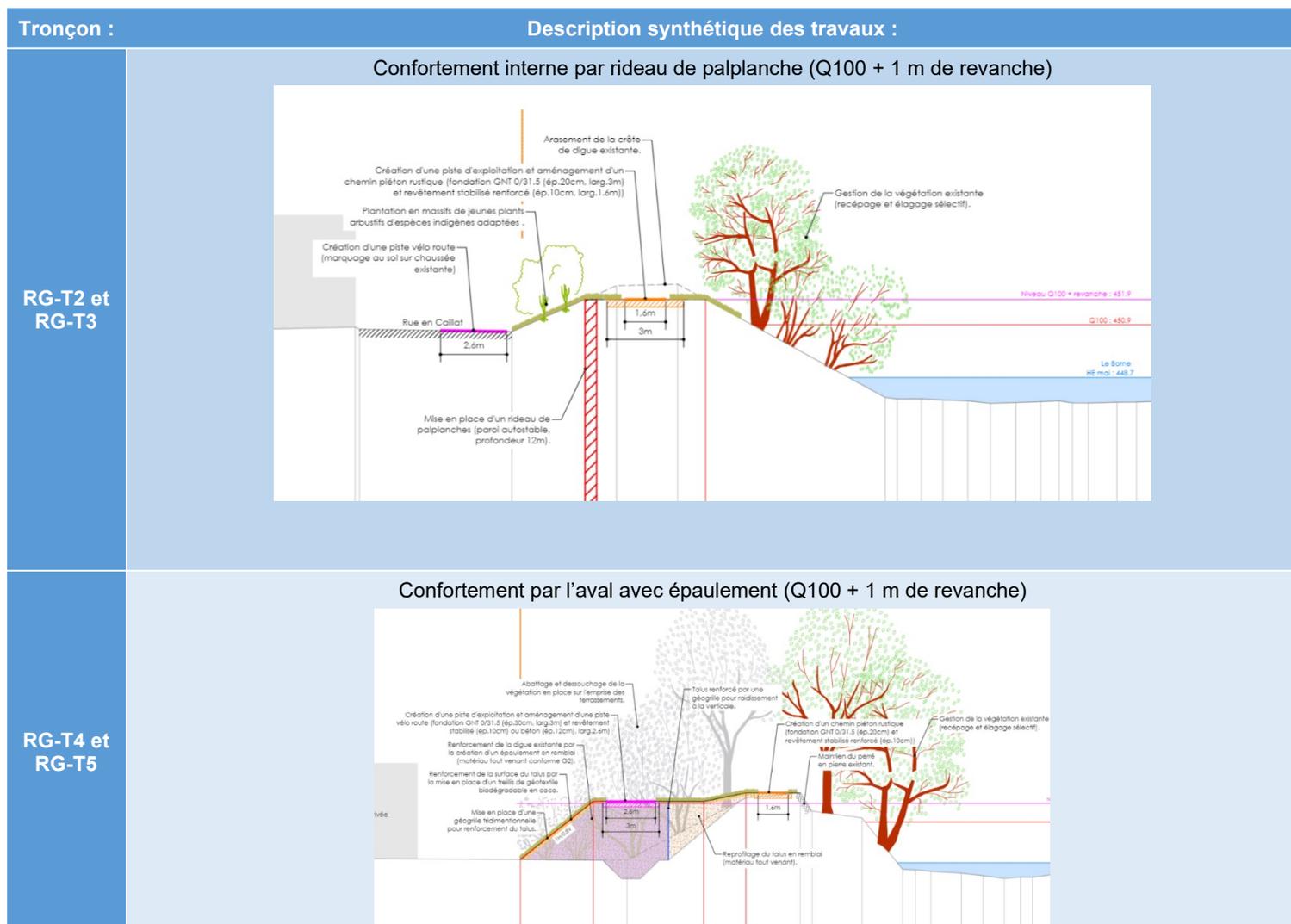
La réflexion s'est faite pour maintenir au maximum la végétation en place. Aucun secteur n'est totalement défriché dans le cadre de l'opération. Il est proposé la gestion de la végétation en place avec la suppression des espèces végétales exotiques à tendance invasive, l'abattage sélectif des sujets arborés menaçant de basculer en berge puis l'enlèvement de la végétation existante uniquement au droit des ouvrages construits (ancrages des protections de berge, ancres des épis, etc.). La lutte contre les espèces exotiques envahissantes se réalisent principalement par la coupe des tiges aériennes des renouées asiatiques et buddleias, leur mise en bigs-bags avec évacuation puis le terrassement en déblais des substrats contaminés par les racines de ces espèces puis le broyage-concassage de ces matériaux.

Afin de délester les pieds de berges d'une partie de leurs contraintes hydrauliques, une série d'épis est proposée, essentiellement en rive droite qui marque un léger extrados de courbure. Le calage de la cote supérieure des épis est établi quelques 50 cm au-dessus de la cote atteinte par les hautes eaux moyennes du mois de mai (fonte des neiges). Les épis n'ont pas pour seule fonction de participer à la stabilisation des pieds de berge mais jouent également un rôle prépondérant dans la restauration hydro-écologique du lit vif du Borne. Ils sont également le support ou le "squelette" au maintien et au développement de risbermes graveleuses au pied des berges ; élément essentiel à la fonction de corridor écologique du cours d'eau.

Lorsque des protections de berge sont néanmoins nécessaires (par exemple sur les tronçons RD-T3/T4 au droit du secteur de la prison, soit en remplacement d'anciens enrochements/remblais), des techniques mixtes sont proposées, combinant une base sous-fluviale et de pied de berge en enrochement et une partie supérieure issue du génie biologique, illustrée par la technique des lits de plants et plançons (la limite d'implantation de la végétation au-dessus des enrochements est calée quelques 20 cm au-dessus de la cote atteinte par les hautes eaux moyennes du mois de mai).

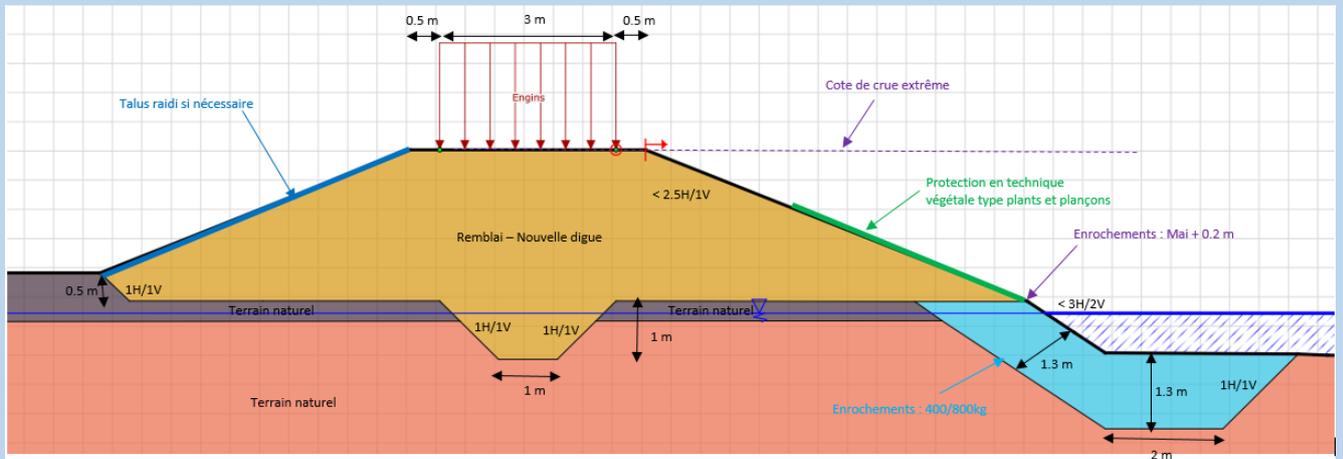
3.3.3.2.3 Description par secteur

La description détaillée secteur par secteur est en partie 5.2.2. Il s'agit ici d'une synthèse pour ne pas répéter la partie détaillée.



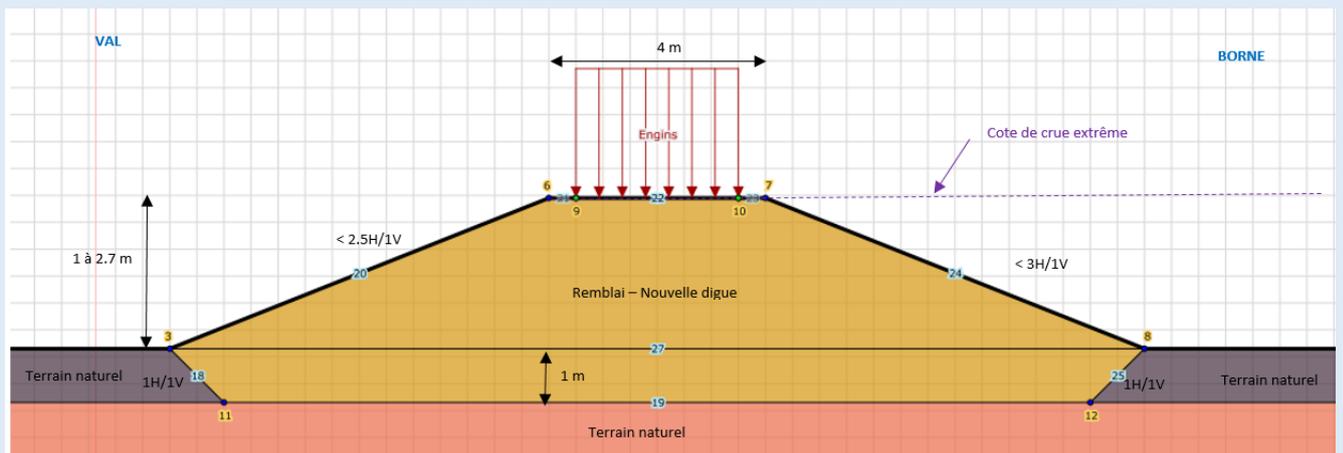
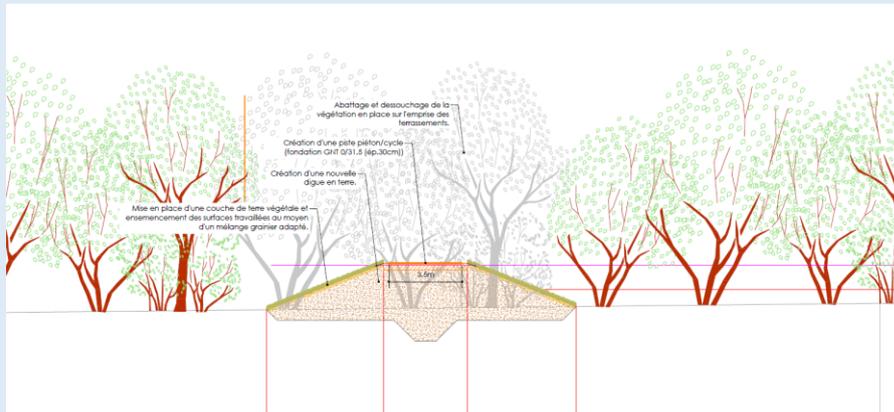
RG-T6

Reprise intégrale de digue avec talus 2.5H/1V et confortement en technique mixte (Q100 + 1 m de revanche)



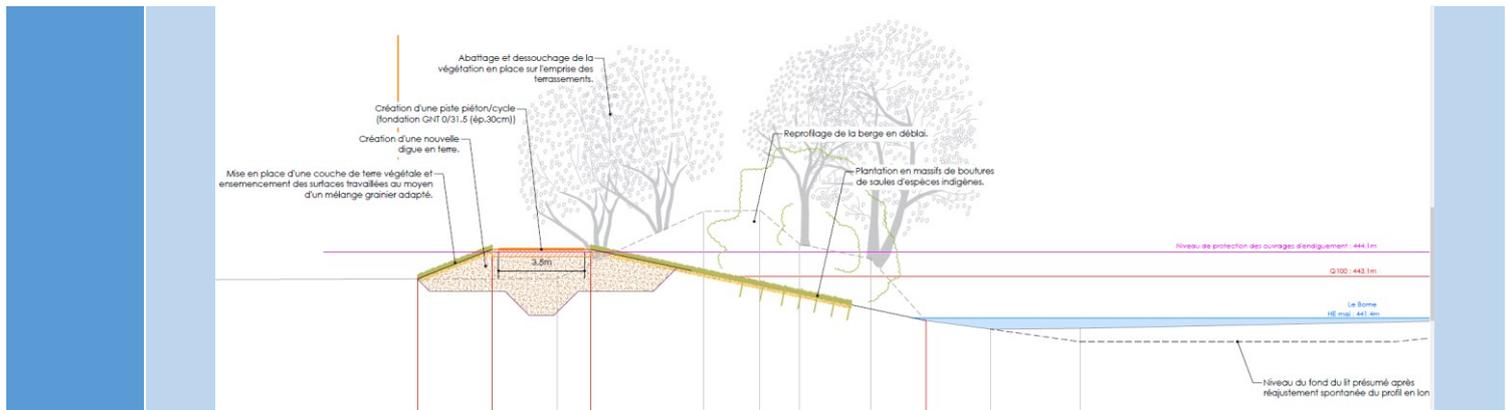
RG-T7

Reprise intégrale et recul de la digue (Q100 + 1 m de revanche)



RG-T8 et T9

Reprise intégrale de la digue et un adoucissement du talus amont avec emploi de techniques de génie écologique



3.3.4 Fonctionnement hydraulique du SE

Les profils en longs présentés sur les figures suivantes exposent :

- La ligne d'eau en crue centennale et tricentennale ;
- Le talweg de la rivière ;
- Le TN aval ;
- Les crêtes de digues actuelles ;
- La crête objectif des endiguements en trait plein orange (Q100 retenu + revanche de 1 m).

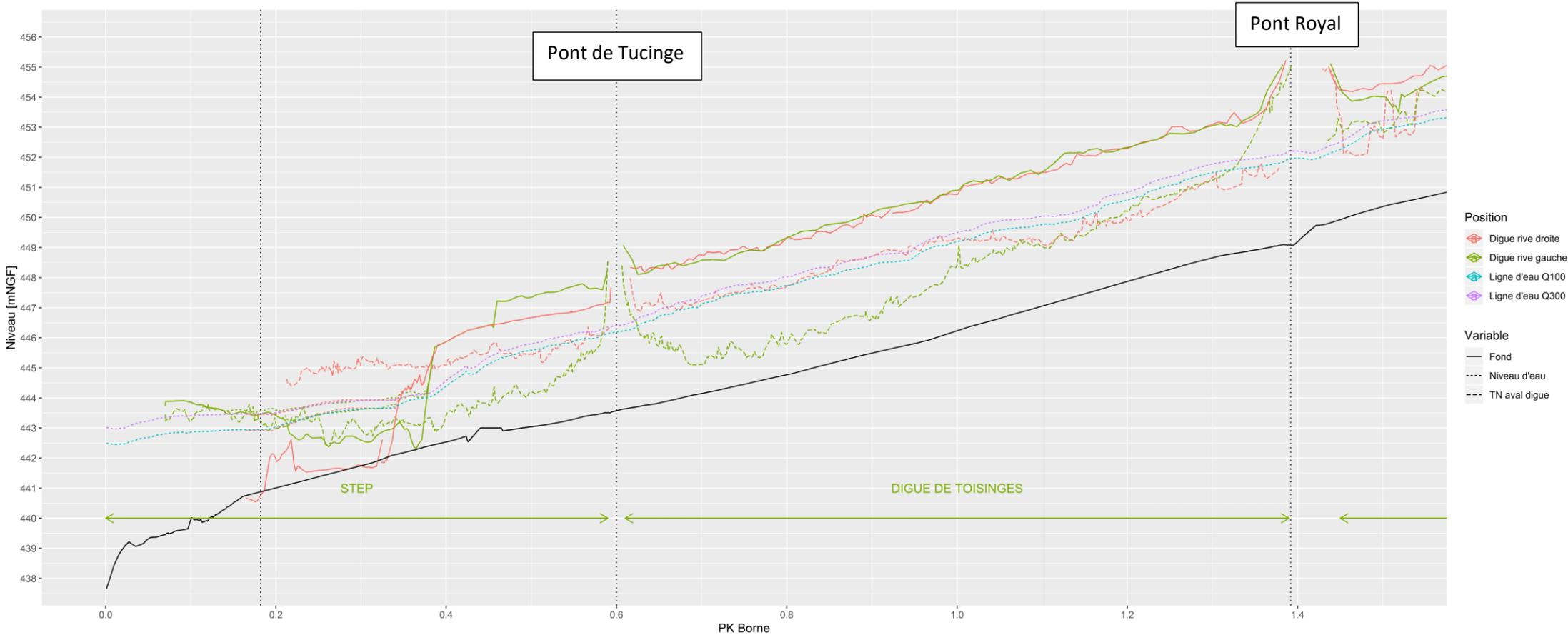


Figure 30 : Profil en long du Borne (Source : CNR) - digues rive gauche en état actuel et lignes d'eau

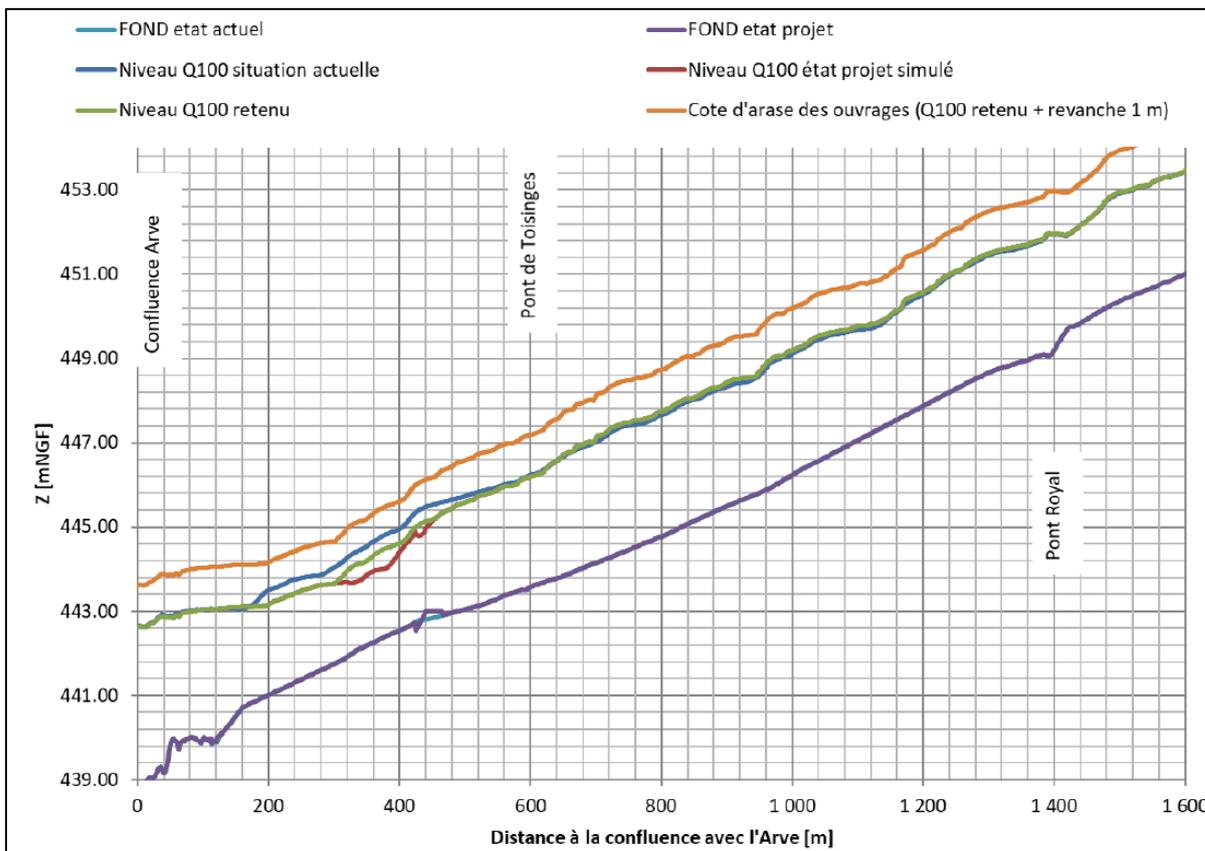


Figure 31 : Profil en long Borne (Source : CNR) – calage des digues projetées

Il est à noter que la crête des digues (Z100 + 1 m) correspond à une crue d'occurrence supérieure à la Q300.

Il est également à noter que le fond du modèle hydraulique état projeté intègre, par rapport au modèle état actuel :

- Le passage de la véloroute sous le pont de la RD1203 (RG-T-1, à RG-T1, cf. § 4.2.2.14),
- La mise en œuvre des 41 épis dans le lit du Borne, du pont de la RD1203 au PM480, (cf. 7.4)
- La géométrie des nouvelles digues et l'élargissement du lit du Borne à partir du RD-T3/T4 en rive droite, et du RG-T6 en rive gauche.

Les évolutions du profil en long au long terme du fait du déplacement du seuil de la STEP, ainsi que les potentielles banquettes engendrées par la mise en place des épis, ne sont pas intégrées dans la modélisation état projet.

Entre l'aval des rampes en enrochements projetées sur le fond du lit du Borne et le seuil de la confluence, déposé dans le cadre du projet, le fond du Borne, laissé en l'état à l'issue des travaux, est voué à s'abaisser sensiblement par érosion régressive à moyen terme. La situation considérée dans le modèle état projeté est celle jugée la plus pénalisante pour les niveaux du Borne en crue, c'est-à-dire la situation immédiatement après-travaux, sans modification altimétrique du fond du lit.

3.3.5 Voie d'accès au 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 du système d'endiguement de

« Saint Pierre en Faucigny entre Arve et Borne » sont représentés avec la couleur orange sur la figure ci-après :

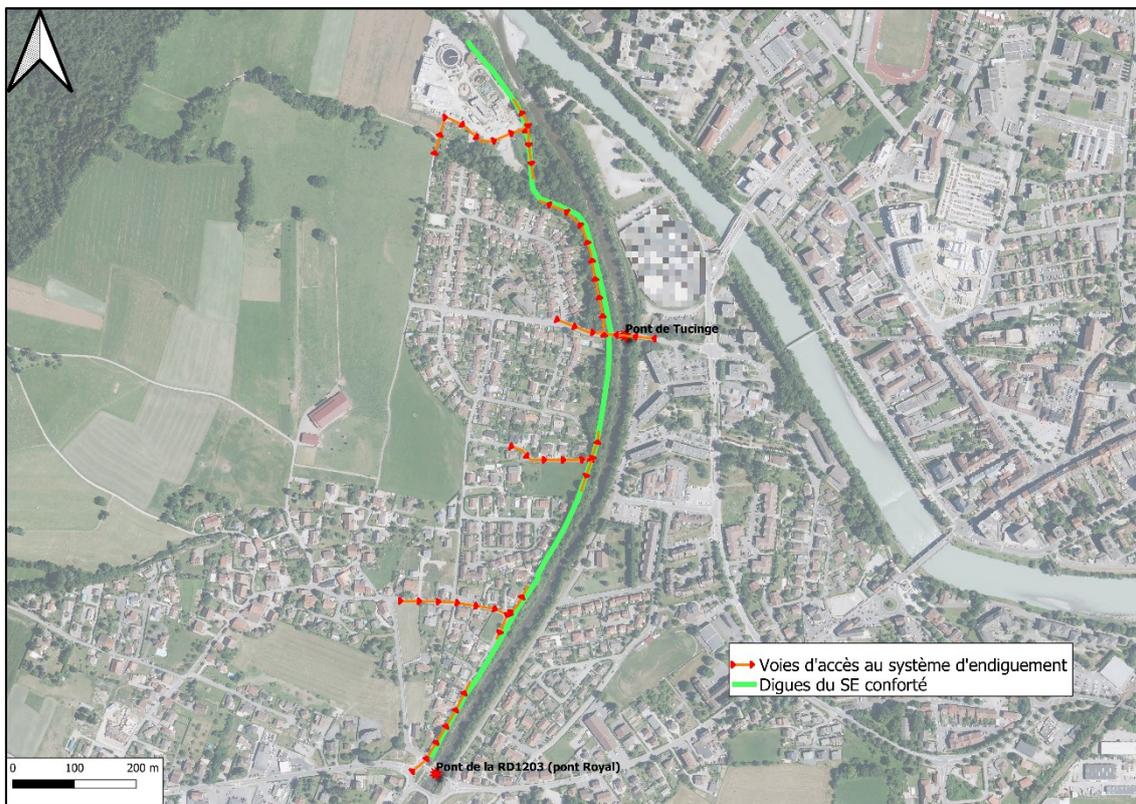


Figure 32 : Voies d'accès au système d'endiguement

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

3.3.6 Aménagement hydraulique autorisé conjointement avec le système d'endiguement

Sans objet.

3.3.7 Analyse de la topographie existante

Les données topographiques et bathymétriques utilisées pour la présente étude sont les suivantes :

- Topographie de la plaine : Grand Genève, Levé Lidar, 2014,
- Topographie des digues et berges (complément) : SM3A, Levé Lidar, 2015,
- Ouvrages et topographies des abords : topographie terrestre SINTEGRA pour SM3A, Juillet 2015,
- Topographie des digues et berges, bathymétrie du lit : topographie terrestre SINTEGRA pour SM3A, Novembre 2017.

Rappel : Les cotes altimétriques données dans ce rapport sont exprimées dans le système NGF (IGN69).

Une analyse comparative des deux sources de données disponibles (lidar et topographie terrestre) concernant la topographie actuelle des digues du secteur d'étude a été effectuée avant de lancer l'étude hydraulique par CNR.

L'analyse, effectuée au droit des 40 profils levés par SINTEGRA en 2015 au droit du secteur d'étude, montre une bonne adéquation entre les deux sources de données, ce qui témoigne de la fiabilité des données utilisées.

3.4 Analyse du fonctionnement du système d'endiguement

Dans ce paragraphe sont résumés les principales causes pouvant être à l'origine d'un dysfonctionnement du système, les principales fonctions de ce système et les niveaux de crue pour lequel le système assure le rôle de protection.

3.4.1 Données historiques structurelles

Le dossier d'ouvrage [DA10] et l'étude historique [DA37] recensent un nombre important de désordres depuis 1726 sur l'ensemble des digues de Bonneville (environ 135 désordres relatifs aux digues avec plus de 50% des défaillances de type « brèches » et 30% de type « affouillement » le reste étant des ouvrages emportés ou des dépôts solides). Il s'agit de données historiques dont il faut relativiser la fiabilité des sources au regard des données plus récentes plus pertinentes.

L'origine mécanique qui conduit à la rupture n'est pas clairement précisée dans l'ensemble des cas évoqués. Ces brèches peuvent être causées par des phénomènes de glissement, d'érosion interne ou d'érosion externe, seuls ou en concomitance, la surverse étant un événement aggravant. La cause principale de leur ouverture ne peut pas être clairement identifiée.

Le renforcement continu du système d'endiguement associé au différentiel croissant d'altitude entre le fond du lit et la crête de digue conduit à la quasi-disparition du phénomène de surverse qui semblait être l'événement initiateur de nombreux dégâts subis par les digues du secteur d'étude.

Ces situations sont assez mal maîtrisées puisque, d'après les informations disponibles, 80 brèches ont été comptabilisées sur les endiguements de la confluence entre l'Arve et le Borne depuis les années 1726 pour 113 crues recensées.

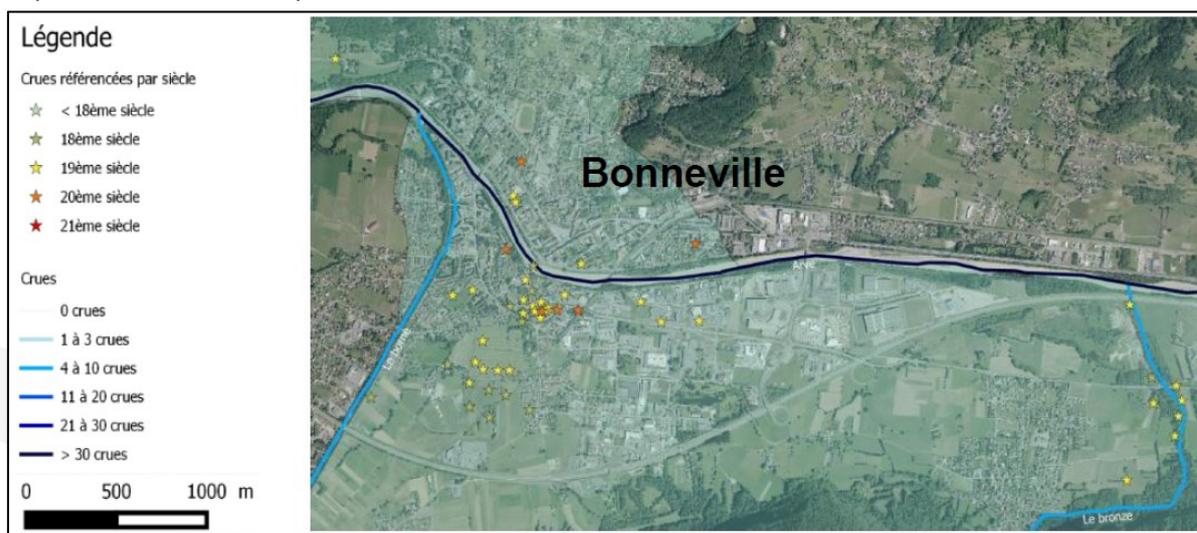


Figure 33 : Crue historique à Bonneville – source : SM3A

3.4.2 Fonction structurelle

L'étude de dangers a pour objectif d'exposer les risques que présentent les ouvrages pour la sécurité publique, directement ou indirectement, en cas d'accident que la cause soit externe ou interne aux ouvrages.

Dans ce cadre, l'analyse fonctionnelle doit permettre de mieux comprendre les relations existantes entre les différents composants des ouvrages afin de déceler les répercussions de leurs défaillances sur le fonctionnement général des ouvrages et de leur environnement.

Le principe de l'analyse fonctionnelle repose sur la décomposition du système selon les fonctions qu'il assure. Elle établit de façon systématique et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur d'un système.

Une fonction est définie comme les actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimés en termes de finalité. Au sens de la même norme, l'analyse fonctionnelle est alors définie comme une démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions.

Le but de cette méthode d'analyse est de représenter le cheminement des fonctions à travers les équipements constituant l'ouvrage. Cela permet de visualiser la contribution de ces équipements vis-à-vis de toutes les fonctions de l'ouvrage.

L'arborescence technique identifiée dans cette analyse fonctionnelle sera ainsi exploitée, de façon systématique, dans l'Analyse Préliminaire des Risques.

Analyse fonctionnelle externe :

Le but de cette méthode d'analyse est de représenter graphiquement l'interaction des ouvrages avec les éléments extérieurs. Cette analyse permet de déterminer les Fonctions Principales (FP) et les Fonctions de Contraintes (FC) des ouvrages vis à vis des éléments du milieu extérieur.

Ont été identifiés les milieux extérieurs suivants :

- Plaine de St Pierre en Faucigny et de Bonneville (rive gauche du Borne) ;
- Borne ;
- Maintenance et surveillance ;
- Environnement hydrogéologique ;
- Continuité de protection ;
- Réseaux ;
- Voies de circulation.

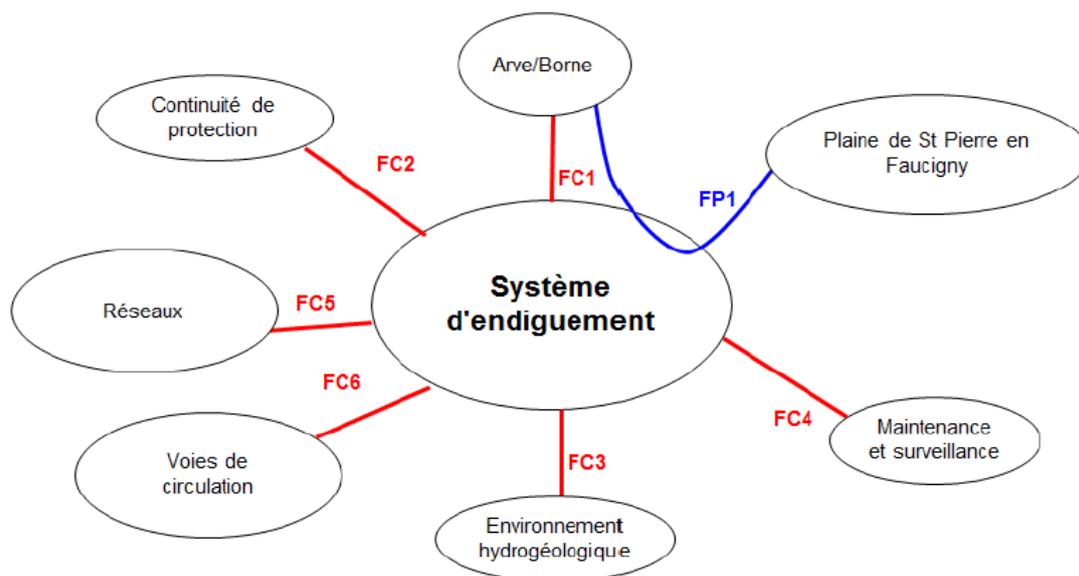


Figure 34 : Analyse fonctionnelle externe

- FP1 : L'ouvrage constitue la protection de la zone protégée contre les crues du Borne et de l'Arve (remous hydraulique)
- FC1 : L'ouvrage de protection résiste aux pressions de l'eau
- FC2 : L'ouvrage constitue avec les autres systèmes d'endiguement et remblai une continuité dans la protection contre le risque d'inondations
- FC3 : L'ouvrage est solidaire de l'environnement hydrogéologique
- FC4 : L'ouvrage est maintenu et surveillé
- FC5 : Les réseaux présents dans la digue sont connus et surveillés
- FC6 : L'ouvrage supporte la circulation routière (entretien)

3.4.3 Impact de l'aménagement hydraulique

Sans objet.

Il n'y a pas d'aménagement hydraulique (au sens de l'article R.562-18) qui participe à la protection de la zone inondable.

3.4.4 Les niveaux de protection et les lieux de référence

3.4.4.1 Définitions

L'article R. 214-119-1 du code de l'environnement : « **Le niveau de protection** d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine est déterminé par la hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que cette zone soit inondée en raison du débordement, du contournement ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. Lorsque la taille et les caractéristiques de la zone exposée le justifient, plusieurs niveaux de protection peuvent être déterminés, chacun étant associé à une partie délimitée de la zone protégée ».

L'article 11 de l'arrêté du 07 avril 2017 précisant le plan de l'étude de danger (modifié par l'arrêté du 30 septembre 2019) : « **Le niveau de protection** qui est associé à un système d'endiguement est précisé par un niveau maximal atteint par le niveau des eaux ou par un débit maximum du cours d'eau ou par un niveau marin maximum. Ces paramètres sont mesurés en un **lieu de référence** pertinent au regard de la zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine qui est indiqué dans l'étude de dangers du système d'endiguement ».

En crue, différents niveaux d'eaux sont identifiés réglementairement :

- Niveau de sûreté : Situation jusqu'à laquelle la probabilité de rupture de la digue est très faible (bornée à 5% par la réglementation) ;
- Niveau de protection : Niveau relevant d'un engagement du maître d'ouvrage, ce niveau est inférieur ou égal au niveau de sûreté ;
- Niveau de danger : Situation au-delà de laquelle la rupture de l'ouvrage est très probable (bornée à 50% par la réglementation).

3.4.4.2 Lieux de référence

Les lieux de références pour mesurer les niveaux de crue sur le Borne sont :

- **Echelle n°1 (amont)** : échelle limnimétrique existante située en rive droite du Borne, au niveau de pont Royal. Il est à noter que cette échelle est suivie à l'aide d'une caméra par le SM3A ;
- **Echelle n°2 (aval)** : échelle à créer dans le cadre des travaux de confortement des digues du Borne. Cette échelle permet de fixer le NP en prenant en compte les potentiels remous hydrauliques de l'Arve en crue.



La localisation des deux échelles sur une carte est donnée par la figure qui suit.

3.4.4.3 Niveau de protection

Le niveau de protection du système d'endiguement en état de travaux achevés sur les digues du Borne (rive gauche) correspond à une crue centennale du Borne, soit un débit de pointe de 178.4 m³/s.

Le tableau suivant permet de synthétiser les niveaux de protection, de sûreté et de danger.

Tableau 14 : Niveaux de sûreté, de protection et de danger du système d'endiguement en état de travaux achevés

Niveau	Lieu de référence	Cote Z	Débit correspondant
Sûreté	Echelle n°1 - Pont Royal	451.97 m NGF	Q100 = 178 m ³ /s
	Echelle n°2 - Confluence	443.06 m NGF	
Protection	Echelle n°1 - Pont Royal	451.97 m NGF	Q100 = 178 m ³ /s
	Echelle n°2 - Confluence	443.06 m NGF	
Danger	Echelle n°1 - Pont Royal	452.19 m NGF	Q300 = 213 m ³ /s
	Echelle n°2 - Confluence	443.52 m NGF	

La zone protégée par le système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne" et les niveaux de protection au droit des lieux de références sont présentés dans la figure ci-après :

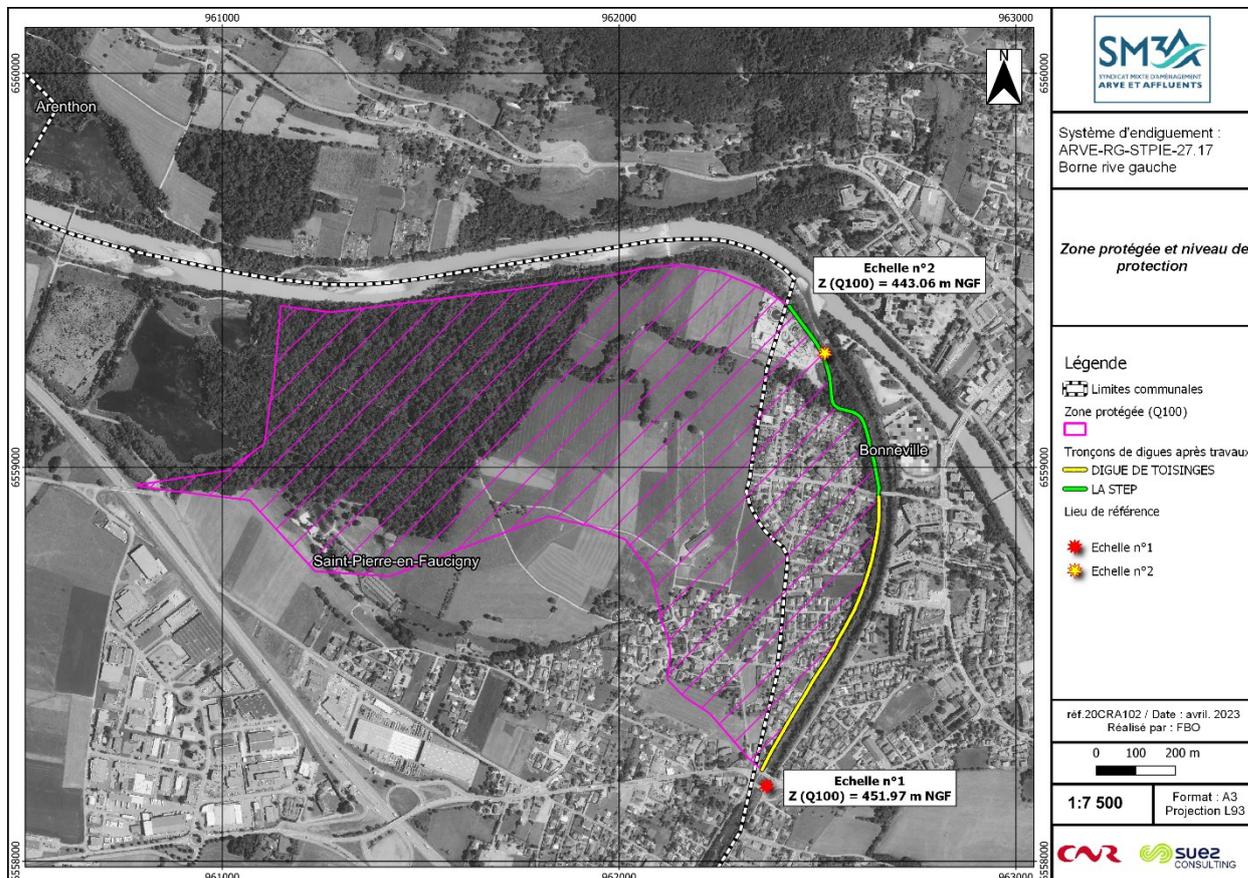


Figure 35 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection

3.4.4.4 Situations pouvant survenir pour des niveaux dépassant les performances du système d'endiguement

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

- Une crue d'occurrence supérieure à la crue de référence ;
- Une défaillance structurelle d'un ouvrage du SE ;
- Une défaillance fonctionnelle d'un ouvrage hydraulique du SE.

Pour le système d'endiguement étudié, il n'existe pas d'ouvrage hydraulique nécessitant de manœuvres spécifiques. Ainsi, la défaillance fonctionnelle du système est écartée.

Les principales situations pouvant survenir lors du dépassement des performances du SE sont des défaillances structurelles :

- Submersion de la digue, pouvant entraîner une érosion externe / interne et des venues d'eau dans la zone protégée ;
- Ouverture de brèches dans le corps de la digue entraînant une inondation de la zone protégée ;

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE

- Défaut d'étanchéité du corps de digue et de la fondation ;
- Défaut de protection mécanique de digue ;

Nous rappelons ci-dessous les deux sous-scénarios de défaillances structurales modélisés. Le détail est présenté dans le chapitre 8 de cette présente étude de dangers.

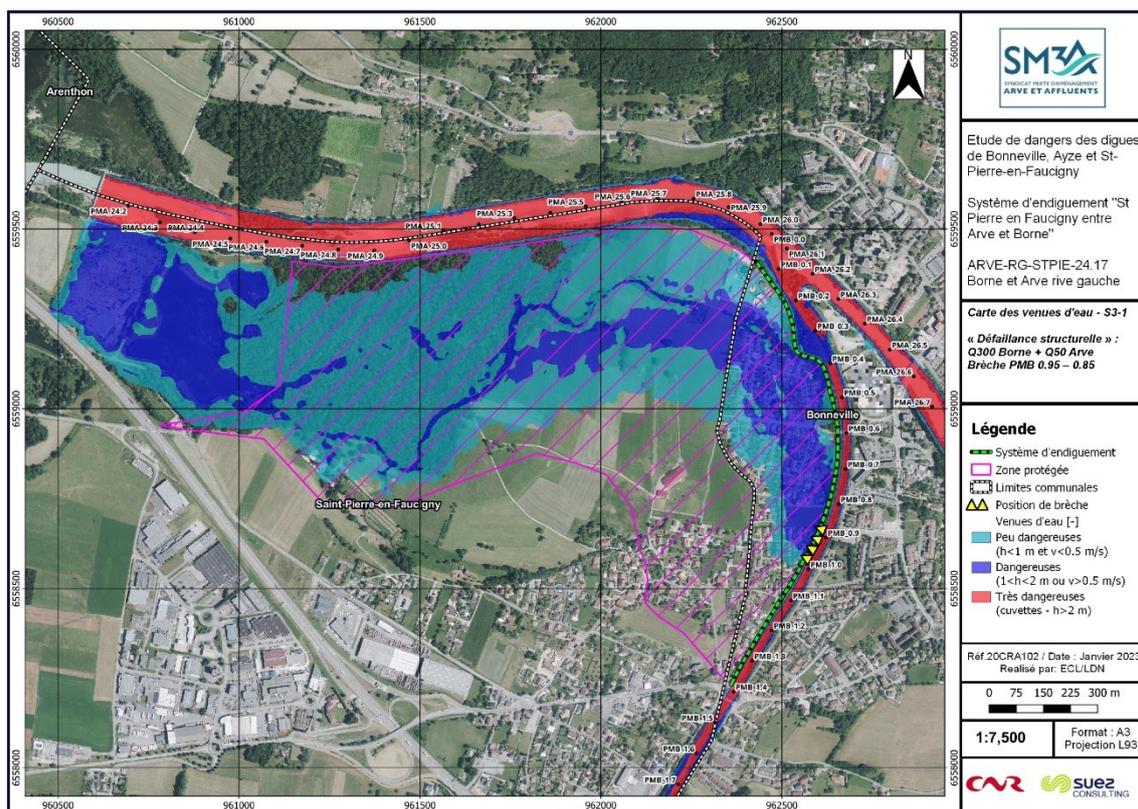


Figure 36 : Défaillance structurale 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

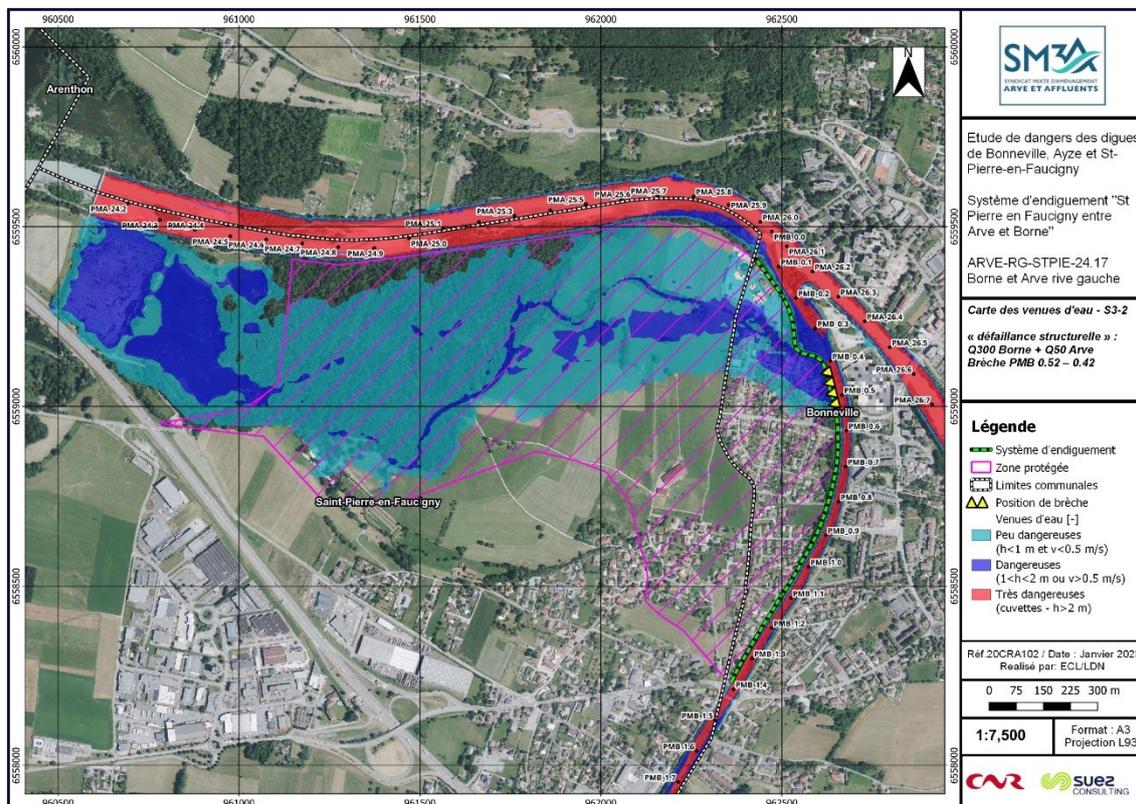


Figure 37 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

3.5 Organisation du gestionnaire

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 seront mises en place en phase projet (à noter qu'une des deux échelles est déjà présente au niveau du pont Royal).

Le SM3A, gestionnaire du système d'endiguement, a édité à l'échelle du bassin versant de l'Arve un document intitulé : « Consignes générales de surveillance et d'exploitation - Ouvrages classés ou à classer constitutifs de systèmes d'endiguement », novembre 2017.

Ce document, qui a été transmis au Préfet, précise l'organisation du gestionnaire pour assurer l'exploitation, l'entretien et la surveillance des ouvrages, conformément à l'Article R.214.122 I-2 du Code de l'Environnement. Cette organisation est définie à l'échelle du bassin versant de l'Arve, de façon globale, et non individuelle à l'échelle d'un ouvrage ou d'un système d'endiguement.

Des consignes spécifiques au Système d'Endiguement de la présente étude 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 du Borne rive gauche.

Pour plus de détails sur l'organisation du gestionnaire, voir le chapitre 9.

3.6 Consignes de surveillance et d'exploitation des ouvrages hors période de crise

3.6.1 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

3.6.1.1 Passages récurrents

Il s'agit de passages réguliers réalisés par les techniciens à l'occasion de leurs différentes tournées sur le terrain. Le technicien s'assure de l'absence de désordre majeur sur les ouvrages (vue macroscopique) mais également apprécie l'environnement de l'ouvrage (évolution morphologique du lit : déplacement des bancs, engrèvement ou incision du lit, dynamique générale, évolution de la végétation...).

La surveillance générale et macroscopique assurée par les techniciens doit permettre :

- de donner l'alerte en cas d'inquiétudes relatives à la sécurité de l'ouvrage et, en cas de danger immédiat, de prendre les mesures nécessaires ;
- de suivre, dans le temps, les actions subies par les ouvrages ;
- de suivre l'évolution du fil d'eau ;
- de signaler tout accident ou incident grave ;
- d'observer les anses d'érosion, et autres glissements, aux abords des ouvrages ;
- d'observer le contournement possible des seuils, pouvant entraîner une déstabilisation de l'ouvrage ;
- de guetter l'apparition éventuelle d'anomalie dans le comportement tant fonctionnel que structurel des ouvrages.

3.6.1.2 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.

3.6.1.3 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.

3.6.2 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.**

3.6.2.1 Plans de gestion des matériaux solides

Le SM3A dispose de plans de gestion et de DIG correspondantes sur l'Arve et une partie de ses affluents, travaille à l'élaboration des plans sur les affluents qui en sont actuellement dépourvus, et à leur renouvellement le cas échéant.

La gestion des matériaux solides a pour objectif de répondre à des problèmes ponctuels tout en tenant compte du fonctionnement global du transport solide sur l'ensemble des cours d'eau du bassin versant de l'Arve.

Les plans de gestion des matériaux solides du bassin versant de l'Arve ont pour objet le respect d'un profil qui permet à la fois de répondre aux problèmes d'inondation et de maintenir un équilibre global pour la rivière ainsi que la mise en œuvre d'opérations permettant de répondre spécifiquement aux enjeux du territoire.

Ces plans de gestion doivent permettre au SM3A d'appliquer toutes les modalités techniques de gestion du transport solide nécessitées par le respect d'un « profil référence » du cours d'eau, tout en respectant les contraintes d'ordre réglementaire et juridique.

L'objectif est d'élargir le champ de réflexion des interventions de gestion du lit à des tronçons homogènes plus larges et d'avoir une vue globale des interventions sur l'ensemble du bassin.

Ces plans de gestion s'appuient sur des diagnostics de la situation actuelle et prévisionnelle pour l'ensemble des cours d'eau du bassin versant de l'Arve. Des modalités de suivi du lit sont

également définies sur l'ensemble du cours afin de connaître les écarts par rapport au « profil de référence » et de motiver des interventions d'entretien ou de stabilisation adaptées à l'évolution morpho dynamique du lit.

Pour rappel, la revanche importante entre la ligne d'eau Q100 et la crête de digue aménagée permet d'intégrer des potentiels oscillation de fond de lit liées à des apports ou reprises de matériaux par charriage.

Un suivi topographique (bisannuel) du fond de lit est nécessaire (profils en long, lidar...). Également, les échelles limnimétriques permettront de suivre les niveaux du fond de lit lors des reconnaissances terrain par les techniciens.

Il est important de coupler le plan de gestion des matériaux solides au plan de gestion de la végétation (voir ci-dessous). Cela concerne par exemple les bancs alluviaux qu'il faut maintenir en situation mobile (limiter la végétation, scarifier...).

3.6.2.2 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.

3.6.2.3 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 coûteuse 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 15 : 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.

3.6.2.4 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.

3.7 Consignes de surveillance des ouvrages en période de crise

3.7.1 Chaîne de responsabilité et rôle des acteurs en gestion de crise

3.7.1.1 Chaîne de responsabilité

La répartition des rôles et des responsabilités dans la gestion de crise est multiple et s'applique à plusieurs niveaux :

- ✓ L'Etat responsable d'organiser la surveillance et la prévision des crues, grâce notamment au service Vigicrues ;
- ✓ Le Préfet responsable de la protection civile ;
- ✓ Le Maire responsable de l'établissement du Plan Communal de Sauvegarde (PCS), décideur sur la mise en place une Réserve Communale de Sécurité Civile (RCSC), et Directeur des Opérations de Secours ; Il exerce également un pouvoir de police s'agissant de l'information préventive, la surveillance, l'alerte et la mise en sécurité des personnes.
- ✓ Les gestionnaires d'ouvrages classés Système d'Endiguement responsables de la conduite des études (EDD, VTA...), de la surveillance et des travaux d'entretien ;
- ✓ Les citoyens qui doivent adopter des comportements et des réflexes adaptés.

La responsabilité du SM3A découle de l'exercice de la compétence transférée en matière de Prévention des Inondations (GEMAPI) et plus spécifiquement sur la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement en période de crise.

Le SM3A se doit de :

- Assurer une surveillance adéquate des ouvrages en déployant les moyens humains suffisants ;
- Etablir une véritable chaîne d'information pour alerter les décideurs compétents en matière de sécurité publique ;
- Etre capable d'agir en urgence sur ces ouvrages pour une remise en état ou résorption des désordres si et seulement si, les travaux engagés n'aggravent pas le risque ;
- Assurer la sécurité de ses équipes sur le terrain ;
- Assurer les réparations nécessaires en post-crise.

Les opérations de secours sont coordonnées sous une direction unique, assurée par les maires ou le préfet, autorités de police générale, investis de pouvoirs étendus en cas de situation d'urgence.

3.7.1.2 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).

3.7.2 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).

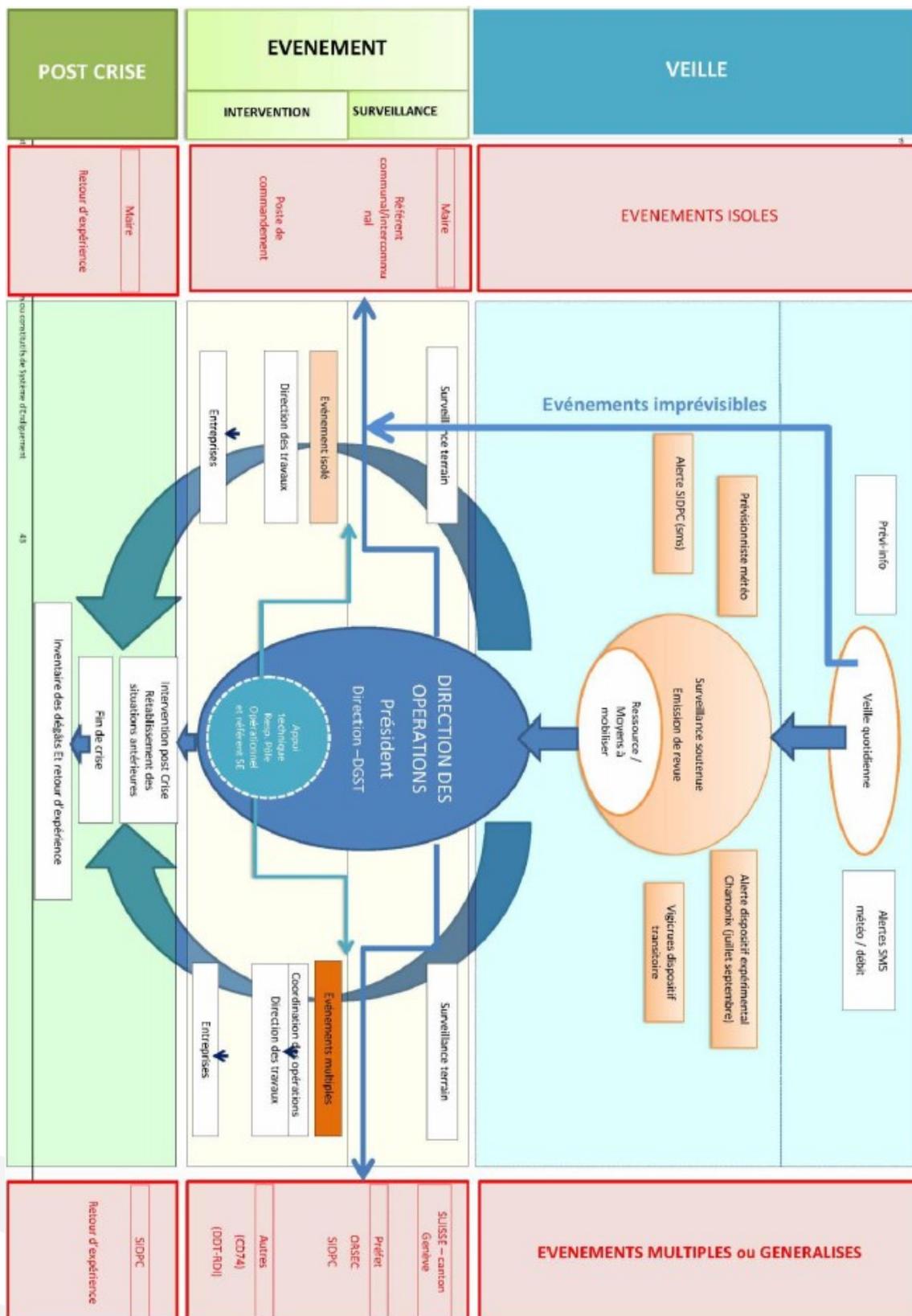


Figure 38 : Dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise

3.7.2.1 Une veille quotidienne

Une veille est assurée quotidiennement par l'ensemble des agents techniques du SM3A au travers des éléments décrits au § 9.3 :

- 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...).

3.7.2.2 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.

3.7.2.3 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.

3.7.2.4 Surveillance terrain

Une fois la DO en place, elle active la surveillance sur le terrain en déployant les moyens humains.

Les agents de terrain surveillent les points de vigilance spécifiques de leur territoire et retransmettent l'évolution sur le terrain au cadre technique en cas de DO élargie ou à la Direction en cas de DO restreinte.

En cas de désordres observés, l'agent évalue :

- l'importance du désordre ;
- son évolution ;
- la nécessité de suivre à un pas de temps donné ce désordre

Les agents de terrain peuvent participer à des Postes de commandements sous la responsabilité des Maires ou du Préfet. Dans ce cas de figure, toute décision d'intervention du SM3A sera au préalable validée par la DO.

Les agents de terrain mis en situation de « gestion de crise » n'assureront que très ponctuellement une surveillance nocturne. Pour des situations d'envergure (interventions nocturne, forte pluviométrie...) et sur décision de la DO, les agents techniques peuvent être accompagnés en binôme dans les véhicules par des collaborateurs du SM3A, afin de réduire les risques inhérents aux travailleurs isolés et faciliter les transmissions de données.

3.7.2.5 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.

3.7.2.6 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.

3.7.2.7 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.

3.7.2.8 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.

3.7.3 Visites post-crue

3.7.3.1 Objet

La préparation, l'organisation et la conduite de l'inspection visuelle post-crue de la digue relèvent du service gestionnaire des ouvrages. Cette visite doit se faire dans les meilleurs délais après la crue.

En cas de crue majeure couvrant un nombre important de digue, le SM3A pourra faire appel à un bureau d'études pour réaliser ces visites.

Avant l'inspection post-crue, tous les documents topographiques, les comptes rendus des précédentes visites et les clichés doivent être réunis.

Les constats effectués lors de ces inspections visuelles se font sur une fiche semblable à celle utilisée lors des visites annuelles (en annexe XV). Un dossier photographique des désordres est nécessaire avec sa légende et sa localisation ainsi que des photos d'ensemble.

On notera que d'autres phénomènes peuvent nécessiter le déclenchement des visites post-crue :

- Les accidents nautiques (choc d'embarcation sur les perrés, échouage, etc.) ;
- Les engravements important du lit mineur ;
- **Les séismes de magnitude supérieure à 5 sur l'échelle de Richter dans un rayon de moins de 100km.**

Ces visites post-crue permettent également de faire l'inventaire de l'ensemble des dégâts sur le territoire et de prioriser les interventions post-crue.

3.7.3.2 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.

3.7.3.3 Compte-rendu des visites

La visite post-crue donnera lieu à un compte-rendu de la part du géomètre et des surveillants de digues.

Ce rapport reprendra la totalité des éléments significatifs de la visite de surveillance :

- Dates de la visite post-crue ;
- Composition des équipes de surveillance ;
- Zone de surverse sur les digues ;
- Localisation des désordres (indices de fuite, embâcles, arbres basculés, glissement...);
- Inspection des organes secondaires,
- Photos,
- Relevé des laisses de crue.

Le compte rendu de l'inspection visuelle post-crue servira de support pour les événements à venir et permettra de justifier des levés topographiques dans les secteurs où les désordres sont importants ou encore des reconnaissances complémentaires à la pelle mécanique.

Les désordres (tels que embâcle, érosion du talus ou pied de digue, indice de fuite, glissement du talus,...) relevés sur le terrain par le personnel du SM3A sont renseignés sous SIRS Digues avec leur photo.

Les relevés de laisse de crue sont également saisis sous SIRS Digues.

3.7.3.4 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.

3.7.4 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.

DOCUMENT B : ANALYSE DES RISQUES ET JUSTIFICATION DES PERFORMANCES

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 des bassins versants de l'Arve et du Borne

4.1.1.1 Bassin versant de l'Arve

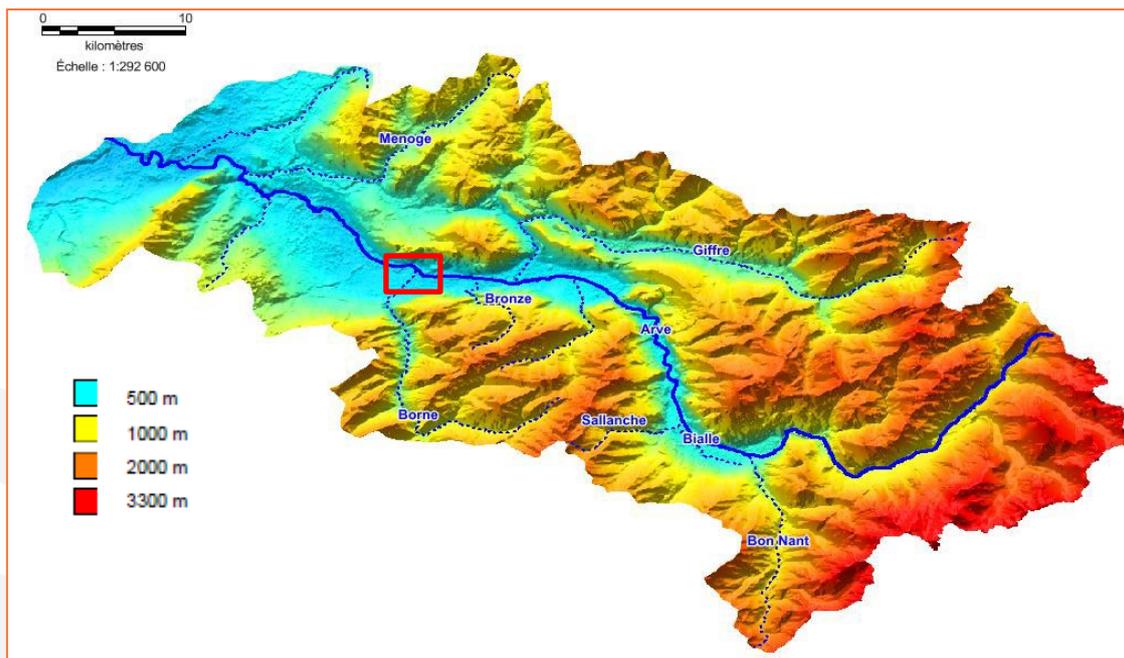
Référence : Dossier préliminaire d'établissement du SAGE Arve

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

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

L'Arve prend ses sources dans le Massif du Mont-Blanc, au sein du col de Balme, près d'Argentière. Il chemine sur une distance de 107,8 km pour rejoindre le Rhône, dont il est le premier affluent. Son embouchure est située 1 km en aval du lac Léman, au lieu-dit de La Jonction, proche de Genève. L'Arve arrose au total 31 communes, 26 en France et 5 en Suisse. Son 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 :



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 à pluvial. Il s'agit d'un régime complexe, des écoulements abondants et des variations saisonnières de grande amplitude qui reflètent les influences multiples de chacune des parties du versant.

4.1.1.2 Bassin versant du Borne

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

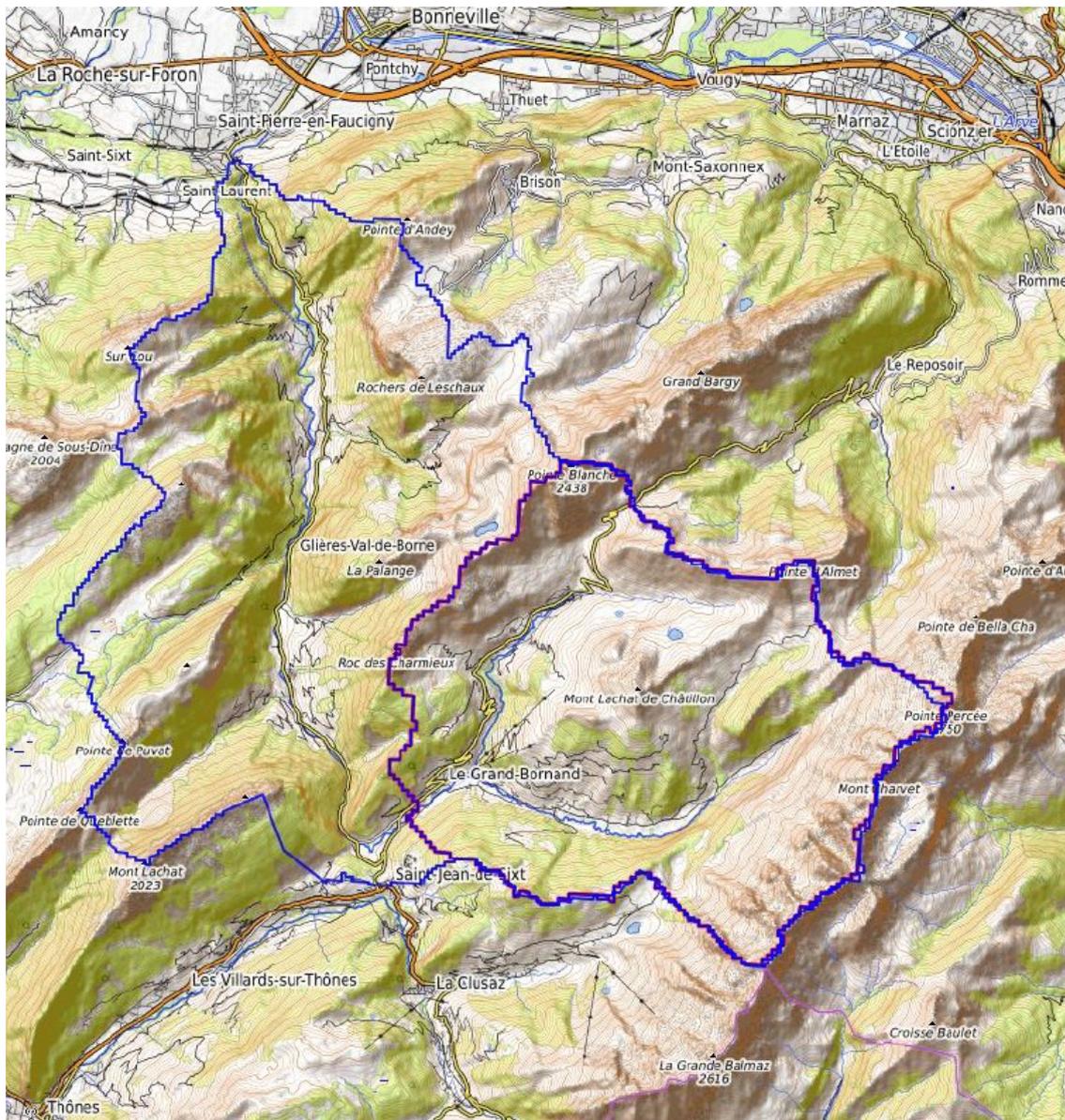


Figure 40 : Bassin versant du Borne (source : étude EDF). Découpage en deux sous bassins versants

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 16.

Tableau 16 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO

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

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

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

Comme mentionné dans ce rapport, 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.

Les débits retenues 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 (affluent de l'Arve)

Le Giffre est un affluent rive droite de l'Arve qui se rejette dans l'Arve en amont direct de la zone d'étude. Son bassin versant, de 456 km², est de nature karstique, ce qui complique l'estimation de ces débits de pointe. Sa surface représente environ 32% de la surface du bassin de l'Arve à Bonneville. Les débits de pointe maximum du Giffre et les débits à Bonneville et Thyez de l'Arve, varient suivant les sources d'information. Le tableau suivant synthétise un extrait de l'étude ISL 2016 ([DA26]) et de l'étude, réalisée par Hydratec (cf. [DA28]) en 2014.

Tableau 17 : Débits de pointe pour des crues de l'Arve et du Giffre

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

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

Pour les calculs des crues de l'Arve, les hydrogrammes définis dans la récente étude d'EDF [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 des seuils d'alerte à la station limnimétrique du Giffre à Marignier.

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 [DA17].

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

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

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

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

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

Source : SOGREAH Ingénierie Conseils pour Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Borne (S.M.3.A.) et D.D.A.F. de Haute Savoie, Etude Générale d'Aménagement Hydraulique du Borne, Septembre 1989 [DA14]

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 m³ ont été extraits. Ces opérations de « curage » du lit ont eu un impact important sur les fonds de la rivière, avec des incisions pouvant atteindre 5 à 10 m dans certains secteurs (en particulier à proximité des anciennes gravières). Ce facteur est probablement le plus important et a pu impacter les affluents (dont le Borne).

Il en résulte au final 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 [DA18]

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 [DA18]

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^{ème} 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^{ème} siècle qu'un endiguement durable a commencé à se mettre en place et s'est poursuivi activement au 20^{ème} siècle pour couvrir aujourd'hui les $\frac{3}{4}$ du linéaire de l'Arve.

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

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

- **La création de barrages hydroélectriques, dont le barrage des Houches en 1953 :** Ces aménagements interceptent une partie des matériaux solides transités en amont et contribuent à l'incision du lit en aval. Au niveau du barrage des Houches, sur les 180 000 m³ de matériaux arrivant dès l'amont, seuls 15 000 m³ transitent au travers du barrage ;
- **Le remblaiement du lit majeur de l'Arve** dont l'effet est de réduire les possibilités d'écrêtement des crues ;
- **Les extractions massives réalisées dans le lit, entre 1950 et 1983 :** On estime aujourd'hui qu'environ 10 millions de m³ de matériaux ont été extraits entre 1950 et 1983* de l'Arve, auxquels il faudrait ajouter les très importantes extractions effectuées sur le tronçon suisse au début du 20^{ème} siècle. Sachant que, dans l'état naturel, en supposant que chaque tronçon de l'Arve se trouve en équilibre, le transport annuel par charriage dans l'Arve est d'environ

100 000 m³, il faudrait au moins 100 ans pour reconstituer le stock alluvial, en supposant que l'alimentation en matériaux n'ait pas été modifiée, ce qui n'est pas le cas ;

- **Les aménagements de correction torrentielle sur les affluents** : les travaux de restauration des terrains en montagne entrepris avec succès par les services RTM et l'allègement de la pression pastorale ont conduit à limiter l'érosion des versants et réduire les apports de matériaux solides dans l'Arve.

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

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

4.1.4.4 Morphologie actuelle

L'Arve : Source : Hydratech pour S.M.3.A., Analyse des évolutions topographiques du lit de l'Arve, Ref 0163102, Juillet 2013. [DA22]

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 avoir retrouvé, année après année, sa pente d'équilibre entraînant une stabilisation du phénomène d'incision. Cette stabilisation est maintenue par la mise en place de seuils le long du lit de l'Arve.

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-Rumilly 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. 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 [DA35] 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 par contre difficile d'estimer l'âge de leur base. Comme le relève Lombard (1985, p. 151-152), dans la vallée de

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE

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.

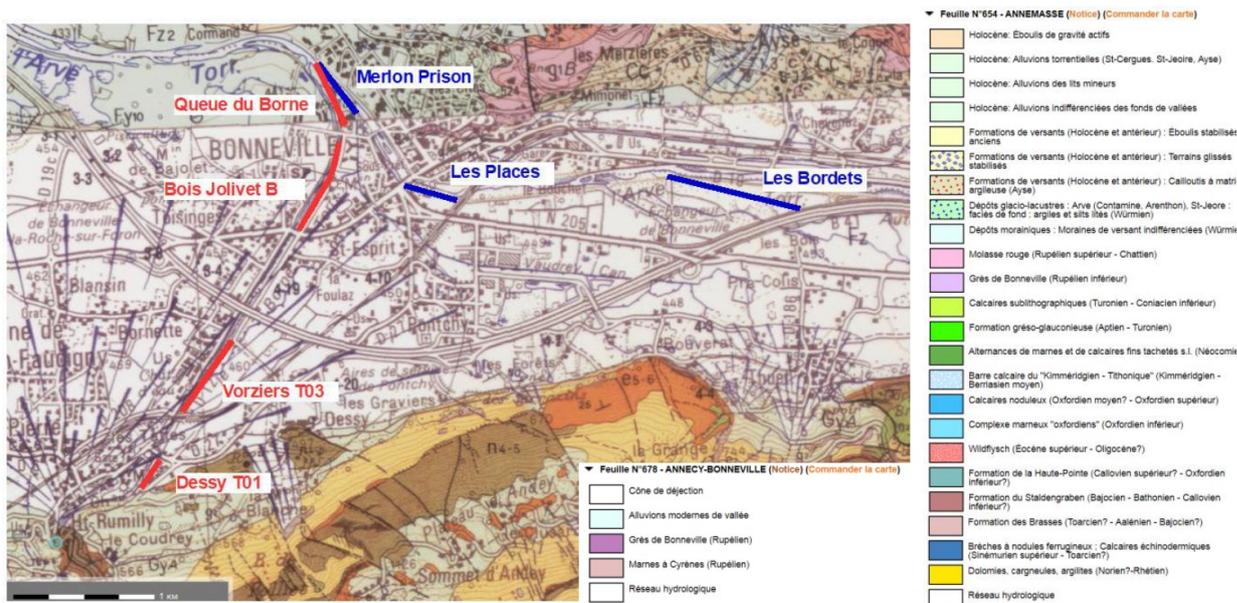


Figure 41 : Extrait des cartes géologiques d'Annemasse et d'Annecy-Bonneville au 1/50000 du BRGM

Le dossier d'ouvrage [DA34] 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).

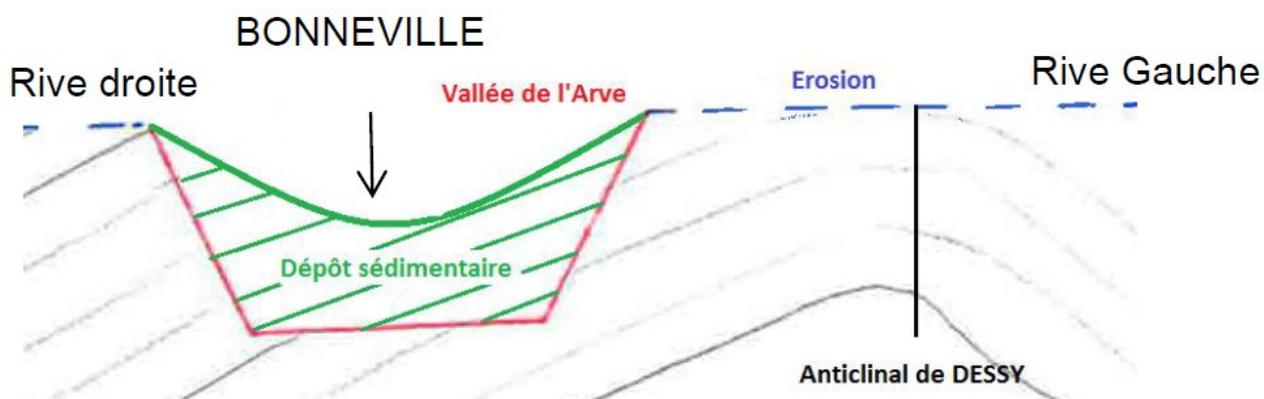


Figure 42 : Schéma en coupe de la géologie du site

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 [DA23], 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 sur Bonneville en limite de la commune d'Ayze. Il n'existe pas de coupe géologique (puits d'Ayze, rapport Bapendier 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 (voir §7).

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 (Réf. [DA40])

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	Potentielles espèces arboricoles : Noctule de Leisler, Pipistrelle de Nathusius
insectes	Lucane cerf-volant	

Tableau 18 : Faune à enjeux écologiques moyen et fort - indicatif

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.

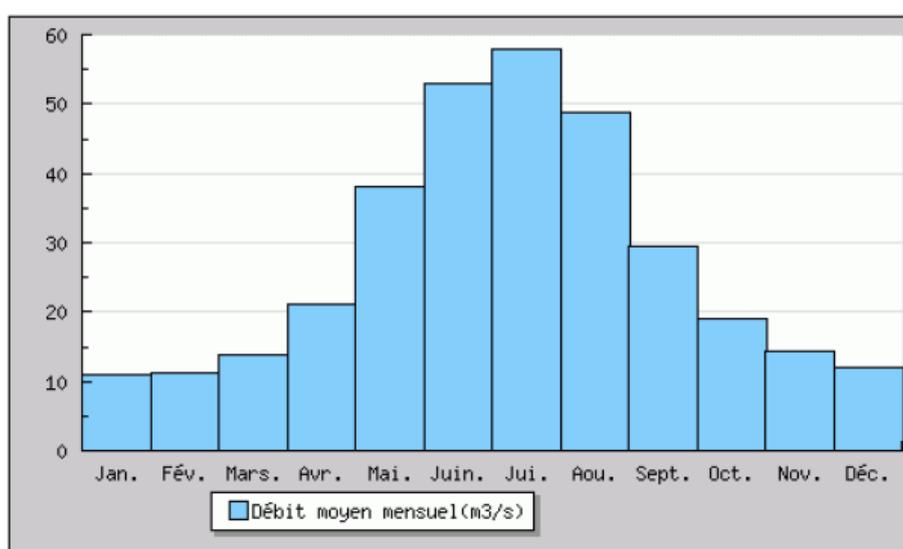


Figure 43 : Débit moyen mensuel de l'Arve à Sallanches – Période 1965 – 2018 – Source banque HYDRO

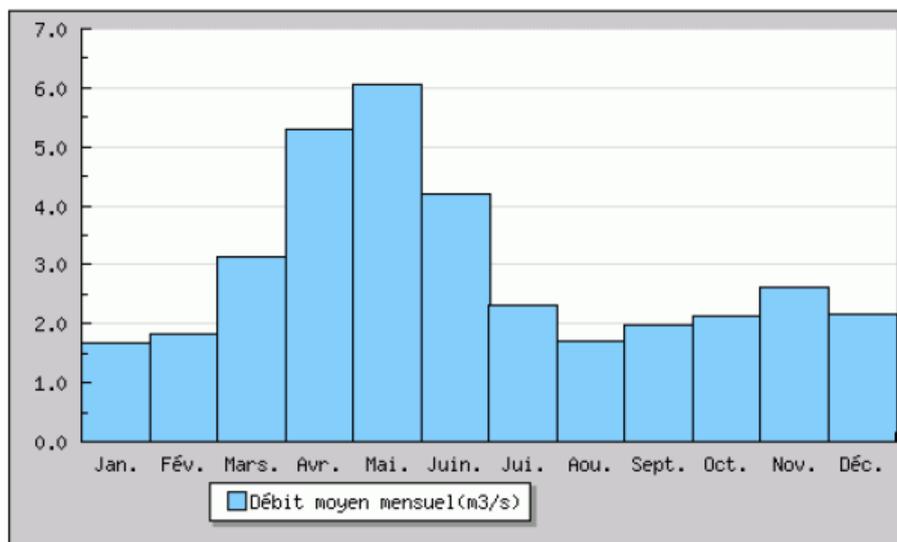


Figure 44 : Débit moyen mensuel du Borne à Saint-Jean-de-Sixt – Période 1964 – 2018 – Source banque HYDRO

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 dans une moindre mesure en fin d'été.

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 [7] 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 [8] 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 (hydrologie retenue par le SM3A) :

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

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

Tableau 19 : Débits de pointe de l'Arve, du Borne et du Bronze pour les crues du Borne - CNR

Période de retour Borne [ans]	Période de retour Arve [ans]	Arve (Bonneville) [m ³ /s]	Borne (Saint-Pierre-en-Faucigny) [m ³ /s]	Bronze [m ³ /s]
2	2	380.4	66.6	7.2
5	5	475.5	93.5	8.8
10	10	525.0	113.5	9.8
20	20	630.7	130.0	10.8
30	30	691.5	141.9	13.0
50	30	691.0	156.6	13.0
80	30	691.0	171.4	13.0
100	30	691.0	178.4	13.0
200	50	767.0	201.4	13.0
1000	50	767.0	254.7	13.0

- Q10 Borne en considérant l'Arve en crue Q10 également ;
- Q100 Borne en considérant que le niveau de l'Arve est à Q30 ;
- Q300 Borne en considérant que le niveau de l'Arve est à Q50 ;

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) :

- **Crues du Borne :**
 - **Q100 Borne** (178.4 m³/s) + Q30 Arve (691.0 m³/s)
 - **Q300 Borne** (212.9 m³/s) + Q50 Arve (767.0 m³/s)

Le graphique ci-dessous présente les hydrogrammes des crues du Borne et de l'Arve en crue centennale du Borne.

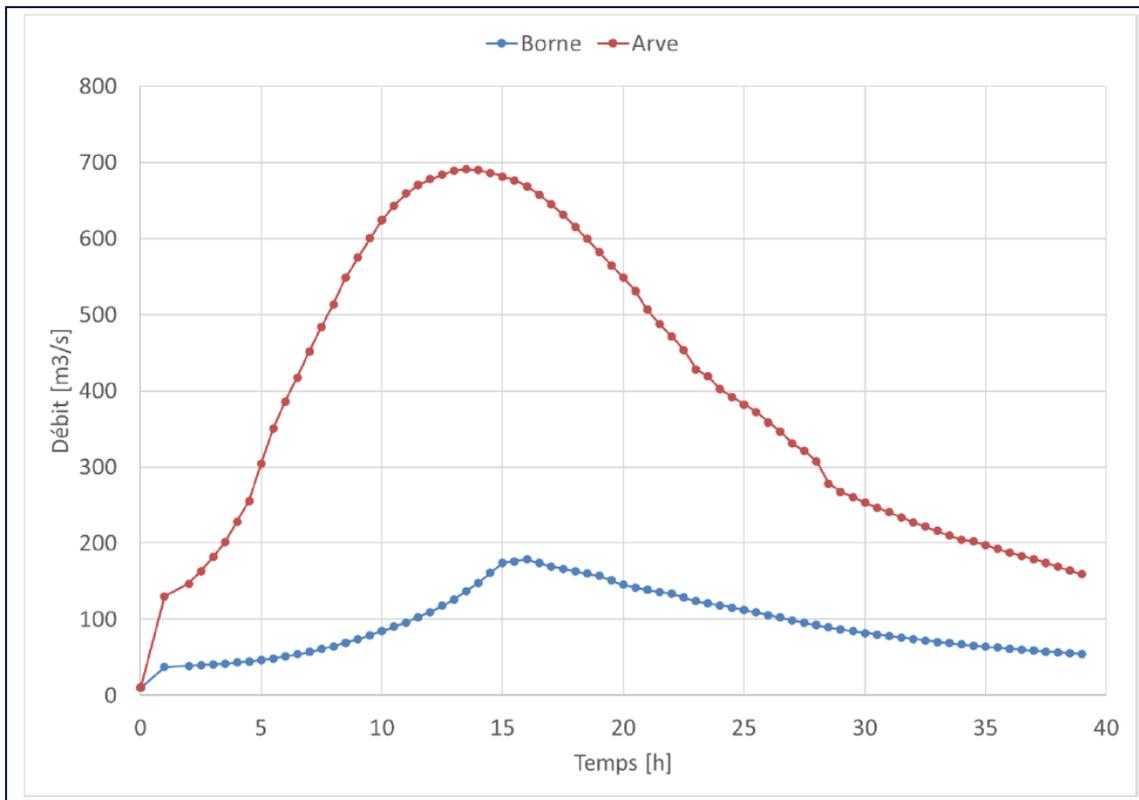


Figure 45 : Hydrogrammes de crues relatifs à la crue centennale du Borne

4.2.3 Les crues historiques

Les principales crues ayant le plus impacté le système d'endiguement "Saint-Pierre entre Arve et Borne" ont principalement eu lieu de juin à novembre. La fonte des neiges et les orages d'été sont à l'origine des forts débits de juin à août. Les crues d'automne, septembre à novembre voire décembre, sont provoquées par des pluies chaudes associées à une remontée du vent du midi entraînant la fonte des zones de névés ou de glaciers. Ces crues sont des crues rapides, charriant une quantité importante de matériaux solides, et pouvant générer des dégâts importants sur les habitations. L'étude historique réalisée par la société Achys Diffusion en Juillet 2017 [DA37] est un référentiel plus détaillé. Après 1968, la source des informations change au profit du PPRi de Bonneville en vigueur [DA5].

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.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE



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

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

Tableau 20 : Description des crues historiques – source étude historique réalisée par Acthys Diffusion [DA37]

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 46. 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.

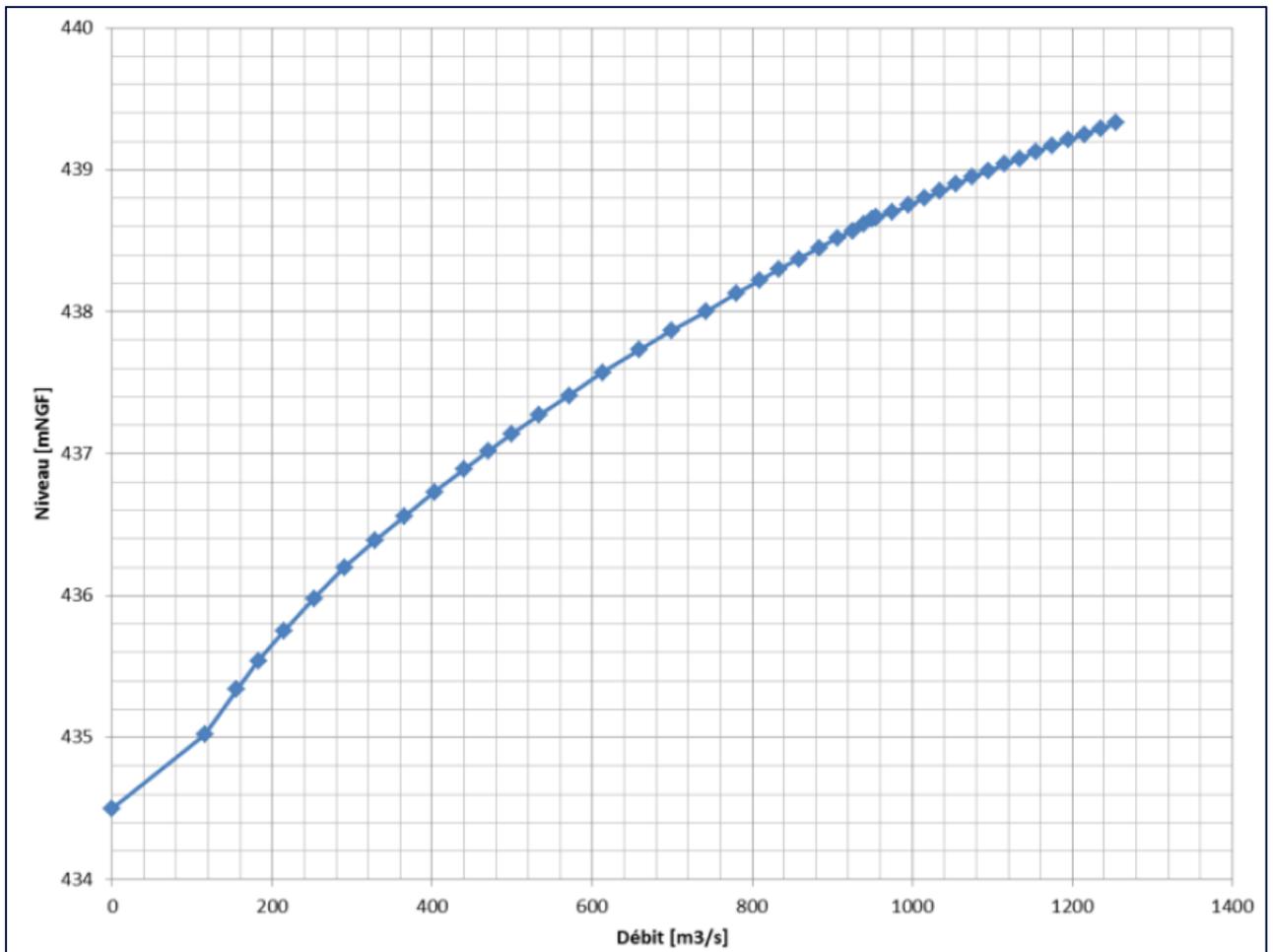


Figure 46 : Construction de la courbe de tarage à l'aval du modèle

4.3 Analyse hydraulique

4.3.1 Le code de calculs Telemac-2D

Pour plus de détails, voir l'annexe 6 – étude hydraulique, CNR.

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

4.3.2 Emprise du modèle

Le périmètre de l'étude hydraulique concerne :

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

Le modèle hydraulique couvre une superficie totale de 12.4 km².

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

Le modèle représente le Borne du Pk4.2 au PK0 jusqu'à la confluence avec l'Arve et l'Arve du PK33.3 au PK24.1.

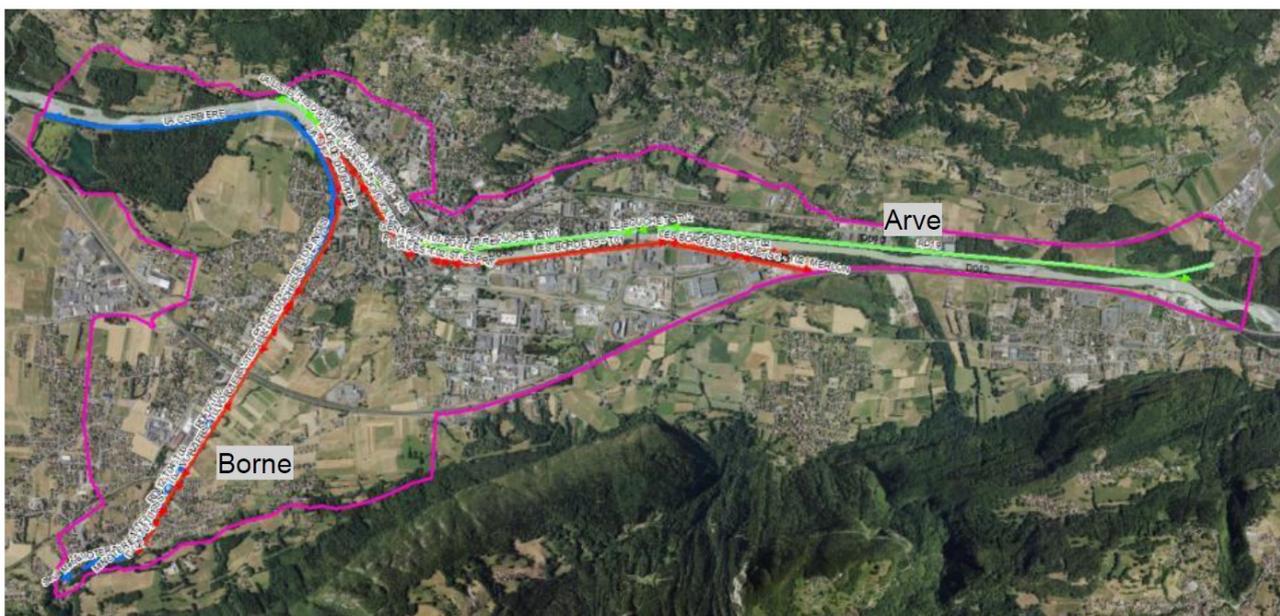


Figure 47 : Périmètre du modèle hydraulique (rose)

4.3.3 Modélisation des ponts et ouvrages

Les ouvrages principaux ont été modélisés de la manière suivante :

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

4.3.4 Le calage du modèle

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

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

Ceci permet de :

- Maintenir une certaine homogénéité des résultats entre les modèles déjà existants ;

- Préciser les résultats sur des zones plus restreintes et au droit d'habitations grâce au maillage en 2 dimensions affiné.

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

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

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

- PKA 26.6-27.2 (correspond au linéaire de l'endiguement « Bois Jolivet A ») : le modèle CNR donne un exhaussement de la ligne d'eau par rapport à la référence. Le coefficient de Strickler n'a pas été augmenté artificiellement pour abaisser la ligne d'eau car le calcul du modèle ISL n'est probablement pas très fiable sur ce court linéaire. En effet, les vitesses sont élevées et le pas de temps de ce modèle semble trop fort pour cette crue notable (T>50ans).
- PKA24.5-25.2 (vers le milieu 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^{1/3}/s (validé par SM3A au début des études)**
- **Calage Strickler sur l'Arve : 35 m^{1/3}/s (validé par SM3A lors de la réunion du 16/02/2022 et le rapport de CNR du 26/05/2021).**

4.4 Risque sismique

L'impact d'un séisme sur les ouvrages est étudié au titre des obligations de l'arrêté de 2008 [DA2].

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 St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne se situent en zone 4 (sismicité moyenne).

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

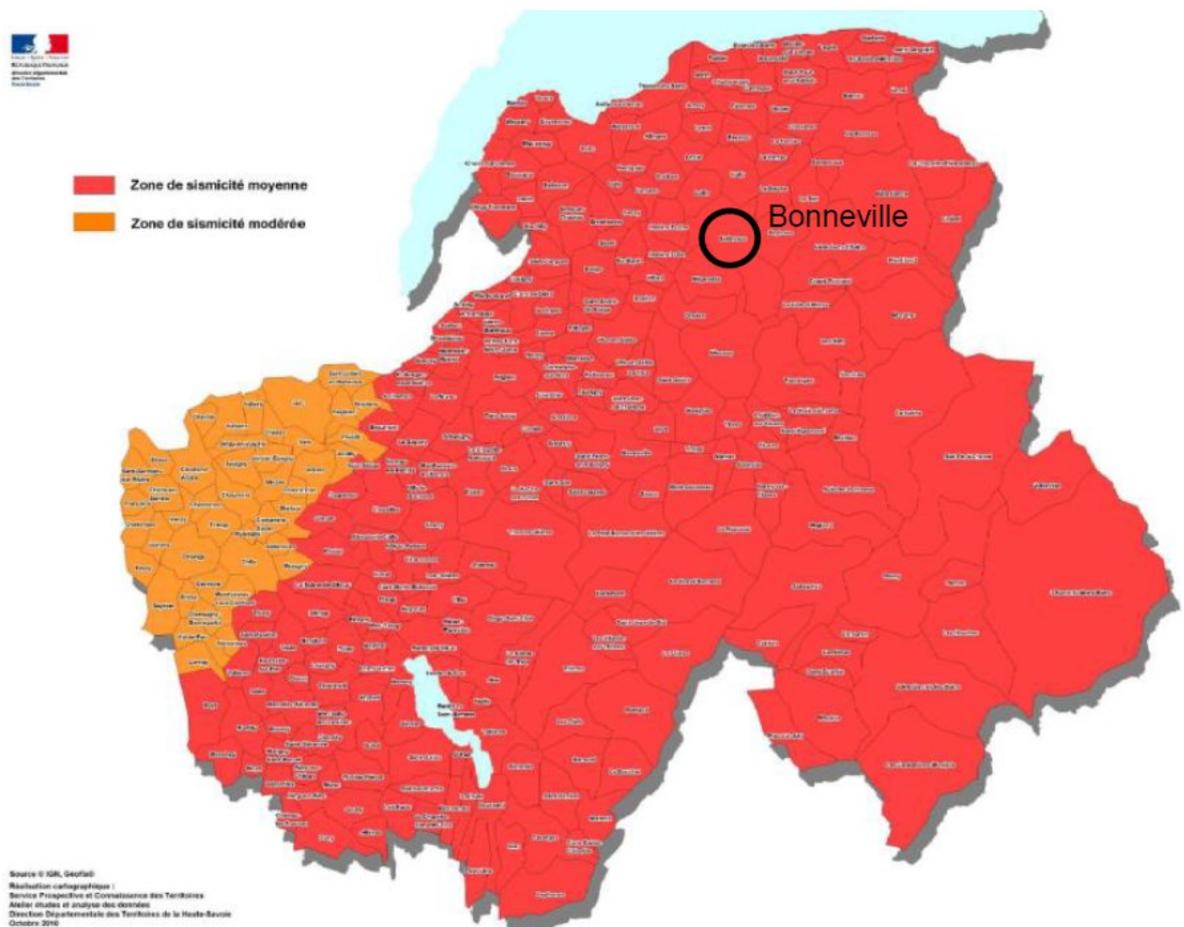


Figure 48 : Zone de sismicité de la Haute-Savoie – Source www.haute-savoie.gouv.fr

4.4.2 Evolution de la réglementation

Un projet d'arrêté ministériel fixe des prescriptions techniques auxquelles doivent satisfaire les barrages et les digues afin que leur sûreté soit assurée dans les cas de charge et d'exploitation prévisibles. Parmi les cas de charge et d'exploitation prévisibles, est abordé notamment le séisme. Ceci amènera le SM3A à compléter l'approche de la question sismique qui est faite dans ses études de dangers. Notamment, la concomitance des phénomènes crues et séismes sera analysée pour évaluer la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté.

4.5 Mouvements de terrain

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

Les bases de données du BRGM et de géorisque ont été consultées. Aucune zone présentant des risques d'instabilité (éboulement, affouillement ou glissement) n'a été identifiée sur les digues du secteur. Le risque vis-à-vis des effondrements ne nécessite donc pas d'étude complémentaire.

4.6 Les embâcles et leurs effets potentiels

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

Sur le Borne, 3 ouvrages type pont sont recensés. Il est à noter l'absence de piles centrales sur ces ponts.

Le tableau ci-dessous présente les hauteurs d'air libres sous ces ouvrages pour les crues Q100 et Q200.

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100 180 m3/s	Q200 195 m3/s	Tirant d'air Q100	Tirant d'air Q200
PB4	Pont D1203*	Borne	1.4	453.82	451.9	452	1.92	1.82
PB4	Pont D1203*	Borne	1.3	454.17	451.9	452	2.27	2.17
PB5	Pont de Toisinges	Borne	0.6	447.63	446.5	446.6	1.13	1.03

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

Tableau 21 : Ponts présents sur la zone d'étude

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

- 1.44 m sous le pont de la RD1203 (pont Royal) ;
- 1.03 m sous le pont de Toisinges pour le Borne.

Ces hauteurs sont largement suffisantes pour évacuer les potentiels sujets ligneux qui se retrouveraient dans les cours d'eau en crue. Le risque d'embâcle est donc improbable sur les ouvrages identifiés. La ligne d'eau Q300 est environ 10-15 cm au-dessus de la Q200 (le tirant d'air est également suffisant).

Il est à noter qu'un diagnostic de la végétation a été réalisé par la société Arbeausolution (Réf. [DA38]). 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.

4.7 Les évolutions morphologiques locales et apports solides

Le profil en long du Borne sur le secteur de Bonneville est globalement stable à l'heure actuelle. La construction du seuil du Pont du Diable devrait néanmoins créer une légère incision à l'aval, en amont du Seuil Métral, dans les années futures. 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. Nous rappelons que la revanche des digues en état de travaux achevés est de 1 m et comprend donc le risque d'engravement.

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 **St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne** est situé entièrement sur la commune de Bonneville dans le département de la Haute-Savoie (74), en rive gauche du Borne. Il a été classé sous l'identifiant : **ARVE-RG-STPIE-24.17**.

La localisation des digues actuelles du système d'endiguement **ARVE-RG-STPIE-24.17** est donnée par la figure suivante. Pour rappel, les digues en rive droite du Borne font l'objet d'une autre étude de dangers (système d'endiguement ARVE-RG-BONNE-26.24).

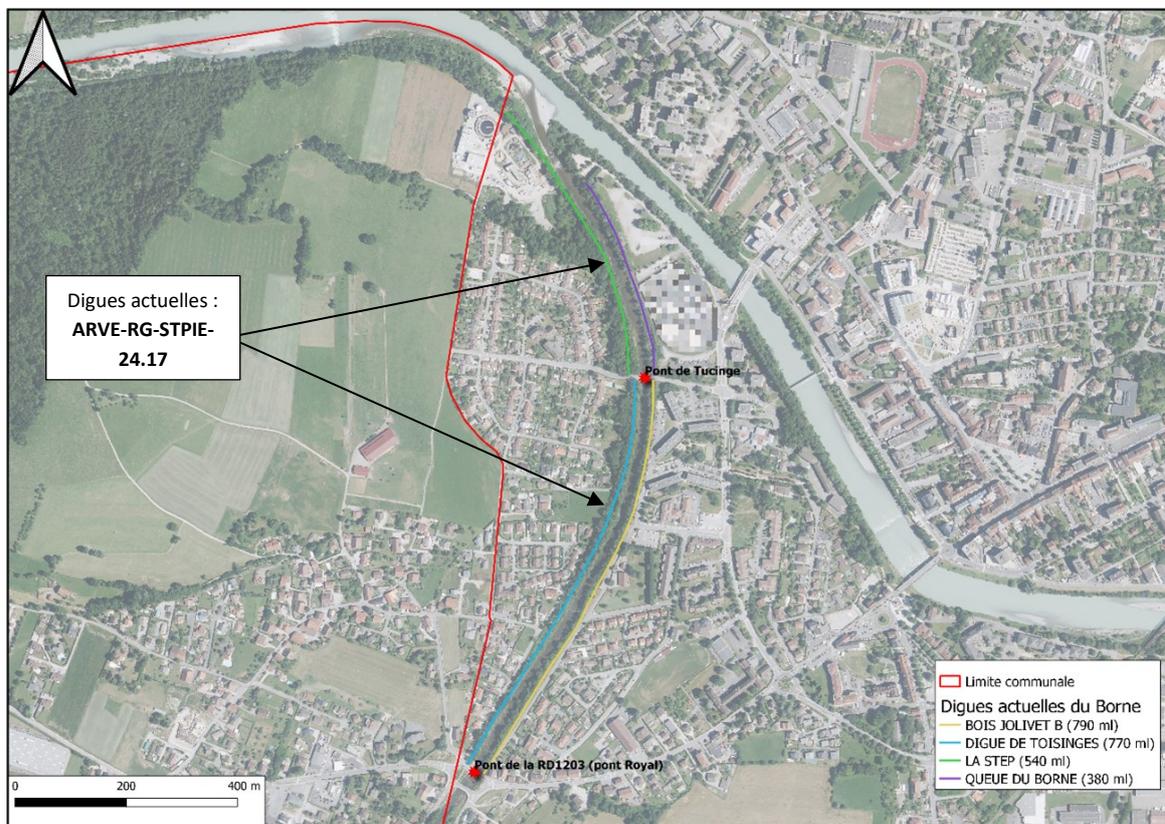


Figure 49 : Localisation précise des digues actuelles sur le Borne (deux digues en rive gauche pour le système étudié)

5.1.2 Description générale des digues actuelles

Ce paragraphe est en partie extrait du dossier d'ouvrage du système d'endiguement de St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne [DA10], de l'étude historique [DA37] et des visites réalisées sur les digues en 2017 et en 2020 [DA33].

5.1.2.1 Historique

Les digues du Borne constituent des digues dites « sèches » (ou de protection contre les inondations) dans la mesure où elles ne maintiennent pas une charge hydraulique permanente

entre la rivière et le côté terre (val). Elles assurent ce rôle de manière temporaire en période de crue lors des plus hautes eaux.

Le début de l'endiguement le long de l'Arve et du Borne est probablement très ancien, antérieur à la période Sarde. Les premiers programmes importants de travaux le long de l'Arve datent du 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 des digues (Borne et Arve), 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 TOISINGES

- Type de digue : Digue en remblais protégée par un perré « sarde »
- Dates de construction : 1819-1824 / 1875-1877
- Cours d'eau : Borne (rive gauche)
- Limite amont : pont RD1203
- Limite aval : pont de Toisinges
- La digue initiale (1819-1824) est telle que :
 - Talus avec perré incliné à 45° côté rivière (amont) ;
 - Enrochements enterrés, ou mur fortement incliné (pente 5/1), avec enrochements apparents (aval).
- La crue de 1865 dégrade très fortement la structure ce qui oblige quelques réajustements (1875-1877) :
 - réparation du perré ;
 - rehaussement du mur de la partie aval ;
 - le pied des digues est également rechargé en enrochements.

Aujourd'hui ces installations sont toujours visibles, comme le montrent les figures ci-après.

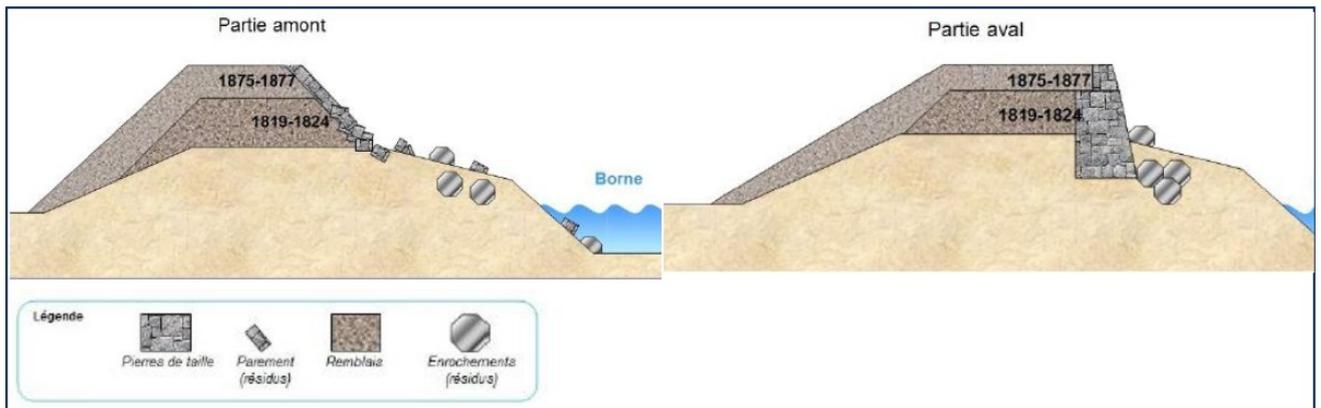


Figure 50 : Digue de Toisinges (Profils historiques - Acthys Diffusion)



Figure 51 : Digue de Toisinges (photos de la digue - CNR)

- Le linéaire total est de 770 m pour une hauteur maximum de 4,38 m et un fruit du talus à 3H/2V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est d'environ 3,50m. La largeur en crête est d'environ 2 m et autorise le passage piéton.
- Très boisée, que ce soit sur le talus amont ou aval. Les racines amènent à des phénomènes de conduits préférentiels, favorisant l'érosion interne de la digue.
- Présence probable de réseaux selon les campagnes de reconnaissance géophysique. Leur présence est confirmée notamment à l'aval du pont D1203, selon les plans de recollement des réseaux en exploitation. *A noter qu'en état projet, l'ensemble des réseaux a été dévoyé et sorti de l'emprise des futurs digues.*

5.1.2.3 Digue de la STEP

- Type de digue : digue en remblais, protégée par un perré « sarde » → prolongement du tronçon de TOISINGES.
- Dates de construction : 1819-1824 / 1875-1877 (idem Toisinges)
- Cours d'eau : Borne (rive gauche)

- Limite amont : pont de Toisinges
- Limite aval : confluence avec l'Arve - STEP
- La partie amont de la digue est identique à la partie aval de la digue de Toisinges. Progressivement, la pente du talus perreyé diminue. Cette transition est encore visible sur le terrain. En pied d'ouvrage, les enrochements sont partiellement ou totalement enfouis sous les sédiments. D'où la vision d'enrochements éparses au contact avec le niveau du cours d'eau.
- Le linéaire total est de 540 m pour une hauteur maximum de 1 m et un fruit du talus 8H/7V. La hauteur moyenne sur l'ensemble du linéaire est de 0,8 m. La largeur en crête est d'environ 2,5 m et autorise le passage piéton.
- Attention ! Très boisée, avec la présence de vieux arbres aux racines imposantes ayant déstructurée la digue.

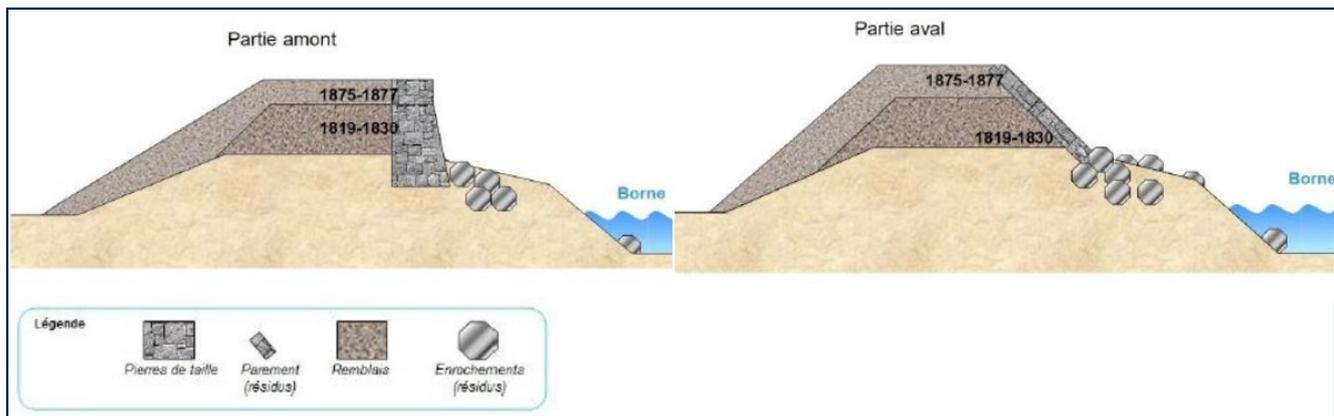


Figure 52 : Digue de de la STEP (Profils historiques - Acthys Diffusion)



Figure 53 : Digue de la STEP (photos de la digue - CNR)

5.1.3 Autres ouvrages

5.1.3.1 Ponts

Trois ouvrages franchissant le Borne sont recensés sur le linéaire d'endiguement, objet de l'étude de dangers (Tableau 22) :

Identifiant	Nom	Rivière	PK	Tablier Pont	Q100 180 m3/s	Q200 195 m3/s	Tirant d'air Q100	Tirant d'air Q200
PB4	Pont D1203*	Borne	1.4	453.82	451.9	452	1.92	1.82
PB4	Pont D1203*	Borne	1.3	454.17	451.9	452	2.27	2.17
PB5	Pont de Toisings	Borne	0.6	447.63	446.5	446.6	1.13	1.03

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

Tableau 22 : Ponts présents sur la zone d'étude

5.1.3.2 Seuils transversaux

Deux seuils sont recensés sur le Borne (Tableau 23). 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.

Identifiant	Nom	Rivière	PK
SB1	Seuil Métral (Figure 46)	Borne	4.1
SB2	Seuil amont confluence (Figure 47)	Borne	0.2

Tableau 23 : Liste des seuils dans le lit de l'Arve et du Borne sur la zone d'étude

Le seuil « amont confluence » est situé au droit de la digue de la STEP. Le seuil « Métral » est situé en sortie des gorges, bien en amont du système d'endiguement.



Figure 54 : Seuil Métral vue vers l'aval (à gauche) et seuil amont à la confluence vue vers l'aval (à droite) – photos CNR

Il est à noter le seuil en aval du pont de l'Europe (sur l'Arve) intégré à la modélisation hydraulique.



Figure 55 : Seuil aval au pont de l'Europe, vue vers l'amont - CNR

5.1.3.3 Les réseaux dans le système d'endiguement

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

Néanmoins, il est à noter la présence d'un réseau EU (DN500) ensouillé 2 m sous le fond Borne, au droit du seuil « amont confluence ». Ce réseau n'est pas en contact avec les digues et ne présente pas un risque structurel sur les ouvrages.

Les concessionnaires des réseaux à proximité du système d'endiguement ARVE-RG-STPIE-24.17 sont synthétisés ci-dessous :

Type de réseau	Concessionnaires Borne RG : Toisings et STEP
Lignes électriques et éclairage public hors très basse tension	ENEDIS-DRALP-HAUTE SAVOIE A.R.E. / REGIE GAZ ELECTRICITE BONNEVILLE
Communications électroniques et lignes électriques/éclairage TBT	Orange H5
Canalisations d'eau potable	Régie des Eaux de Bonneville
Canalisations d'eau usées ou d'assainissement	Régie des Eaux de Bonneville - EP / Régie des Eaux de Bonneville

Tableau 24 : Concessionnaires des réseaux sur le secteur d'étude

NB : En amont des travaux de confortement des digues du Borne, le SM3A a d'ores et déjà demandé aux différents concessionnaires de procéder au dévoiement de l'ensemble des réseaux

(secs) situés dans l'emprise du projet. Concernant le réseau EU (DN500), ce dernier sera dévoté dans le cadre des travaux de confortement des digues (voir le sous chapitre suivant).

5.1.3.4 Visite technique approfondie des digues et diagnostic des digues actuelles

Le rapport de la visite technique approfondie des digues de Toisinges et de la STEP, réalisé en 2020 (CNR, SAFEGE), est donnée en Annexe 5.

Un diagnostic de stabilité complet a été réalisé en 2018 sur les digues du linéaire d'étude (par CNR), à partir :

- d'investigations géophysiques et géotechniques ;
- d'un recensement des désordres (Visites Techniques Approfondies et diagnostic de végétation) ;
- d'une évaluation des risques de surverse, d'érosion externe, d'érosion interne et de glissement ;
- Ce diagnostic a été mis à jour dans le cadre de l'Avant Projet mené sur les digues du Borne avec :
 - Une actualisation du modèle hydraulique ;
 - Une actualisation du recensement des désordres (VTA 2020, voir Annexe 5),

Le tableau ci-après reprend les conclusions apportées par le diagnostic de 2018, à la maille des tronçons globaux, en considérant les nouvelles hypothèses hydrauliques. Le détail du diagnostic actualisé est présenté dans le rapport de G2-AVP (voir annexes).

Rive	Tronçon	Charge	Surverse	Erosion interne	Erosion externe Affouillement	Glissement	Risque
Droite	Bois Jolivet B	Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui	Talus rivière instable	4
	Queue du Borne	Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui	Talus rivière instable	4
Gauche	Toisinges	< Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui	Talus rivière instable	5
	STEP	< Q ₁₀	> Q ₁₀₀ + 1 m	Instable	Oui partie amont au PM145	Talus rivière et terre instables	5

Tableau 25 : Synthèse des conclusions du diagnostic mené sur les digues du Borne – CNR 2018, actualisé en 2020

Le tableau présente un niveau de risque associé à chaque digue 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.

De façon générale, l'ensemble des endiguements (rive droite et rive gauche) du secteur présente :

- Un risque de rupture par surverse nul à la crue de projet considérée,
- Un risque de rupture par brèche important, lié aux phénomènes d'érosion interne, d'érosion externe, et de glissement.

Par conséquent, l'ensemble des digues du Borne est à conforter sur l'ensemble du linéaire.

5.2 Description des ouvrages en phase avant-projet

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

5.2.1 Objectif de protection – digues du Borne

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 du Borne.

L'incertitude sur les niveaux en sortie du modèle hydraulique est estimée à 0.5 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 également estimé à 0.50 m.

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

Niveau de protection homogène sur l'ensemble du projet :

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

(*) Débit du Borne à la confluence = 178.4 m³/s

Le **niveau d'arase des ouvrages projetés**, appelé aussi niveau de submersion ou niveau de crue extrême, est le suivant : **Niveau de la ligne d'eau en crue de projet Q_{100} + 1 m***.

(*) Ou supérieur à ce niveau au niveau de l'élargissement aval (digue de la STEP)

5.2.2 Description du projet d'aménagement des digues du Borne

5.2.2.1 Rappels de l'AVP structurel (2018) – non retenu

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

Un Avant-Projet dit « structurel » a été conçu en intégrant les niveaux suivants :

- Niveau de protection : Q100 et crue de Dangers à Q200
- Niveau des crêtes de digues : ligne d'eau de la Q200 avec une revanche :
 - de 0.5 m en amont du pont de la RD1203,
 - de 1 m en aval de la RD1203.

Il comprend :

- La reconstruction intégrale des digues du secteur d'étude (RD et RG à l'aval du pont de la RD1203),
- Le confortement ponctuel des talus affouillés et des préconisations de gestion de la végétation en amont de la RD1203 (hors périmètre de la présente étude),
- Une protection de berge en rive gauche du seuil Métral (hors périmètre de la présente étude).

A l'aval de la RD1203, le projet portait sur un linéaire de 1200 m en rive droite, et de 1400 m en rive gauche.

Le profil-type préconisé était homogène sur l'ensemble du linéaire, et 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 Q100) : enrochements 300/1000 kg, épaisseur 1.30 m,
 - Partie supérieure (Q100 à la crête) : matelas Reno (ép. : 0.23 m),
 - Bèche de stabilisation en pied : 3 m de largeur au niveau du lit, 2 m de largeur en base de la bèche.

La figure suivante présente le profil type proposé lors de l'AVP structurel de 2018.

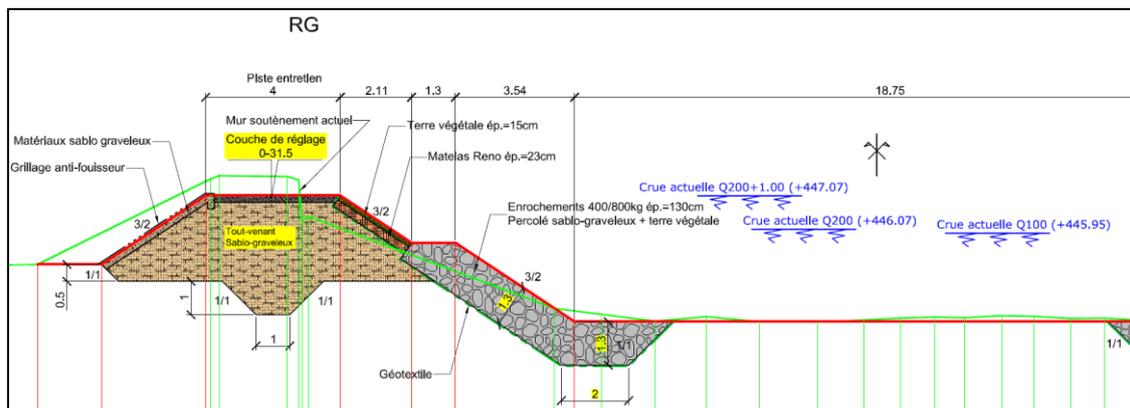


Figure 56 : Profil type de l'AVP structurel de 2018 (non retenu)

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 aspects environnementaux, paysagers et intégration des usages.

5.2.2.2 Avant-Projet optimisé (2021)

L'avant-projet optimisé est présent en Annexe 7.

5.2.2.2.1 Description générale du projet

Il est à noter que la conception technique du projet de restauration des ouvrages de protection s'est accompagnée d'un travail de consultation des usagers et riverains des secteurs de Bonneville concernés d'une part, et d'acteurs environnementaux d'autre part. Ce travail a été mené à l'échelle des projets du Borne et de l'Arve.

5.2.2.2.1.1 Sectorisation des digues en tronçons homogènes

Une sectorisation des linéaires de digues du secteur d'étude (digues rive gauche et digues rive droite) 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 associée a conduit à définir 7 tronçons en rive droite et **9 tronçons en rive gauche (les deux premiers tronçons ne font pas partie du SE « Saint Pierre en Faucigny entre Arve et Borne »)**.

La vue en plan de l'avant-projet « optimisé » avec indication des tronçons homogènes est donnée par la figure suivante :

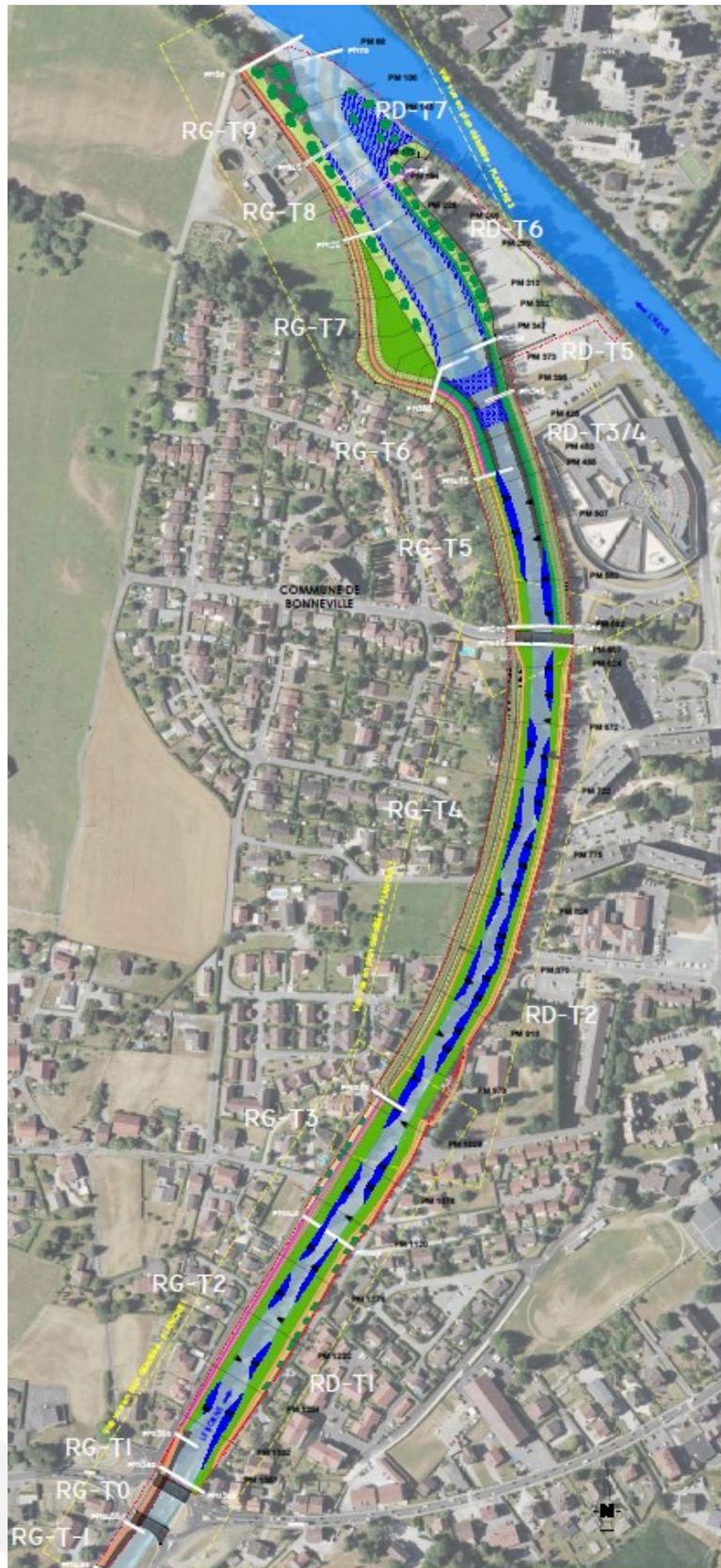


Figure 57 : Vue en plan des travaux de confortement des digues du Borne rive gauche et rive droite (avec indication des tronçons homogènes)

La répartition des typologies d'interventions par tronçon homogène est présentée sur le tableau suivant (digues rive gauche).

Tableau 26 : Sectorisation des digues en tronçons homogènes et type d'intervention retenu au droit de chaque secteur.

Digue	Tronçon homogène	PM Amont	PM Aval	Type d'intervention
Rive gauche				
-	(RG-T-1)	1480	1440	(Passage piste cyclable) – HORS SYSTEME D'ENDIGUEMENT
	(RG-T0)	1440	1380	
	(RG-T1)	1380	1350	
Toisinges	RG-T2	1350	1140	Confortement interne (palplanches)
	RG-T3	1140	1020	
	RG-T4	1020	605	Confortement par l'aval (épaulement)
Step	RG-T5	590	455	Reprise intégrale de la digue
	RG-T6	455	355	
	RG-T7	355	225	Reprise intégrale de la digue (avec recul)
	RG-T8	225	145	Reprise intégrale de la digue
	RG-T9	145	50	

5.2.2.2.1.2 Principe général de conception

Pour mémoire, tel que susmentionné, l'endiguement du Borne, très ancien, puis l'urbanisation du lit majeur (ancien cône de déjection) limitent très fortement toute possibilité d'élargissement de l'espace alluvial.

Une des seules emprises disponibles sur le secteur d'étude est représentée par la partie aval, avec en rive droite des possibilités d'élargissement en aval de la prison à la confluence avec l'Arve (tronçons RD-T6 et T7) et en rive gauche, en face, soit en amont immédiat de la STEP (tronçon RG-T7). Ces élargissements étendent le secteur de confluence dynamique avec l'Arve, en créant un contexte alluvial varié et évolutif dans le temps (alternance de bancs graveleux, de surfaces de végétation pionnière, de surfaces plus ou moins en eau, de granulométrie variée des fonds, etc.). La création de cet élargissement nécessite le déplacement vers l'amont du point de contrôle de la cote des fonds du lit du Borne, avec la création d'une double rampe franchissable en blocs d'encrochements et le déplacement de la canalisation des eaux usées qui lui est associée.

La réflexion s'est faite pour maintenir au maximum la végétation en place. Aucun secteur n'est totalement défriché dans le cadre de l'opération. Il est proposé la gestion de la végétation en place avec la suppression des espèces végétales exotiques à tendance invasive, l'abattage sélectif des sujets arborés menaçant de basculer en berge puis l'enlèvement de la végétation existante uniquement au droit des ouvrages construits (ancrages des protections de berge, ancres des épis, etc.). La lutte contre les espèces exotiques envahissantes se réalise principalement par la coupe des tiges aériennes des renouées asiatiques et buddleias, leur mise en bigs-bags avec évacuation puis le terrassement en déblais des substrats contaminés par les racines de ces espèces puis le broyage-concassage de ces matériaux.

Les interventions permettant de préserver tout ou partie de la végétation des berges sont les suivantes :

- **Confortement interne** : il s'agit de créer un voile imperméable à l'intérieur de la digue, afin d'assurer une coupure hydraulique supprimant tout risque d'érosion interne de l'ouvrage (lié à la végétation, aux caractéristiques du remblais en place, etc.). Si la digue dans laquelle le voile est disposé n'est pas stable (glissement ou érosion externe), le voile est rendu auto-stable ; il constitue alors à lui seul l'ouvrage de protection contre les inondations.
- **Confortement par l'aval** : il s'agit de créer un ouvrage au droit du talus aval de la digue actuelle, qui joue le rôle de digue. Le type d'ouvrage retenu (mur, remblais) dépend notamment de l'emprise disponible. Le nouvel ouvrage doit être stable en cas de glissement ou érosion de l'ancienne digue.
- **Création complète d'une nouvelle digue en retrait de la végétation existante** : lorsque les emprises le permettent, l'élargissement de l'espace alluvial peut être opéré en maintenant les franges de végétation actuelles puis en recréant une nouvelle digue complète auto-stable et étanche en retrait.

Afin de délester les pieds de berges d'une partie de leurs contraintes hydrauliques, une série d'épis est proposée, essentiellement en rive droite qui marque un léger extradors de courbure. Le calage de la cote supérieure des épis est établi quelques 50 cm au-dessus de la cote atteinte par les hautes eaux moyennes du mois de mai (fonte des neiges). On verra plus loin que les épis n'ont pas pour seule fonction de participer à la stabilisation des pieds de berge mais jouent également un rôle prépondérant dans la restauration hydro-écologique du lit vif du Borne. Ils sont également le support ou le "squelette" au maintien et au développement de risbermes graveleuses au pied des berges ; élément essentiel à la fonction de corridor écologique du cours d'eau.

Lorsque des protections de berge sont néanmoins nécessaires (par exemple sur les tronçons RD-T3/T4 au droit du secteur de la prison, soit en remplacement d'anciens enrochements/remblais), des techniques mixtes sont proposées, combinant une base sous-fluviale et de pied de berge en enrochement et une partie supérieure issue du génie biologique, illustrée par la technique des lits de plants et plançons (la limite d'implantation de la végétation au-dessus des enrochements est calée quelques 20 cm au-dessus de la cote atteinte par les hautes eaux moyennes du mois de mai).

5.2.2.2.2 Description par secteur

NB : sur les coupes techniques, le niveau de la crue centennale est représenté en rouge et le niveau de la crue centennale + 1 m de revanche est représenté en rose.

5.2.2.2.2.1 Digue rive gauche – RG-T2 et RG-T3

Linéaire d'application : 325 m

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

Un confortement interne de l'ouvrage est préconisé et se traduit par la mise en œuvre d'un rideau de palplanche auto-stable. 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 présente sur le talus amont.

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. Au

stade AVP, aucun essai pressiométrique n'a été effectué et une longueur moyenne de fiche de 12 m est considérée. Ce dimensionnement sera à affiner/optimiser au stade Projet.

La crête de digue actuelle, d'altimétrie supérieure à la cote $Q_{100} +$ revanche, est arasée jusqu'à cette dernière. La largeur en crête de la digue restituée est supérieure ou égale à 3 m.

Le talus côté val et les banquettes de part et d'autre du futur cheminement sont ensemencés avec un mélange grainier indigène adapté.

Côté amont, 5-6 épis seront disposés en pied afin de réduire le risque d'érosion externe du talus en place, associé à une diversification des habitats du lit mineur.

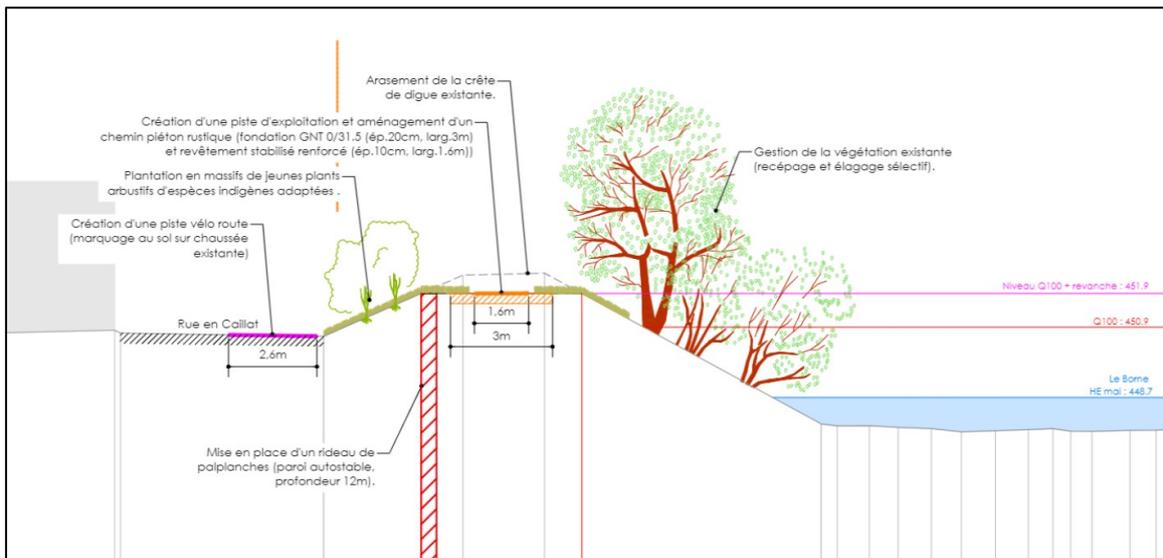


Figure 58 : Profil type RG-T2 et RG-T3 – PM1232 – vue géotechnique et hydro-écologiques

Réflexion paysage

La digue rabaissée permettra d'aménager un chemin intégré dans un espace de prairie, bordée par la ripisylve existante du Borne et une strate arbustive basse implantée au pied de digue côté val. La véloroute (projet département) longera le Borne sous le pont Royal pour ensuite remonter sur la crête de digue et redescendre aussitôt sur la rue en Caillat (voie sans issue, déserte sept logements). Une bande cyclable pourra être peinte au sol afin de signaler la présence de la voie cyclable.

Dans le but de limiter les conflits d'usages, liés à la vitesse importante des cyclistes sur une voie rectiligne, il est préférable de séparer les flux piétons/cycles et assurer un parcours de qualité pour chaque usager. En aval, la véloroute profitera d'un chemin dédié en contrebas du sentier piéton.

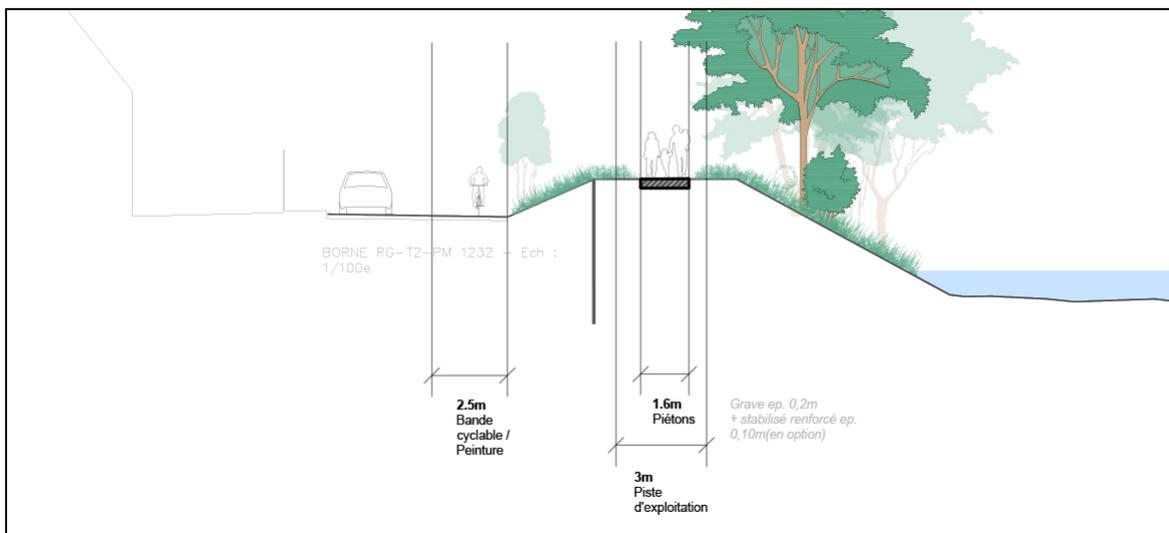


Figure 59 : Profil type RG-T2 et RG-T3 en aval du pont Royal – vue paysagère

5.2.2.2.2 Digue rive gauche – RG-T4 et RG-T5

Linéaire d'application : 550 m

Type d'intervention : confortement par l'aval (épaulement)

Ces deux tronçons se situent de part et d'autre du pont de Toisings. Ils se caractérisent par la présence d'un franc bord assez large côté amont, et une emprise foncière disponible plus importante côté val. L'objectif est de tirer parti de cet espace côté val pour réaliser un confortement via un épaulement du talus aval, tout en maintenant la digue actuelle, dont l'altimétrie est supérieure au niveau de Q_{100} + revanche, afin de conserver la végétation présente sur la crête et le talus amont. La conservation de la digue actuelle servira également de protection contre l'érosion externe.

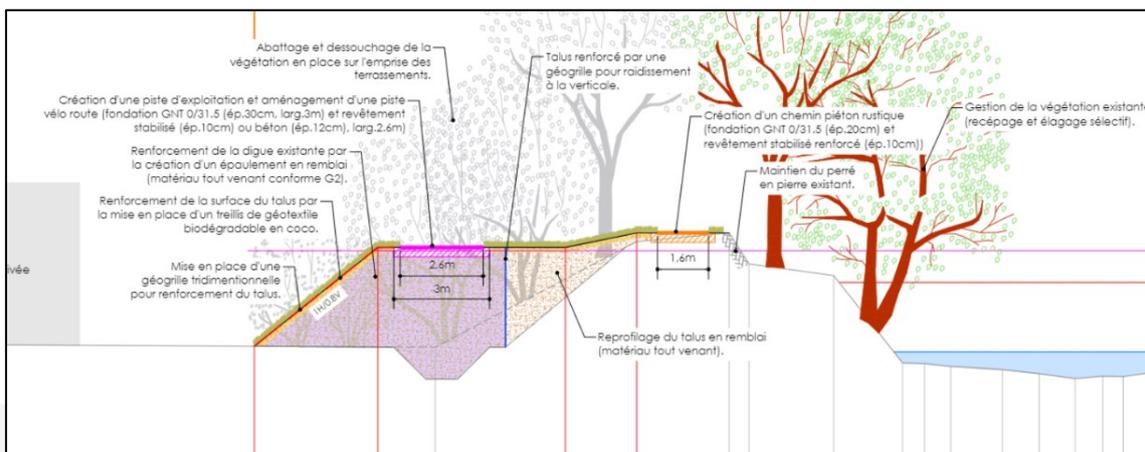


Figure 60 : Profil type RG-T4 et RG-T5 – PM775 – vue géotechnique et hydro-écologiques

L'épaulement, dont l'arase supérieure est positionnée à la cote projetée de Q_{100} + 1 m de revanche constituera l'ouvrage de protection contre les inondations. Il est constitué d'un remblai homogène avec un fuseau granulométrique adapté.

Les caractéristiques géométriques de l'épaulement sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m,
- Hauteur : 1.8 à 3.3 m,
- Pente du talus amont : sub-verticale, maintenue par des géogrilles (technique de remblai armé),
- Pente du talus aval : 2.5H/1V à 1.2H/1V maintenu par la mise en place de géotextiles tissés biodégradables en coco et un ensemencement indigène adapté, afin de respecter les emprises foncières disponibles si pente douce. Sur les talus inférieurs à 2.5H/1V, des géogrilles sont proposées sur le principe de terre armée. Ces matériaux demandent un soin particulier pour l'entretien.

La crête de l'épaulement accueillera la piste cyclable au droit du RG-T4 (amont du pont de Toisinges). Un cheminement piéton est maintenu en crête de la digue actuelle.

Côté amont, une dizaine d'épis seront disposés en pied afin de réduire le risque d'érosion externe du talus en place, associé à une diversification des habitats du lit mineur.

Réflexion paysage

Sur ce tronçon, la digue actuelle sera renforcée par un épaulement à l'arrière. Le sentier en crête de digue sera conservé et amélioré le long du perré maçonné. La véloroute sera aménagée sur l'épaulement, sans chevaucher la géogrille, qui sépare la digue actuelle du nouvel ouvrage. Le revêtement conseillé pour la véloroute est un béton désactivé qui pourra être réévalué par le département, maîtrise d'ouvrage responsable des voies vertes.

Néanmoins, cette situation projetée comporte des dysfonctionnements paysagers :

- Le talus côté val, pour rester dans l'emprise foncière doit être très raide (pente proche de 1/1)
- Le talus ne pourra pas être végétalisé et devra être maintenu par une géogrille, qui dans le temps risque d'être visible
- À proximité de la véloroute, la forte pente du talus présente des risques de chute importants. La réglementation impose un garde-corps dans le cas où la voie cyclable se situe à moins de 1 m de la crête du talus en forte pente, mais même éloigné la chute reste possible
- Depuis les fonds de parcelle, la vue sur le talus sera peu qualitative

Une pente à 2/1 (en rouge sur les illustrations suivantes) présenterait un avantage paysager, sans toutefois réduire les impacts visuels. Aucune végétalisation arbustive du talus ne sera possible sur l'ouvrage. Cette pente minimale de 2/1 nécessitera par endroit d'acquiescer du foncier et de décaler les clôtures. Un accès d'entretien doit également être maintenu entre le pied de l'ouvrage et la limite foncière.

L'ambiance paysagère de ce tronçon étant très qualitative aujourd'hui, sentier en sous-bois dense, il sera probablement nécessaire de communiquer auprès de la population afin de montrer et d'anticiper les transformations. Après travaux, le chemin traversera davantage une zone de clairière avec par endroits des fenêtres ouvertes sur le Borne.

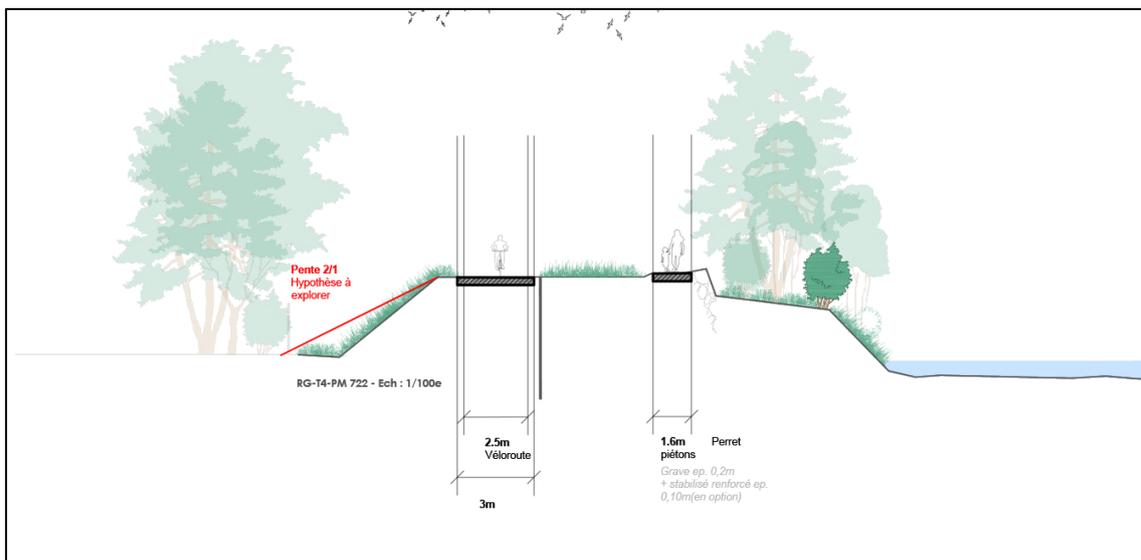


Figure 61 : Profil 722 RG-T4 en amont du pont de Tucinge (Avenue Ravel) – vue Paysagère

Sur ce tronçon et sur le secteur où le cordon boisé est le moins large, il sera possible d'intégrer une structure légère, type belvédère, en bois, en métal, pour une plus grande durabilité ou avec les deux types de matériaux (structure métallique et bardage bois). Ce belvédère offrira une vue plongeante sur le cours d'eau depuis le houppier des arbres de la ripisylve. De 2 m de large, il sera visuellement et écologiquement peu impactant, car suffisamment haut pour assurer les continuités écologiques et être dissimulé dans le feuillage des arbres.

Ce type de structure pourra être ajoutée après travaux par la commune de Bonneville.



Figure 62 : Profil 870 RG-T4 en amont du pont de Tucinge (Avenue Ravel)

À l'aval du pont de Tucinge, le chemin piéton se poursuivra en crête de digue actuelle, le long du perré historique. La véloroute s'interrompt ici pour rejoindre le centre-ville de Bonneville en empruntant l'Avenue Ravel. Néanmoins, il semble intéressant de maintenir un chemin rustique accessible pour les cycles type VTC/MTT, avec cette fois un revêtement poreux. Sur l'épaulement le passage tout terrain sera donc toujours possible, mais la strate herbacée recouvrira progressivement la crête. Un entretien par fauche devra être réalisé, 2 à 3 fois par an afin de garantir le maintien d'un passage cycle et surveillance des ouvrages.

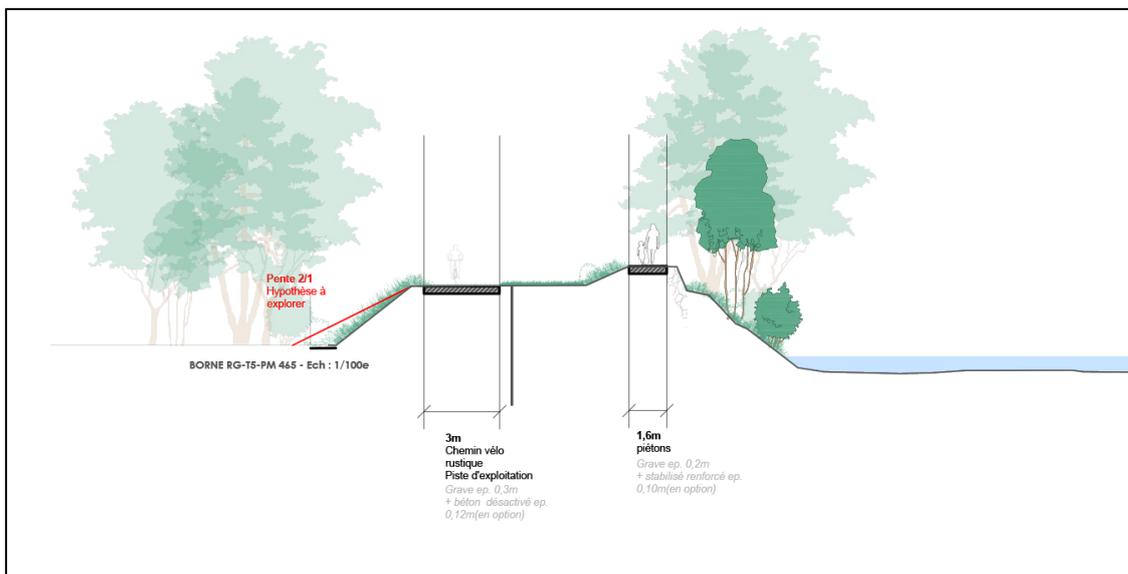


Figure 63 : Profil 465 RG-T5 en aval du pont de Tucinge (Avenue Ravel)

5.2.2.2.3 Digue rive gauche – RG-T6

Linéaire d'application : 100 m

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue

Ce tronçon, plus contraint foncièrement est situé au droit des rampes en enrochements prescrites dans le lit mineur. Il s'agit ici d'une reprise intégrale de l'ouvrage. La hauteur en charge est très importante sur ce secteur, le TN aval ayant une altimétrie très légèrement supérieure à celle du niveau des eaux moyennes du mois de mai + 20 cm, niveau retenu comme limite de la protection en enrochement. La double rampe sera détaillée plus loin mais au droit de cet ouvrage, les berges seront également aménagées avec des techniques mixtes, alliant enrochements et lits de plants et plançons, calés ici quelques 60 cm au-dessus de la cote atteinte par le niveau de débit moyen du mois de mai et mis en place sur deux niveaux.

Afin de pouvoir assurer malgré tout une végétalisation sur ce secteur, la mise en œuvre d'un rideau de palplanche à l'intérieur du corps de digue est prescrite. Son but est de créer une barrière physique vis-à-vis des systèmes racinaires des ligneux et de créer une coupure hydraulique aux écoulements à l'intérieur du corps de digue (traitement des problématiques d'érosion interne générées par la végétation).

Le remblai de la digue étant stable par lui-même, les palplanches n'ont pas de rôle de soutènement, ce qui permet de limiter la profondeur de fiche comparativement au rideau mis en œuvre au droit des tronçons RG-T2 et RG-T3. A ce stade la hauteur de palplanche considérée est de 3.5 à 3.75 m (hauteur en charge par rapport à Q100 + 1 m).

Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m
- Pentes de talus :
 - Talus aval
 - Pente >2.5H/1V ; renforcée par des géogrilles
 - Talus amont :
 - Pente : 2.5H/1V
 - Enrochement 300/1000 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de mai surélevé de 20 cm,

- Bèche de stabilisation :
 - Epaisseur : 1.3 m,
 - Largeur en partie inférieure : 2 m,
 - Largeur en partie supérieure : 3 m,
 - Arase supérieure : 20 cm au-dessus du niveau des eaux moyennes du mois de mai.

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

La partie digue (au-delà de la cote du TN aval) est végétalisée par un ensemencement herbacé. Une piste d'exploitation est réalisée en crête de l'ouvrage.

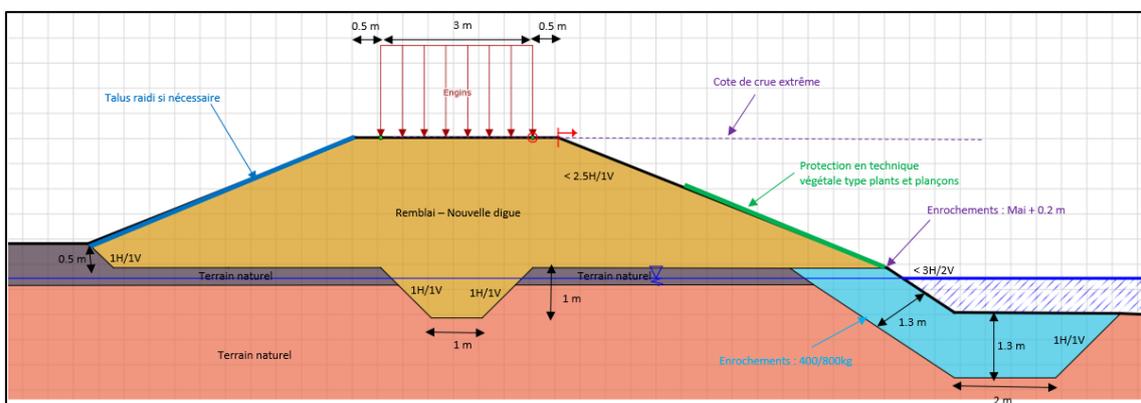


Figure 64 : Profil géotechnique RG-T6

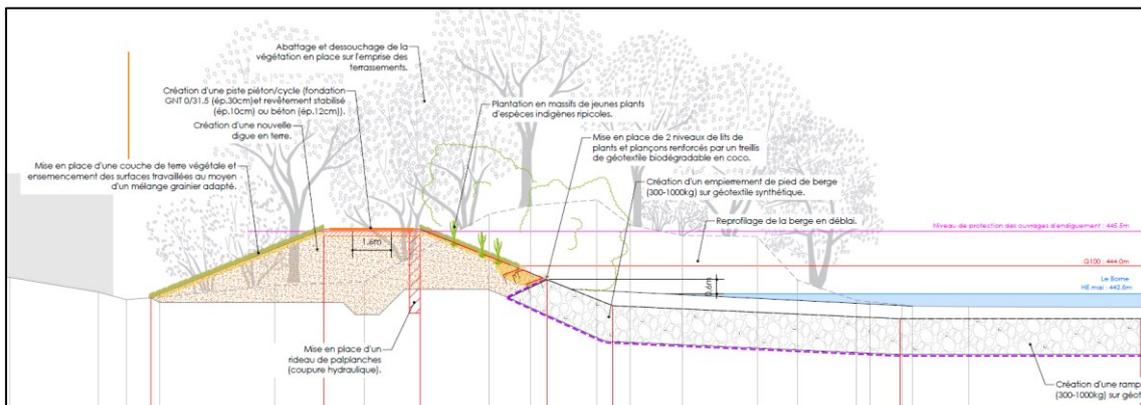


Figure 65 : Profil type RG-T6 – PM373

5.2.2.2.4 Digue rive gauche – RG-T7

Linéaire d'application : 145 m

Type d'intervention : reprise intégrale et recul de la digue

L'espace foncier disponible et les potentialités de restauration écologique permettent, au droit de ce secteur, d'arasement totalement la digue actuelle et de reconstruire une nouvelle digue dans la plaine pour élargir l'espace de liberté du Borne à proximité de la confluence et ainsi maintenir le

cordons ripicoles existants, la nouvelle digue étant réalisée en retrait. Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m
- Pente des talus : 2.5H/1V

Le profil de cette nouvelle digue est marqué par une hauteur de mise en charge très importante. L'altimétrie du TN, quasi équivalente de part et d'autre, proscrit toute technique de protection des talus par génie écologique. Compte-tenu des faibles vitesses liées à l'éloignement avec la section d'écoulement, une protection en enrochement n'est pas nécessaire au pied de cet ouvrage, c'est le cordon végétal existant qui servira de protection au pied de digue, sachant que compte tenu de l'élargissement notoire, les contraintes hydrauliques seront nécessairement diminuées. Les talus et crêtes de digue hors emprise du chemin piéton sont entièrement végétalisés avec un ensemencement indigène adapté.

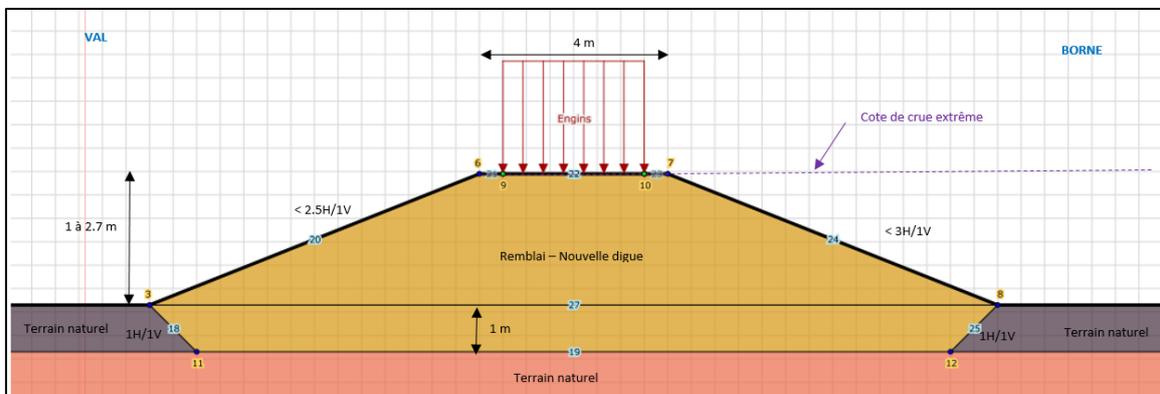


Figure 66 : Profil géotechnique type RG-T7

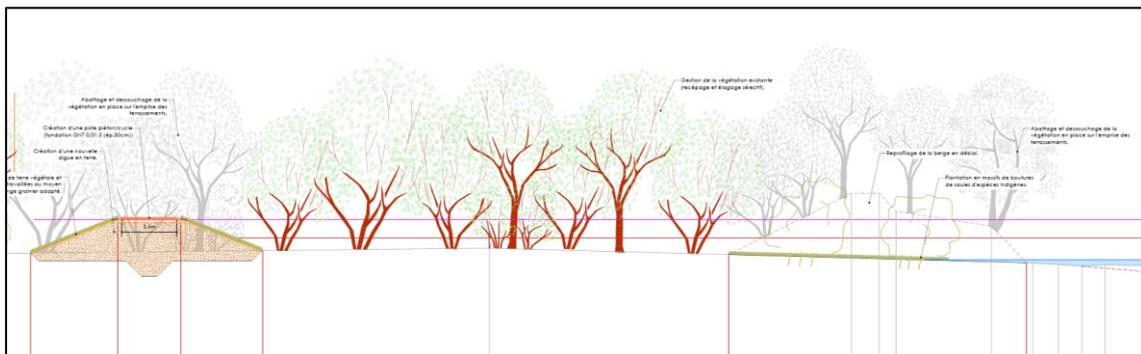


Figure 67 : Illustration de l'élargissement au niveau de RG-T7 – PM313

Réflexion paysage

En amont de la STEP, l'espace alluvial du Borne sera élargi, intégrant la végétation existante. La nouvelle digue construite en retrait accueillera un chemin rustique partagé piéton/cycle. Ce chemin en périphérie d'espaces urbanisés est une amorce du chemin qui se poursuit en aval, le long de l'Arve, dans la forêt communale de Bonneville et jusqu'à la passerelle piétonne de l'Arve. C'est une boucle de randonnée de proximité identifiée par les riverains qui devra être maintenue. On peut donc considérer que le départ de ce chemin se trouve au niveau du pont de Tucinge.

Un second belvédère de 11 m de long pourra être placé juste en aval des seuils, à la suite des protections de berges liées au seuil aval. La large vue sur l'espace alluvial régulièrement inondé pourra être très qualitative. On pourra y observer la ripisylve, la roselière, le Borne en aval des remous des seuils et en arrière-plan la confluence avec l'Arve surplombée par les falaises du Dard.

Cette structure est suggérée, mais devra être aménagée par la commune de Bonneville.



Figure 68 : Profil 343 RG-T7 – vue paysagère

5.2.2.2.5 Digue rive gauche – RG-T8 et T9

Linéaire d'application : 175 m,

Type d'intervention : reprise intégrale de la digue.

Ces secteurs, situés au droit de la station d'épuration de Bonneville, sont caractérisés par une faible mise en charge. Par ailleurs, les travaux de réaménagement de la STEP libèrent une emprise en pied de l'ouvrage côté val, permettant de réaliser un recul de la digue et un adoucissement du talus amont avec emploi de techniques de génie écologique sur ce dernier.

Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :

- Largeur en crête : 4 m,
- Pente du talus amont : $<2.5H/1V$,
- Pente du talus aval : $2.5H/1V$.

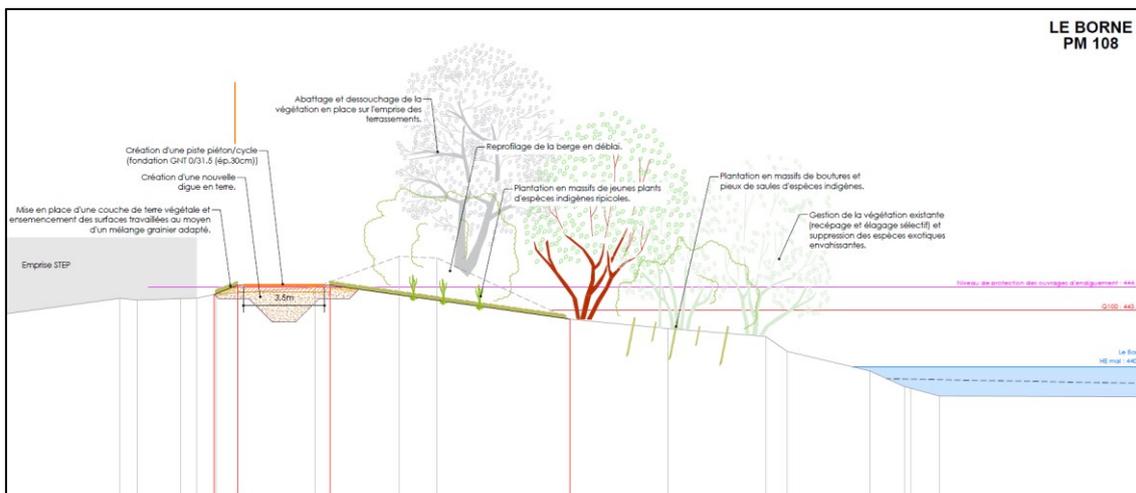


Figure 69 : Profil type RG-T8 et RG-T9 – PM108 – vue géotechnique et hydro-écologiques

Dans la mesure du possible, la végétation ligneuse présente en pied de digue est maintenue. Ce secteur comporte néanmoins des massifs d'espèces exotiques invasives représentées essentiellement par des massifs de buddleias qui seront entièrement supprimés, les substrats contaminés évacués puis criblés-concassés.

La végétation du bas de berge devra être relativement dense afin de stabiliser le pied de digue face aux crues de l'Arve qui pourront venir frapper frontalement ce talus. Cette végétalisation s'opérera par la mise en place de massifs de grosses boutures et pieux vivants de salicacées en partie basse puis de plantations ripicoles en partie supérieure, alors que l'ensemble des surfaces travaillées sera ensemencé d'un mélange grainier indigène et adapté.

Le chemin rustique sera maintenu en crête de digue afin d'assurer une continuité entre l'amont et l'aval.

5.2.2.2.6 Déplacement du seuil de la confluence et dévoiement du réseau d'eaux usées

Tel que susmentionné, l'élargissement proposé du lit du Borne avant sa confluence avec l'Arve nécessite le déplacement du seuil actuel présent au droit de la Step. Il est prévu de le déporter vers l'amont, juste avant l'élargissement, ce qui permettra au Borne de dissiper son énergie au droit de la surlargeur créée. Il est à noter qu'un ouvrage de stabilisation du fond du lit du Borne reste indispensable afin d'éviter toute érosion régressive du fond du lit remettant en cause la tenue des digues à l'amont.

Cet ouvrage est proposé sous la forme d'une double rampe en enrochements rangés, d'une épaisseur supérieure ou égale à 1.5 mètre. Les deux rampes mesureraient 15 mètres de long chacune, avec une pente de 3 %, soit un dénivelé total amont-aval de 0.9-1.0 mètre. Entre les deux rampes, une sur profondeur protégée par un lit d'enrochements sera réalisée sur un linéaire de 15 mètres en tant que point de dissipation intermédiaire et zone de repos pour les espèces piscicoles. Les deux rampes seront légèrement cintrées au centre pour concentrer les écoulements d'étiage du Borne. Les blocs seront mis en place un par un et selon une certaine

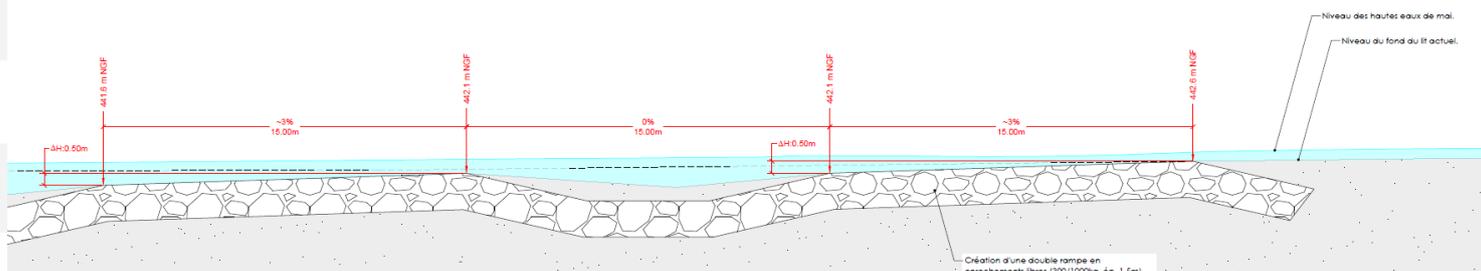


Figure 70 : Profil en long de la double rampe proposée en stabilisation du lit du Borne

hétérogénéité afin d'éviter le lissage des écoulements et faciliter le transit piscicole pour tous types d'espèces et tailles d'individus.

La cote supérieure de cet ouvrage sera calée sur la cote actuelle du fond du lit du Borne, afin d'éviter toute modification du lit du Borne à l'amont. A l'aval, le lit pourra évoluer librement pour se caler sur le profil en long de l'Arve. Des chenaux pourront se créer, en alternance avec des îlots et bandes graveleuses (espace alluvial restauré).

Le réseau EU DN500, qui alimente la STEP, sera dévié sous cette double rampe.



Figure 19 : Illustration d'un seuil infranchissable sur le Sierroz à Aix-Les-Bains, puis de sa démolition et la constitution d'une rampe de stabilisation du profil en long ; conception, photos et maîtrise d'œuvre Biotec

5.2.2.2.7 Pistes d'exploitations

La réalisation d'une piste d'exploitation en crête de digue est intégrée au droit des tronçon suivants :

- RG-T2 et RG-T3,
- RG-T4 et RG-T5 (crête de l'épaulement),
- RG-T6 à RG-T9.

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. A l'exception d'une partie du tronçon RG-T2, où la largeur en crête est réduite à 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 $Q_{100} + 1$ m de 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 d'arase usuelle de $Q_{100} +$ revanche (cf. figure ci-après).

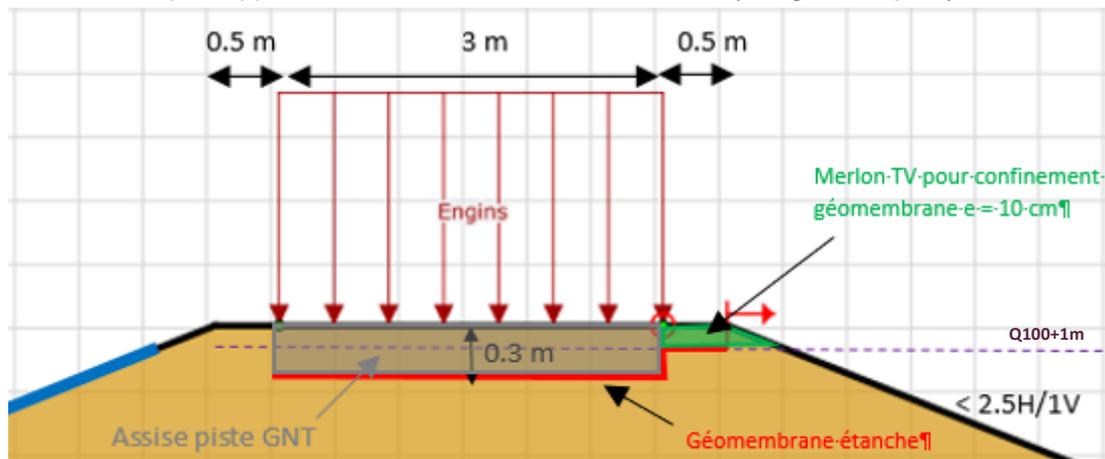


Figure 71 : Etanchéité au droit des pistes d'exploitation.

Sur l'aval du tronçon T5, la piste d'exploitation sera également utilisée pour les cycles de type VTC/VTM afin d'assurer une continuité des circulations "rustiques" vers l'aval de Bonneville. Ici le chemin piéton est maintenu le long du perré.

Sur les tronçons T6 et T7, le chemin rustique sur la piste d'exploitation est partagé entre tous les usagers, il présente une largeur suffisante pour limiter les conflits d'usages.

5.2.2.2.8 Synthèse des continuités piétonnes et cycles

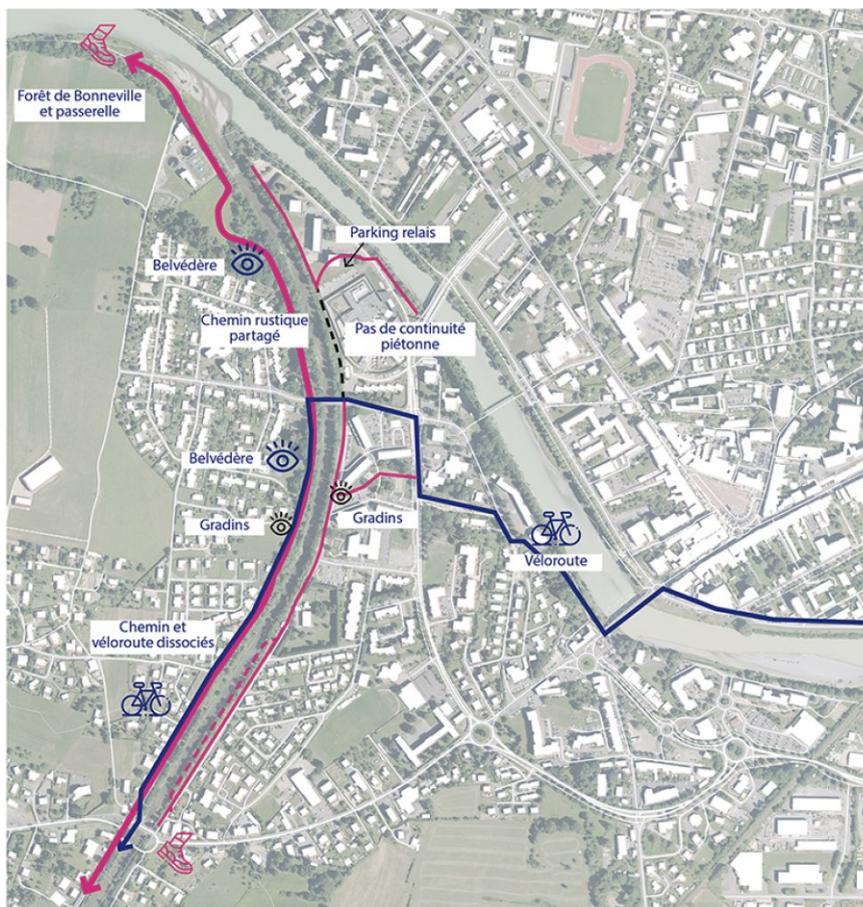


Figure 72 : Carte de synthèse des cheminements piétons et cycles aux abords du Borne

Seule la véloroute sur l'épaulement sur le tronçon T5 sera éclairée grâce à l'installation de bornes lumineuses basses.

5.2.2.2.9 Passage de la piste cyclable sous le pont de la RD1203 – RG-T-1 à RG-T1

Ces trois tronçons (secteur de berge) ne font pas partie du système d'endiguement.

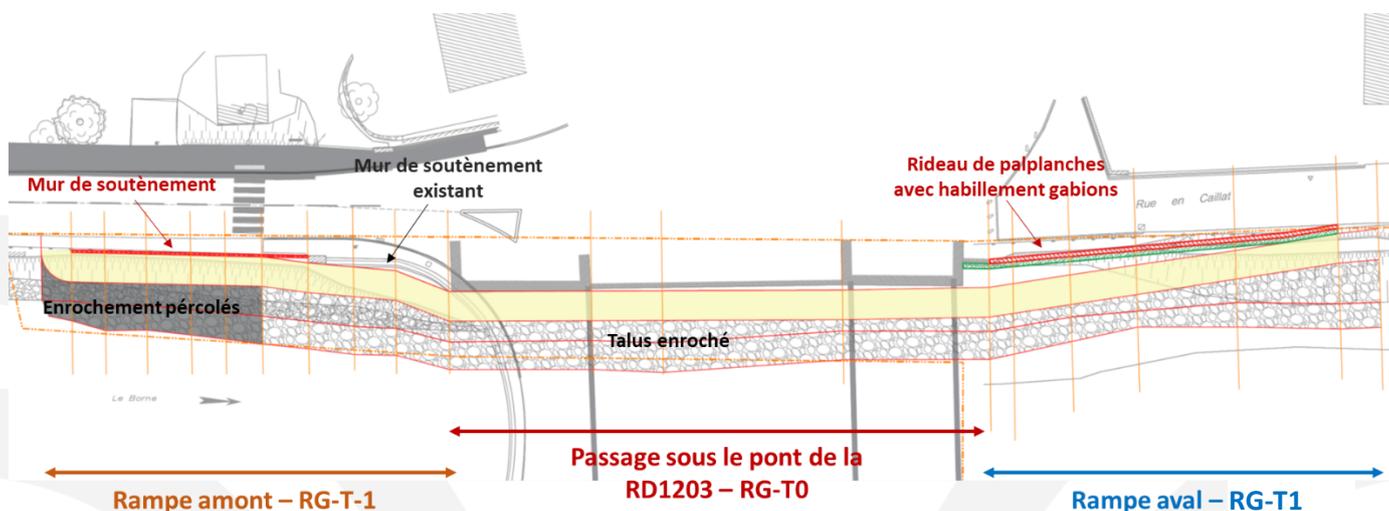


Figure 73 : Travaux sous le pont de la RD1203 (hors système d'endiguement)

5.2.2.2.3 Voies d'accès aux digues

Comme vu en description des tronçons homogènes, 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 du système d'endiguement de « Saint Pierre en Faucigny entre Arve te Borne » sont représentées avec la couleur orange sur la figure ci-après :

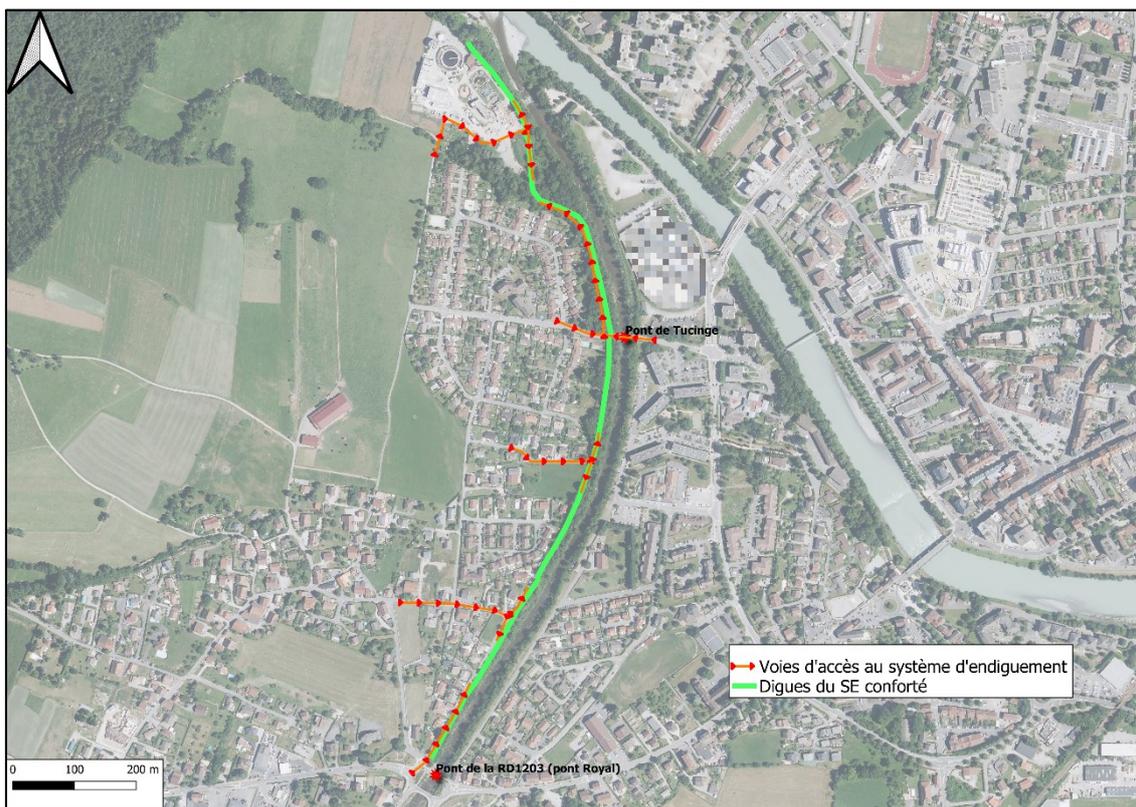


Figure 74 : Voies d'accès au système d'endiguement

5.2.2.2.4 Analyse fonctionnelle hydraulique des ouvrages confortés/construits

Le profil en long ci-après présente le calage des digues projetées. La revanche de 100 cm est assurée sur tout le linéaire endigué en rive gauche du Borne.

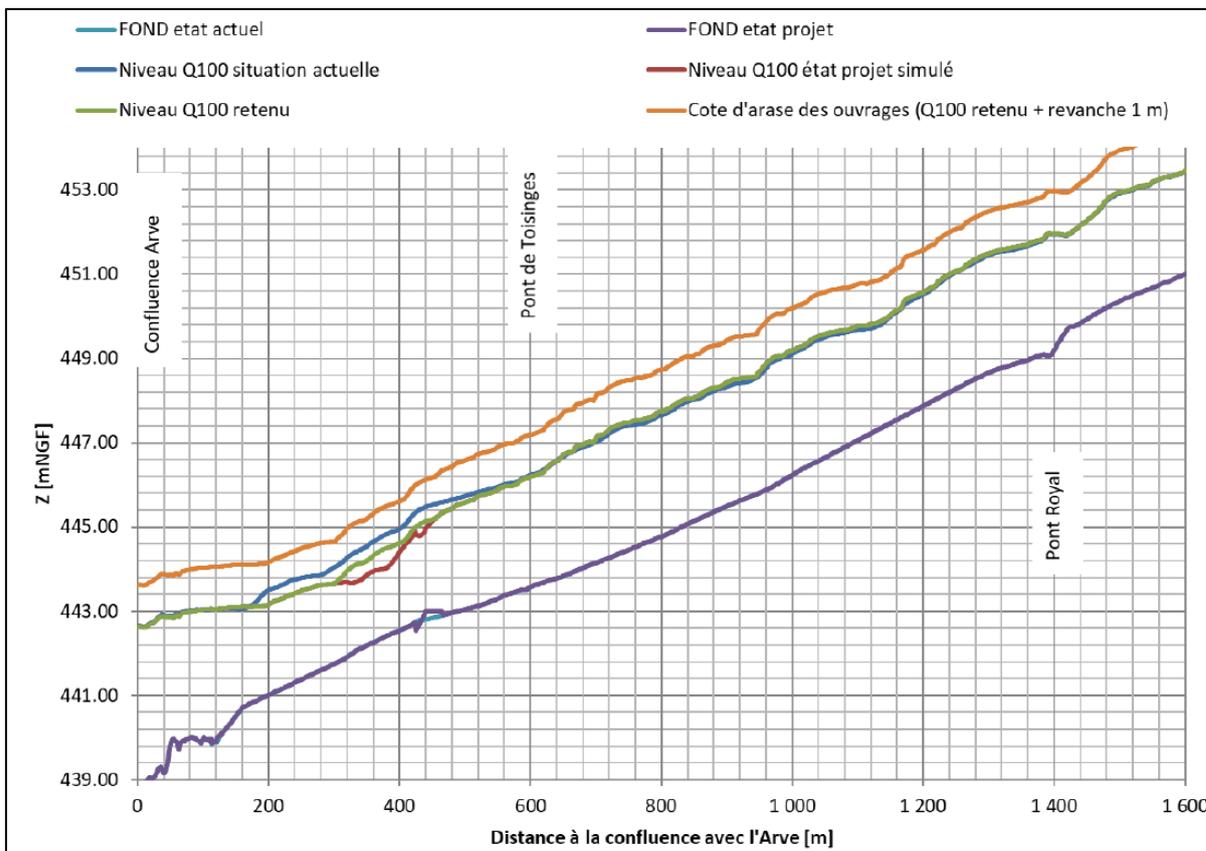


Figure 75 : Profil en long du Borne (Source : CNR) – calage des digues projetées

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

5.2.3 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 n'est pas à écarter. 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 50m à 100m. 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.
- Un suivi scrupuleux des débits du Borne et de l'Arve sera mis en place pendant toute la période du chantier :
 - Réalisation d'une convention avec météo France ;
 - Suivi des stations hydrométriques présentes en amont des travaux sur le Borne (et sur l'Arve) ;
 - Le SM3A utilisera également son système de prévision des débits et le communiquera à l'entreprise des travaux.

- En cas d'alerte crue, un repli de chantier sera réalisé. Les secteurs en cours de travaux seront surveillés et des digues provisoires seront mises en place si nécessaire ;
- Un système d'astreinte sera demandé aux entreprises dans le cahier des charges avec une mise à disposition sur le chantier de matériaux, personnel d'astreinte et moyens matériels de remblaiement d'urgence ;
- 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 limnimétriques 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 limnimétriques 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.

Il est à noter que cette liste est non exhaustive. D'autres mesures seront demandées aux entreprises pour assurer la sécurité du chantier et des riverains pendant toute la période du chantier (PA, PC, PAQ, procédures d'exécution, faire appel à un CSPS ...). Le cahier des charges « travaux » pourra être communiqué au service de la DREAL ultérieurement si besoin.

5.3 Description des sources d'agression

5.3.1 Sources d'agression anthropiques

Ce chapitre a pour objectif de lister les agresseurs potentiels pouvant impacter la digue. 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.

5.3.2 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.

Description fonctionnelle du système d'endiguement

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

Le modèle mathématique utilisé pour l'étude hydraulique est décrit au chapitre 4.3. 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. Le fond du modèle hydraulique état projeté intègre, par rapport au modèle état actuel :

- Le passage de la Véloroute sous le pont de la RD1203 (RG-T-1, à RG-T1) ;
- La mise en œuvre des 41 épis dans le lit du Borne, du pont de la RD1203 au PM480 ;
- La géométrie des nouvelles digues et l'élargissement du lit du Borne à partir du RD-T3/T4 en rive droite, et du RG-T6 en rive gauche.

Les évolutions du profil en long au long terme du fait du déplacement du seuil, ainsi que les potentielles banquettes engendrées par la mise en place des épis, ne sont pas intégrées dans la modélisation état projet.

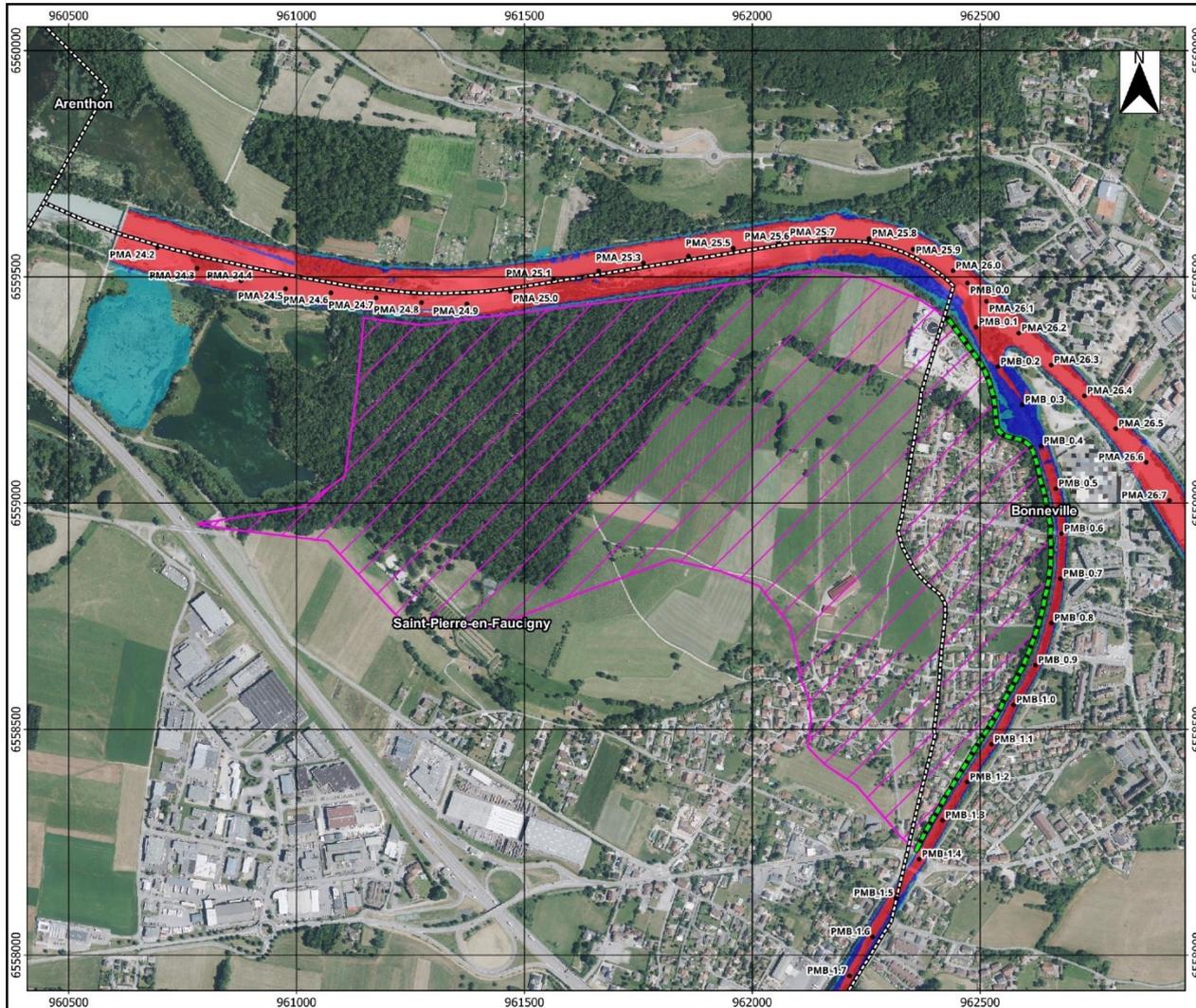
Entre l'aval des rampes en enrochements projetées sur le fond du lit du Borne et le seuil de la confluence, déposé dans le cadre du projet, le fond du Borne, laissé en l'état à l'issue des travaux, est voué à s'abaisser sensiblement par érosion régressive à moyen terme. La situation considérée dans le modèle état projeté est celle jugée la plus pénalisante pour les niveaux du Borne en crue, c'est-à-dire la situation immédiatement après-travaux, sans modification altimétrique du fond du lit.

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 figure suivante présente l'enveloppe maximale de la crue centennale sur le Borne.

La modélisation montre que la crue centennale du Borne ne déborde pas dans la zone protégée par le système d'endiguement en situation de travaux achevés.

On note un débordement à l'extrême aval du modèle au niveau de la rive gauche en amont de la passerelle sur l'Arve. Ce débordement est lié à la condition aux limites aval du modèle hydraulique et a lieu au niveau des étangs de l'Arve uniquement, sans impact sur les enjeux alentours.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE



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

Système d'endiguement "St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne"

ARVE-RG-STPIE-24.17
Borne et Arve rive gauche

Carte des venues d'eau - S1

« fonctionnement nominal au niveau de protection » :
Q100 Borne + Q30 Arve

Légende

- Système d'endiguement
- Zone protégée
- Limites communales
- Venues d'eau [-]
- Peu dangereuses (h < 1 m et v < 0.5 m/s)
- Dangereuses (1 < h < 2 m ou v > 0.5 m/s)
- Très dangereuses (cuvettes - h > 2 m)

Réf.20CRA102 / Date : Janvier 2023
Réalisé par: ECL/LDN

0 75 150 225 300 m

1:7,500

Format : A3
Projection L93



Figure 76 : Cartographie des venues d'eau en Q100 Borne - situation de travaux achevés

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 [DA4], 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 [DA34]. 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 XVIIe siècle (1651), 154 crues (113 sur l'Arve et 41 sur le Borne son affluent) ont eu cours sur le système d'endiguement de St-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne et 60 l'ont impacté matériellement.

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

Le tableau ci-après, 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 ³ /s	912-1000 m ³ /s	777m ³ /s*
Confluence avec le Borne	1250 m ³ /s	-	-
Amont du modèle hydraulique (Borne)	-	-	100m ³ /s*

Tableau 27 : 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 réalisé par ISL pour le compte du SM3A.

La carte en Figure 77 localise les crues en fonction de leur siècle d'occurrence sur un orthophotoplan.

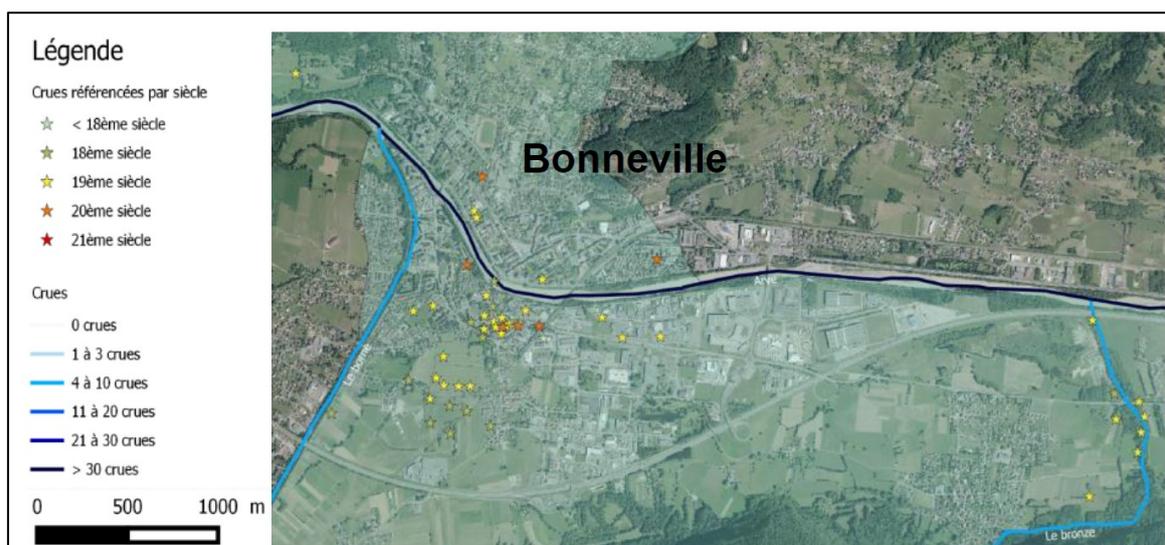


Figure 77 : Cartographie des crues sur le secteur d'étude - Source S.M.3.A.

6.2.2 Synthèse des observations – typologie des désordres (VTA)

6.2.2.1 Les VTA

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

Une nouvelle VTA a été réalisée en 2020 dans le cadre de l'inventaire des systèmes d'endiguement du Borne depuis le pont de la RD1203 (pont Royal) jusqu'à sa confluence avec l'Arve, à la demande et pour le compte de S.M.3.A – Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents.

Cette étude s'inscrit plus largement dans le cadre des études réglementaires obligatoires concernant :

- La surveillance des digues,
- La mise en œuvre de la directive inondation sur le bassin Rhône Méditerranée.

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

Contrairement à 2017, cette nouvelle Visite Technique Approfondie (VTA) est limitée au linéaire de digues faisant l'objet de travaux de confortement.

○ **ARVE-RG-BONNE-26.24 : Bonneville Entre Arve et Borne → étude de dangers à part**

Le système de Bonneville entre Arve et Borne représente un linéaire d'environ 7.3 km. Il s'étend entre les digues de l'Arve en rive gauche et les digues du Borne en rive droite et l'A40 au sud-est.

Pour les digues du Borne, il peut être scindé de la manière suivante (de l'amont vers l'aval) :

- **Bois Jolivet B** (BORNE-RD-BONNE-0.61) : Borne rive droite sur 800 m depuis le pont de Toisinges jusqu'au pont de la RD1203 (pont Royal) ;
- **Queue du Borne** (BORNE-RD-BONNE-0.23) : Borne rive droite sur 400 m depuis la confluence avec l'Arve jusqu'au pont de Toisinges.

○ **ARVE-RG-STPIE-24.17 : Saint Pierre en Faucigny entre Arve et Borne → présente étude de dangers**

Il peut être scindé de la manière suivante (de l'amont vers l'aval) :

- **Toisinges** (BORNE-RG-BONNE-0.05) : Borne rive gauche du pont de la D1203 jusqu'au pont de Toisinges – 800m ;
- **STEP** (BORNE-RG-BONNE-0.61) : Borne rive gauche du pont de Toisinges à la confluence avec l'Arve – 600m.

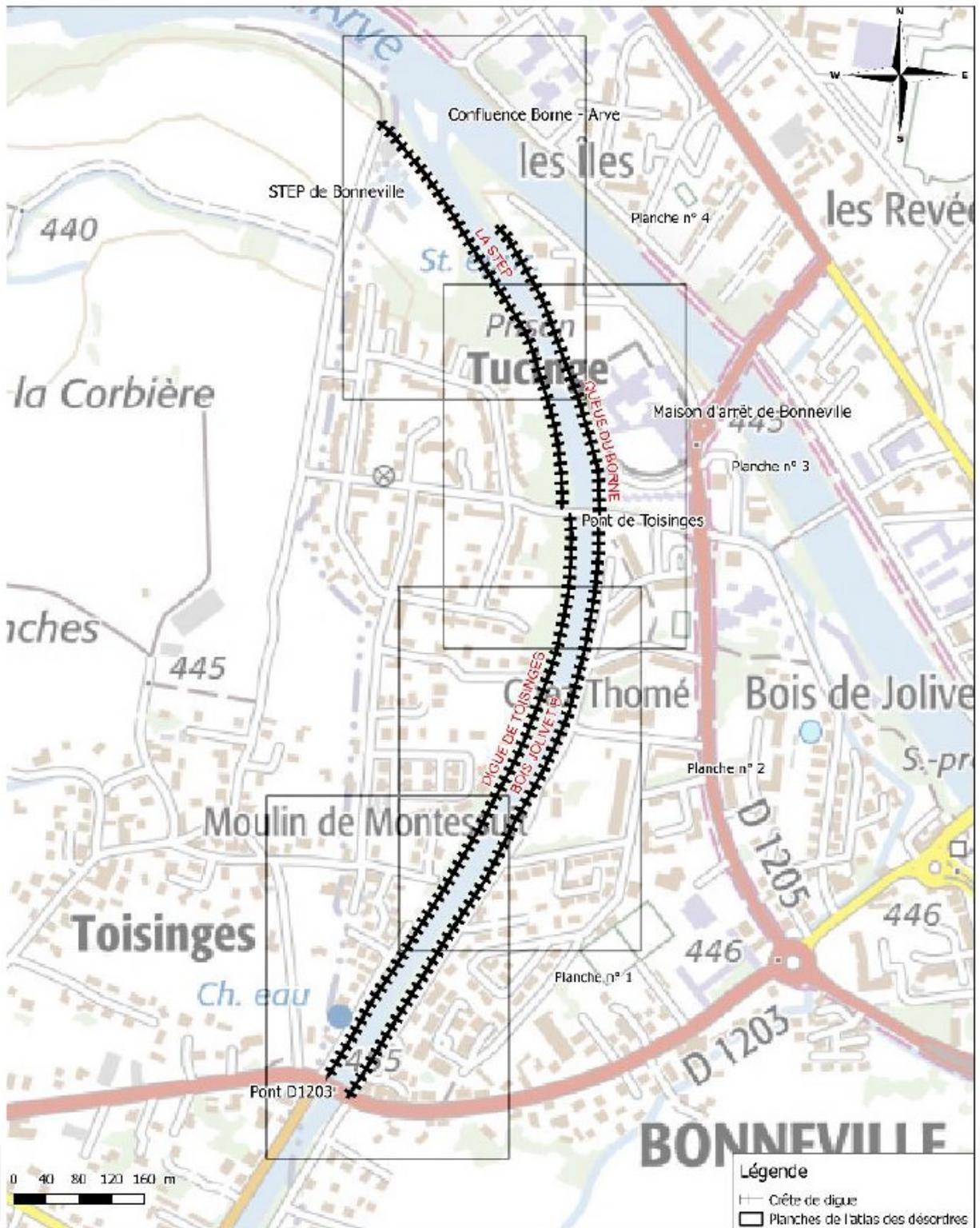


Figure 78 : Localisation des endiguements concernés par la VTA de 2020

6.2.2.2 En rive gauche du Borne

Les endiguements en rive gauche du Borne appartenant au système ARVE-RG-STPIE-24.17 ont fait l'objet de plusieurs VTA (2017 et 2020).

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

- Du manque d'entretien d'une manière générale dans le temps,
- De l'évolution rapide du lit du Borne, en particulier son incision,
- De la forte pression anthropique qui a dénaturé le système de protection originel (pied aval rogné, ravinements, etc.).

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

Une incision prononcée – conséquences

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

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

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

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

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

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

- Tronçon Toisinges,
- Tronçon STEP sur une grande partie de son linéaire amont,

Hiérarchisation des désordres

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

Cette cotation de vulnérabilité est uniquement basée sur une approche visuelle. Le croisement des constats visuels avec les autres données d'entrée (charges hydrauliques

réelles des ouvrages, revanches retenues, contraintes foncières, etc.) devrait permettre d'affiner le diagnostic en détaillant les actions à mener sur des sous-tronçons.

On distingue :

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

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

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

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

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

Tableau 28 : Hiérarchisation de l'état de fragilité des endiguements du Borne

Ce diagnostic a abouti au plan d'action suivant :

○ **Suppression des points de débordements**

Il convient rapidement d'homogénéiser les altitudes des crêtes de digue, et ce en particulier dans le secteur STEP et à sa jonction avec la digue de Corbières ainsi qu'à l'extrémité du tronçon de la Queue du Borne en lien avec les résultats du modèle hydraulique.

○ **Travaux de restauration globaux**

L'importance, l'extension et la forte récurrence des désordres le long des tronçons de digue étudiés conduisent d'une manière générale à envisager des travaux de réfection lourde, impliquant un démantèlement partiel ou total des ouvrages existant, puis leur reconstruction.

L'objectif des confortements est de :

- Limiter le développement des instabilités des berges/talus amont existantes si la charge sur l'endiguement est significative,
- Assurer la sûreté hydraulique vis-à-vis des risques de surverse et d'érosion interne,
- Rectifier de manière draconienne le développement anarchique de la végétation arborée sur les ouvrages.

Sur les tronçons suivants (soit la quasi-totalité du linéaire d'étude) :

- Bois Jolivet B,
- Toisinges,
- STEP,
- Amont queue du Borne,

Les hypothèses de dimensionnement (cote de protection et cote de danger notamment) et les solutions techniques de confortement adaptées aux problématiques rencontrées sont présentées en AVP.

○ Entretien courant des ouvrages

Les digues objet de cette étude présentent un état de dégradation avancé, notamment au niveau des protections de berge existantes le long des cours d'eau, expliqué en grande partie par l'hydraulicité du cours d'eau et la présence d'une végétation actuelle abondante.

De manière à ralentir la cinétique de dégradation des ouvrages vis-à-vis du phénomène d'érosion externe du talus amont, il est nécessaire de conserver et maintenir la fonctionnalité de protection et/ou de soutènement de la protection de berge. Dans ce sens, il est nécessaire d'engager des travaux de restauration des anciens parements de maçonnerie (murs, perrés) le long de la confluence Arve – Borne sur les tronçons non visés par une démolition/reconstruction de digue partielle et/ou totale. Dans l'autre cas, la restauration de la protection de berge sera intégrée au design de la nouvelle digue.

Aussi, afin de ne pas aggraver la dégradation de la digue et augmenter les risques associés (érosion externe, érosion interne, etc.), il est nécessaire de mettre en place un entretien courant et régulier des ouvrages.

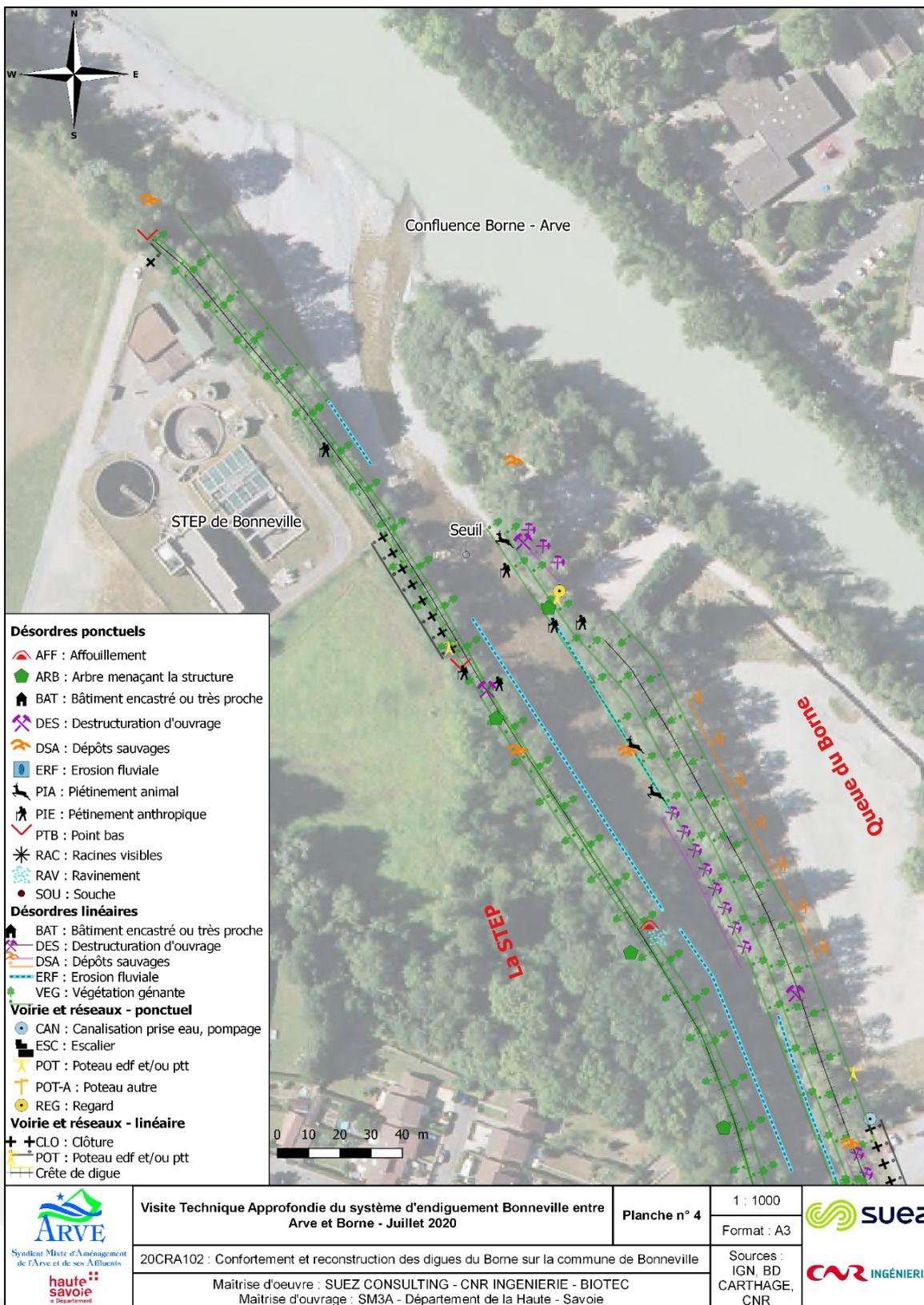
Il conviendra notamment de :

- Surveiller/réparer les traces/impacts éventuels liés au passage d'animaux sauvages et de tiers,
- Reprendre si nécessaire les portions de talus ravinées ou affouillées (enherbement ...),
- Contenir dans la mesure du possible le développement d'essences arborées en pied et sur les talus de digue, côté amont et aval,
- Maintenir régulièrement la végétation à un niveau compatible avec la surveillance des ouvrages via la production d'un plan de gestion raisonnée de la végétation.

Ces points sont développés dans l'AVP.

Les cartes suivantes permettent de récapituler les désordres inventoriés sur les digues du Borne.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE



Visite Technique Approfondie du système d'endiguement Bonneville entre Arve et Borne - Juillet 2020

20CRA102 : Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville

Maitrise d'oeuvre : SUEZ CONSULTING - CNR INGENIERIE - BIOTEC
Maitrise d'ouvrage : SM3A - Département de la Haute - Savoie

Planche n° 4

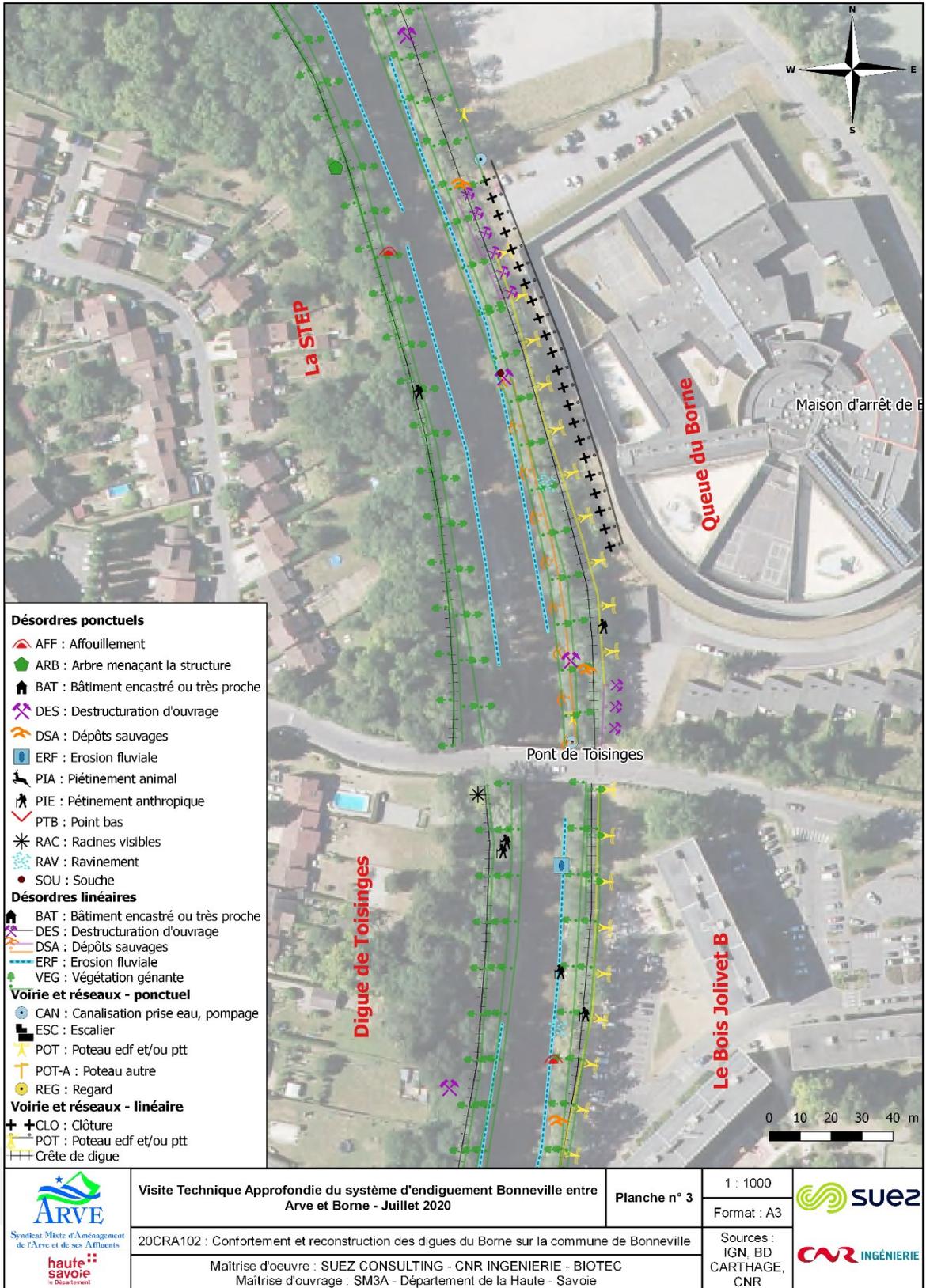
1 : 1000

Format : A3

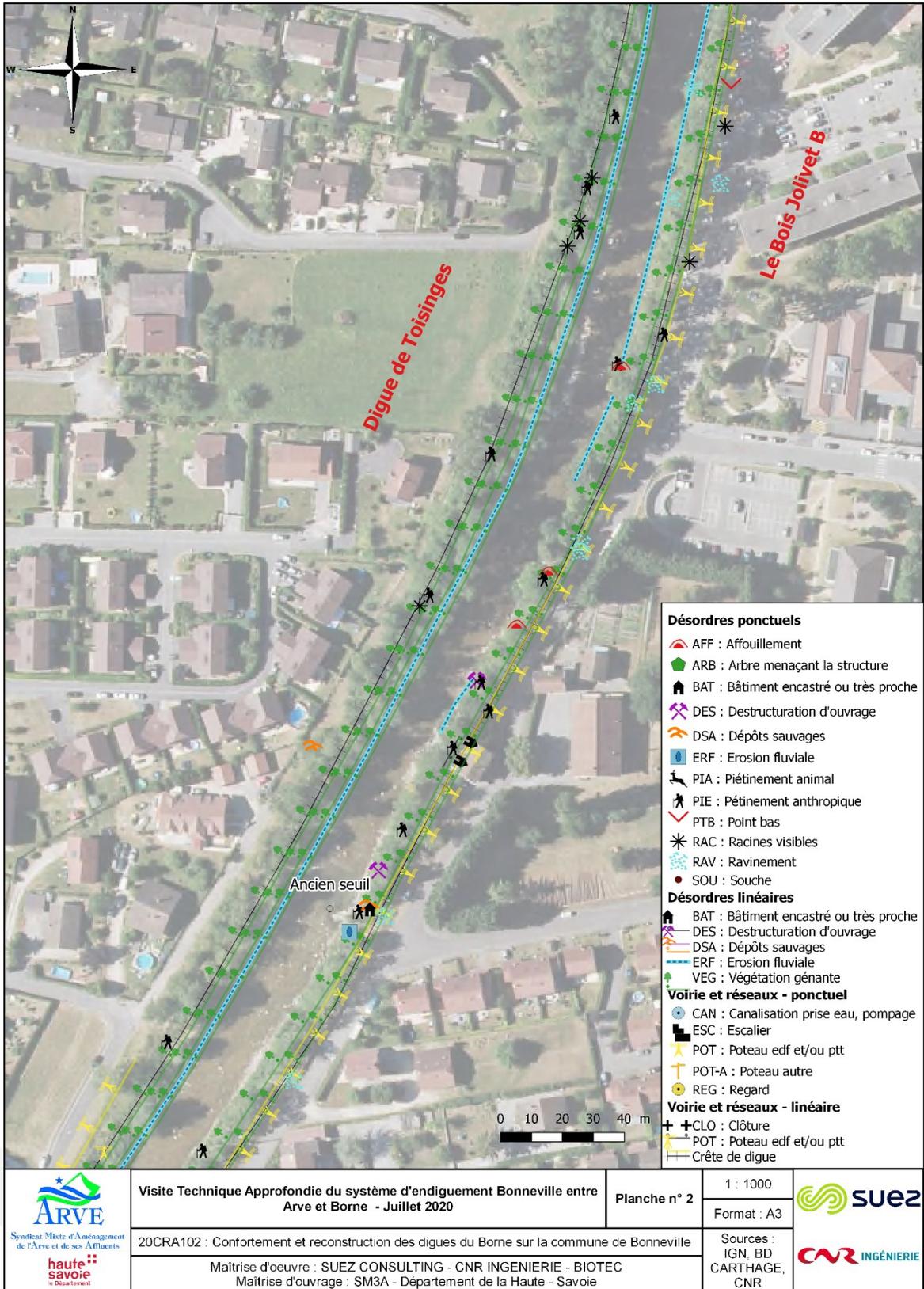
Sources : IGN, BD CARTHAGE, CNR



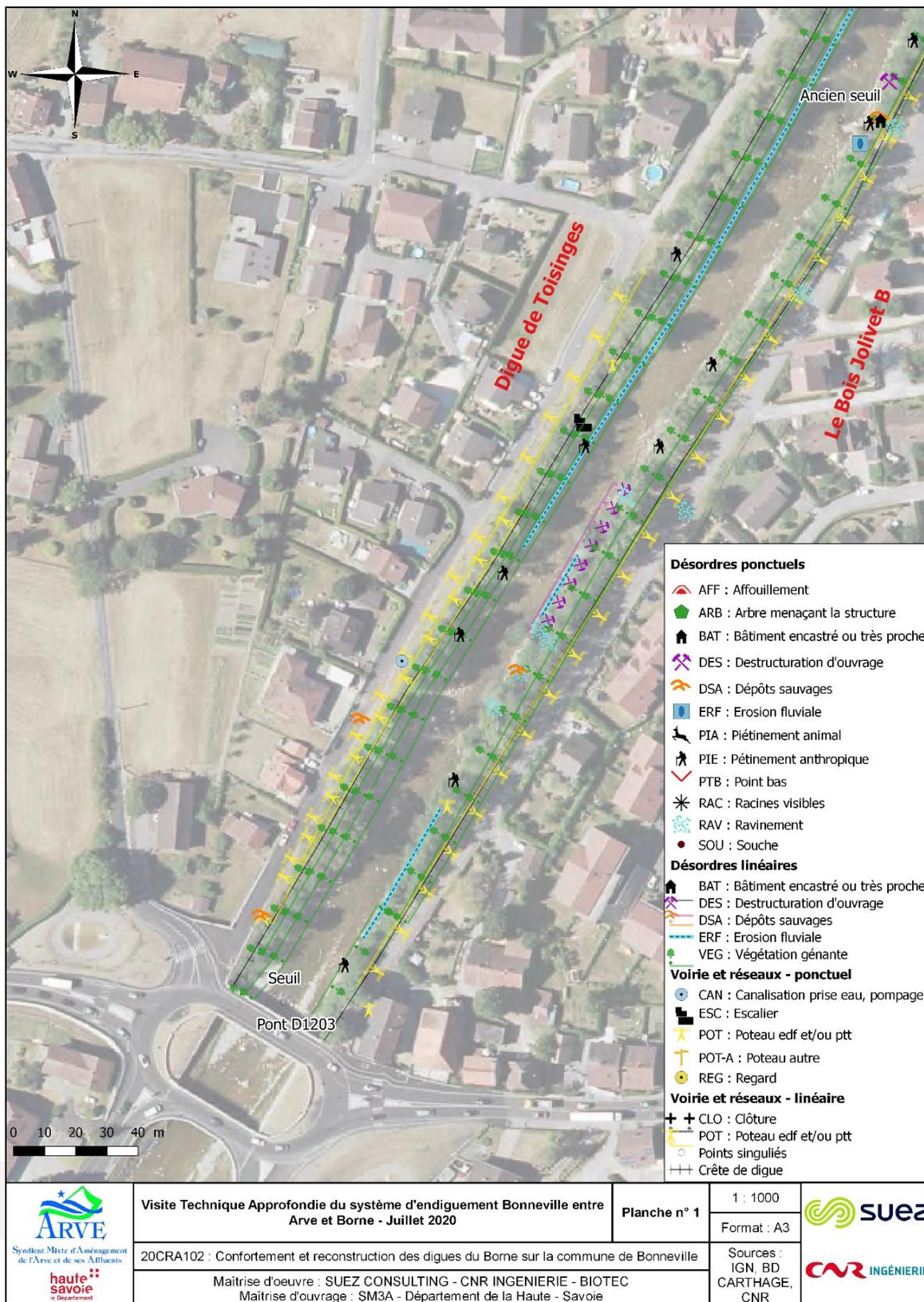
Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE



 	Visite Technique Approfondie du système d'endiguement Bonneville entre Arve et Borne - Juillet 2020	Planche n° 3	1 : 1000 Format : A3	
	20CRA102 : Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville		Sources : IGN, BD CARTHAGE, CNR	
Maîtrise d'oeuvre : SUEZ CONSULTING - CNR INGENIERIE - BIOTEC Maîtrise d'ouvrage : SM3A - Département de la Haute - Savoie				



Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE



Visite Technique Approfondie du système d'endiguement Bonneville entre Arve et Borne - Juillet 2020

Planche n° 1

1 : 1000

Format : A3

20CRA102 : Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville

Sources : IGN, BD CARTHAGE, CNR

Maitrise d'oeuvre : SUEZ CONSULTING - CNR INGENIERIE - BIOTEC

Maitrise d'ouvrage : SM3A - Département de la Haute - Savoie



6.2.3 Autres événements particuliers survenus sur le site

Sans objet.

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

Référence : 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 défectueux suivant un plan de gestion des risques inondation global et raisonné en intégrant la vulnérabilité des sites ;
- L'organisation d'actions d'entretien et de surveillance périodiques et efficaces.

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

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

- La crue de mai 2015 sur l'Isère.

- Rupture de la digue en rive gauche à Domène (crue de 2005 sur le Domeynon) ;

6.2.5.1 La crue de mai 2015 sur l'Isère

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

6.2.5.1.1 Contexte météorologique

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

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

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

6.2.5.1.2 Déroulement de la crue

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

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

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

6.2.5.1.3 Dispositions prises par le gestionnaire de digues

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

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



Figure 79 : 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-cru » 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-cru 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 suite à l'obstruction de l'écoulement du Domeynon par des dépôts solides. Cette accumulation de matériaux a complètement détourné le ruisseau de son lit.





Figure 80 : Rupture de la digue en rive gauche



Figure 81 : 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.

La rupture de la digue peut être la cause de :

- 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.

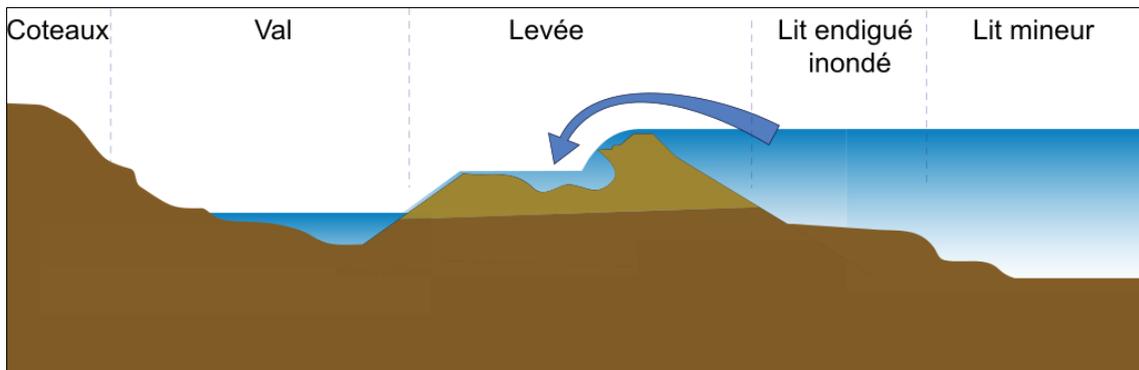


Figure 82 : Schéma de principe d'une rupture par surverse

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.

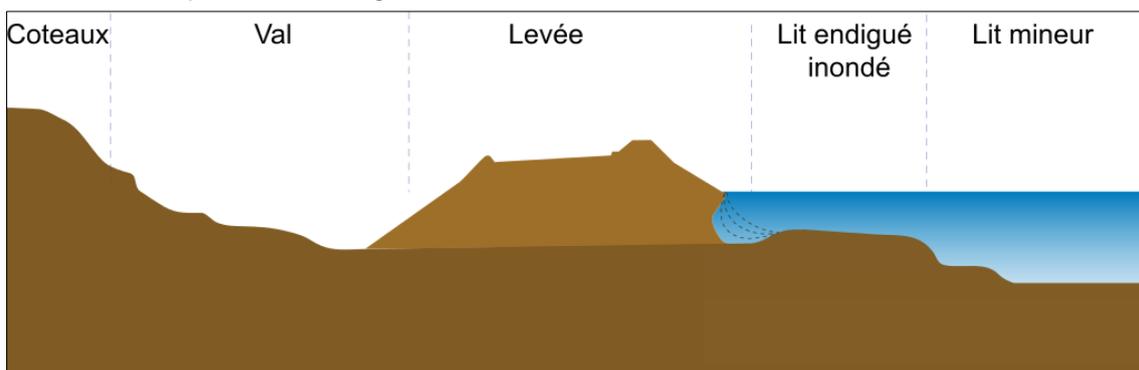


Figure 83 : Schéma de principe d'une rupture par érosion externe

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.

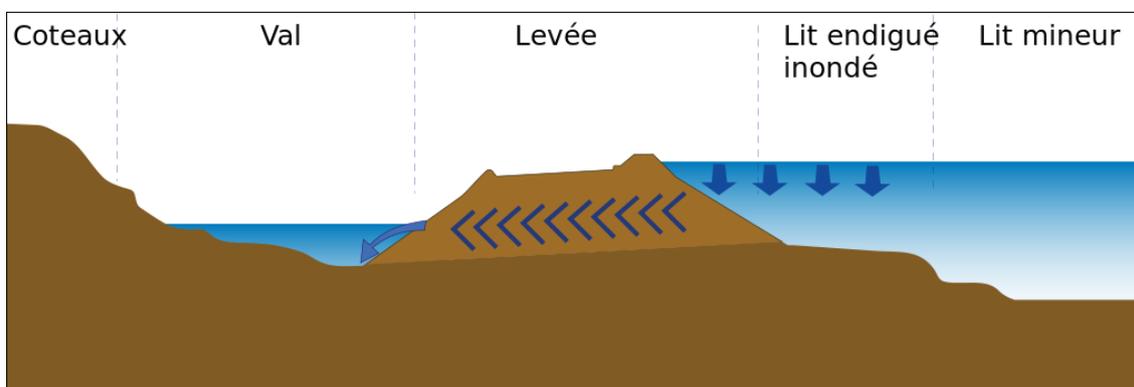


Figure 84 : Schéma de principe d'une rupture par effet de renard hydraulique

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

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

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.

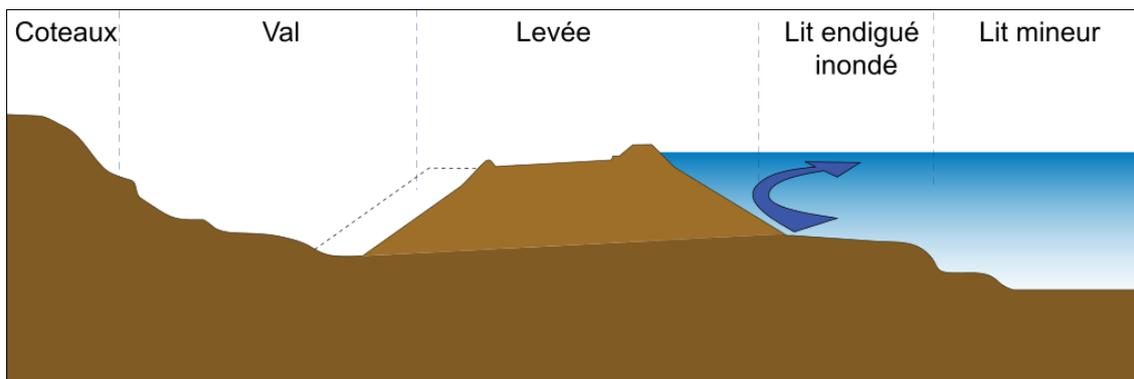


Figure 85 : Schéma de principe de rupture d'ensemble

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

Aucun ouvrage de régulation type déversoir ou vanne n'est associé au SE. De ce fait, le potentiel de danger associé au dysfonctionnement d'un ouvrage hydraulique est inexistant.

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. Le système d'endiguement étant de classe C en zone 4, les recommandations du MEDDE de 2014 indiquent que la justification du système d'endiguement n'est pas nécessaire au séisme :

7.5.2.3. Niveaux d'études recommandés

Les recommandations en matière d'études graduées sont les suivantes :

Zone de sismicité	Classe D	Classe C	Classe B	Classe A
1	α	α	α	α
2	α	α	α	α
3	α	α	α	β
4	α	α	β	β
5	α	β	β	β

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

α : vérification de la conformité aux règles du génie civil
 β : vérification de la stabilité par méthode pseudo-statique

Figure 86 : vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [9])

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 :** à écarter car absence d'aménagements hydrauliques participant à la protection et/ou de conduites traversantes la digue.
- **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 évènement supérieur au niveau de protection ;
 - Surverse suite au 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 supérieure à la crête des endiguements.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE



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

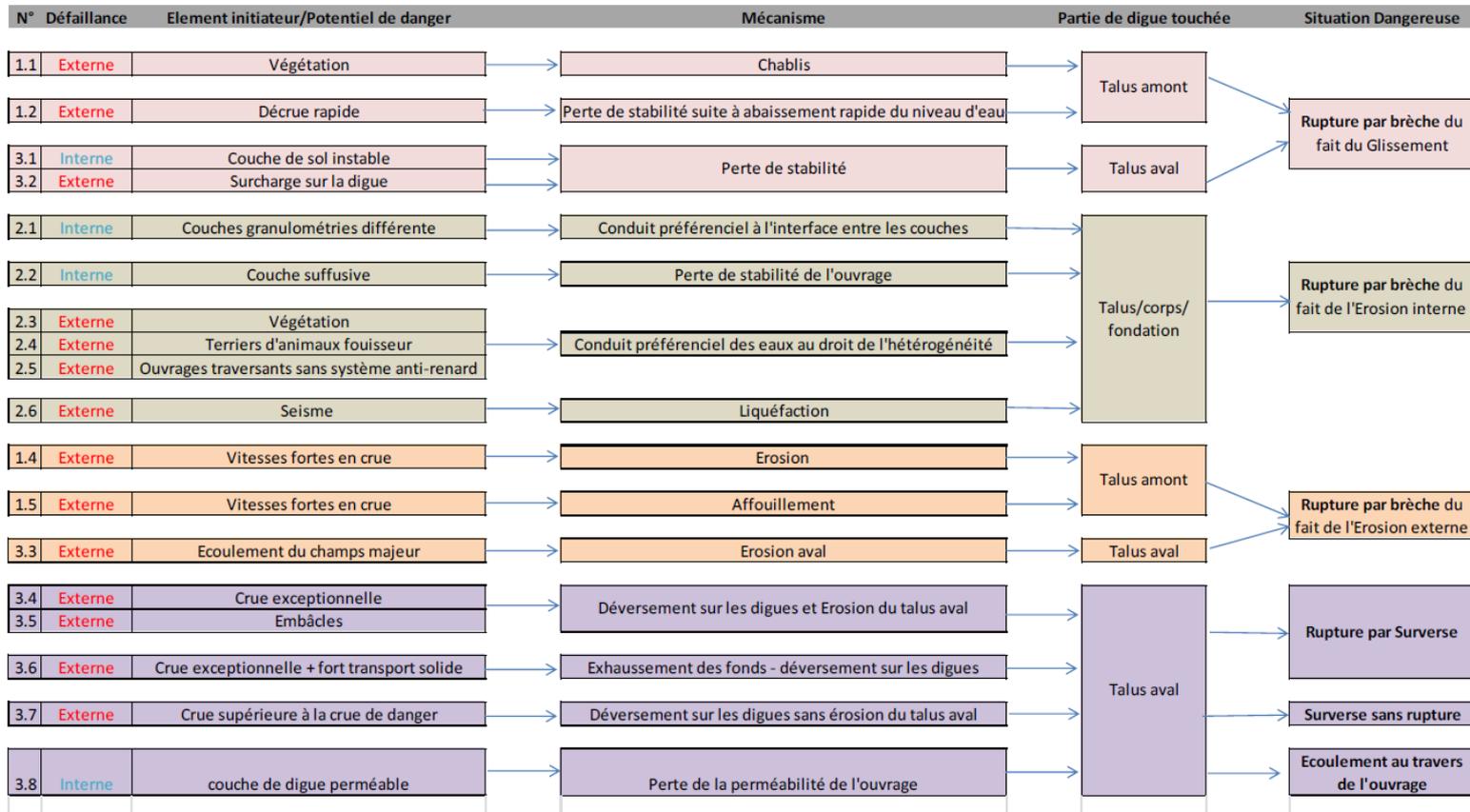


Tableau 29 : Identification des situations dangereuses et potentiels de danger pouvant intervenir sur une digue de protection contre les inondations (source : CNR)

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 Etat actuel

7.1.1 Rappel de l'historique du diagnostic du système d'endiguement

- Analyse des données historiques et issues des reconnaissances topographiques, géophysiques et géotechniques menées dans le cadre de la production des **Etudes De Dangers de 2019 par CNR** ;
- Données réutilisées dans l'Avant-Projet de confortement et de reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville en aval du Pont de la RD1203 (**AVP structurel de 2018 puis AVP optimisé de 2020**).

L'AVP optimisé de 2020, s'appuie sur l'AVP préalable et les données associées. Il a pour objet d'approfondir les possibilités d'aménagement des digues RD et RG du Borne entre les PM 0 et 1380 (Pont de la RD 1203) de façon à protéger les enjeux exposés pour Q100 tout en intégrant davantage les problématiques écologiques, environnementales et d'urbanisme associées à ce secteur. Pour cela, il est prévu la mise en œuvre de diverses solutions de confortement en fonction des tronçons considérés.

Les résultats présentés correspondent à une mission géotechnique normalisée de type G2 – AVP au sens de la norme NF P 94-500 de novembre 2013. Cette mission a fait l'objet d'un rapport faisant partie intégrante de la notice globale d'AVP, et propose une ébauche dimensionnelle de ces profils types de confortement.

7.1.2 Documents sources

Les documents ayant servi de support à la réalisation du rapport G2 AVP sont rappelés ci-après :

- VTA Notice générale référencée DIGP 2017-087-01 et fiches synthèses de Mai 2017, CNR/Arbeausolutions

- VTA Notice générale référencée DIGP 2020-633-00 et fiches synthèses d'Octobre 2020, CNR/Safege
- Avant-Projet de confortement référencé DIGP 2018-625-02 de Décembre 2018, CNR
- Etude de dangers sur les digues de Bonneville, Ayze et Saint-Pierre en Faucigny – Reconnaissances géophysiques, digues de Bois Jolivet B, Queue du Borne, Toisinges et STEP – 2017 – IMG
- Etude de dangers sur les digues de Bonneville, Ayze et Saint-Pierre en Faucigny – Reconnaissances géotechniques – Rapport d'étude géotechnique Mission G1 (ES) – 2017 – HYDROGÉOTECHNIQUE
- Levés topographiques de Novembre 2017, Sintegra
- Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville - Construction du modèle hydraulique Notice I.001094.001 – DIGP 2021-834-00
- Levés LIDAR 2014 et 2015
- 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.

7.1.3 Moyens mis en œuvre – reconnaissances de 2017

7.1.3.1 Reconnaissances géophysiques

Les reconnaissances géophysiques ont été réalisées par IMG entre mai et août 2017.

La campagne de reconnaissance a consisté en la réalisation de profils de panneaux électriques avec espacement des électrodes compris entre 5 m (profils en long) et 2 m (profils en travers). Les profils en long ont été réalisés en crête de digue.

Le programme exécuté par système d'endiguement est détaillé dans le tableau ci-contre.

Digue	Profil en long	Profil en travers
Bois Jolivet B	1 de longueur 792.5 m en crête de digue (entre les deux ponts)	1 au PM 645
		1 au PM 820
Queue du Borne	1 de longueur 397.5 m en crête de digue (du pont de Toisinges au PM 210)	1 au PM 370
		1 au PM 435
Toisinges	1 de longueur 772.5 m en crête de digue (entre les deux ponts)	1 au PM 760
		1 au PM 1055
STEP	1 de longueur 540 m en crête de digue (entre les deux ponts)	1 au PM 245
		1 au PM 515

Tableau 30 : Contenu des reconnaissances géophysiques 2017

Ces reconnaissances visaient à caractériser la stratigraphie des digues sur la base de la mesure de résistivité apparente des sols et de faire apparaître les éventuelles hétérogénéités. Associées aux résultats des reconnaissances géotechniques, ces reconnaissances devaient permettre de statuer quant à la composition des digues sur le linéaire d'étude global.

7.1.3.2 Reconnaissances géotechniques

Les reconnaissances géotechniques in situ et en laboratoire ont été réalisées par HYDROGÉOTECHNIQUE entre juin et août 2017.

La campagne de reconnaissances a consisté en la réalisation des prestations suivantes :

Tableau 31 : Contenu des reconnaissances géotechniques 2017

Digue	Sondages réalisés	Sondages et essais in situ (Unité)			Essais laboratoire (Unité)			
		Carotté (SC)	Pénétromètre Dynamique (PD)	Tarière manuelle (TA)	Analyses GTR	Sédimentométrie	Cisaillement	Analyse physico-chimique
Bois Jolivet B	SC748 PD561-320-748 TA35-726	1	3	2	2	0	0	2
	Queue du Borne	SC253 TA153	1	0	1	2	1	1
Toisinges	SC442 PD441/442-153/154 TA70-745	1	2	2	2	2	1	2
STEP	SC195 TA464-65	1	0	2	2	1	1	0

La figure suivante localise les reconnaissances réalisées en 2017 sur les digues du Borne et de l'Arve, les sondages répertoriés dans le tableau ci-dessus et utiles à cette étude étant situés sur le tronçon aval du Borne (forme rouge).



Figure 87 : Localisation des sondages géotechniques réalisés en 2017 sur les digues objets de l'étude

7.1.4 Caractéristiques géotechniques issues des reconnaissances géotechniques de 2017

7.1.4.1 Résultats issus des reconnaissances in-situ

Les résultats issus des sondages à la tarière manuelle ne sont pas rappelés du fait de l'atteinte rapide du refus (maximum 0.45 m / TA).

7.1.4.1.1 Digue de Toisinges

7.1.4.1.1.1 Reconnaissances géophysiques :

Il est possible d'en ressortir les conclusions suivantes :

- Des PM 1380 (Pont Royal) à 1300 environ, une répartition générale composée d'un horizon superficiel résistif (teintes rouges) bien délimité sur un ensemble moins résistif (teintes bleues). La baisse des résistivités est liée vraisemblablement à cette teneur en eau et également à la présence d'une fraction fine limoneuse plus abondante dans les alluvions.
- Des PM 1300 à 1170, se distingue globalement trois ensembles :
 - un horizon superficiel résistif à dominante de graves et sables grossiers.
 - un horizon intermédiaire avec apparemment un gradient de granulométrie mais globalement moins graveleux et plus sableux que l'horizon du dessus (sables grossiers et cailloutis vers des sables plus fins en profondeur).
 - en profondeurs, les alluvions sous nappe sont composées de sables et graves avec une fraction limoneuse plus abondante.
- Des PM 1170 à 1100, la distinction entre les ensembles est moins nette. L'ensemble apparaît plus hétérogène sur 10 à 12m de profondeur.
- Entre les PM 1100 et 690, on retrouve une distinction en trois horizons assez bien définis avec cependant quelques variations locales. Ainsi on retiendra :
 - une légère franche très superficielle (épaisseur métrique) apparemment un peu moins résistive entre les PM 1090 et 1050.
 - l'intercalation d'un horizon peu épais, apparemment plus limoneux, situé vers la côte 446m entre les PM 910 et 705.
 - une zone plus hétérogène entre les PM 800 et 755 qui se caractérise par des résistivités nettement plus faibles (teintes bleu clair à orangé) sous l'horizon superficiel résistif
- du PM 690 et jusqu'à la fin, une structure clairement en deux horizons : un résistif superficiel (graves sablo-limoneuses) sur des alluvions avec une dominante plus sablo-limoneuse.

7.1.4.1.1.2 Sondages carottés

Le log géologique issu du sondage carotté fait ressortir la présence d'un matériau de type grave sablo-limoneuse grise à passages plus limono-sableux sur l'ensemble du forage (6 m / TA).

Le taux de récupération a été compris entre 60 et 75% hormis sur la couche 0 – 1.20 m où il était supérieur à 95%.

7.1.4.1.1.3 Sondages pénétrométriques

Les sondages ont fait ressortir la présence de terrains compacts ($q_d > 10$ MPa), de compacité croissante avec la profondeur, jusqu'aux refus entre 0,6 m et 1,0 m de profondeur.

7.1.4.1.2 Digue de la STEP

7.1.4.1.2.1 Reconnaissances géophysiques

Le profil longitudinal présente des résultats assez semblables aux reconnaissances sur le système d'endiguement de Toisinges.

Globalement on observe la succession suivante sur l'ensemble du profil :

- un horizon superficiel résistif à dominante de graves et sables grossiers ponctuellement interrompu. A partir du PM 230, il semble disparaître au bénéfice de l'horizon moins résistif qui est juste en dessous. Il semble donc s'interrompre en biseau.
- l'intercalage d'un horizon apparemment plus limoneux, situé vers la côte 444 m et d'une épaisseur de 1 à 4 m. Il devient affleurant à peu près à partir du PM 230 de distance.
- un horizon « intermédiaire » très résistif correspondant à des matériaux graveleux. Il est relativement bien délimité et montre moins le gradient de granulométrie observé sur Toisinges. On note qu'il s'interrompt entre les PM 540 et 500.
- En profondeurs, les alluvions sous nappe sont composées de sables et graves avec une fraction limoneuse plus abondante.

7.1.4.1.2.2 Sondage carotté

Le log géologique issu du sondage carotté fait ressortir la présence des matériaux suivants :

- 0 – 1.5 m : Sable limoneux gris beige à nombreux cailloutis en cailloux ;
- 1.5 – 2 m : Grave propre ;
- 2 – 6.03 m (fin de forage) : Limon sableux à sable limoneux marron gris à nombreux cailloutis et cailloux avec un passage plus fin limono-sableux de 3,9 à 4,5 m.

Le résultat de ce sondage carotté est cohérent avec les observations issues des reconnaissances géophysiques sur cette digue.

Le taux de récupération sur l'ensemble du forage est de 100%.

7.1.4.2 Caractéristiques géotechniques issues des essais de laboratoire

7.1.4.2.1 Analyse des essais de cisaillement

Des essais de cisaillement à la boîte ont été réalisés sur des échantillons remanié avec écrêtage de la fraction 0/5 mm. Les résultats ci-après caractérisent donc cette fraction.

Tableau 32 : Résultats des essais de cisaillement

Digue	Profondeur (m/TA)	Nature	C'(kPa)		φ' (°)	
			C'p	C'r	φ' p	φ' r
Queue du Borne	3.85	Sables légèrement limoneux à cailloutis	0	0	30.3	30.3
Toisinges	0.85	Grave sablo-limoneuse	8	3	32.4	31.2
STEP	0.75	Sables limoneux à cailloutis	0	0	29.4	29.2

7.1.4.2.2 Granulométrie – classification GTR

Des essais granulométriques complétés par sédimentométrie en fonction de la fraction fine résiduelle ont été réalisés sur les échantillons mentionnés dans le tableau suivant. Les courbes granulométriques sont données dans la figure suivante.

Tableau 33 : Résultats des essais d'identification

Digue	Profondeur	Nature	Classification GTR	Teneur en eau	Valeur au bleu
Bois Jolivet B	0 – 1.60 m	Grave à cailloux et cailloutis, matrice sablo-limoneuse grise	D3	0.8	0.08
	3.10 – 4.60	Grave à cailloux et cailloutis, matrice sablo-limoneuse grise	B5	0.1	0.15
Queue du Borne	1 – 1.60	Grave à cailloutis et quelques cailloux, matrice sablo-limoneuse grise	C1B3	1.1	0.17
	3.10 – 4.60	Sables limoneux gris, nombreux cailloutis et cailloux	B5	1.5	0.13
Toisinges	0 – 1.20	Sables limoneux gris, nombreux cailloutis et cailloux	C1B5	4.7	0.17
	3 – 4.50	Sables limoneux gris, nombreux cailloutis et cailloux	C1B5	3.2	0.12
STEP	0 – 1.50	Sables limoneux gris-beige, nombreux cailloutis et quelques cailloux	B5	1.7	0.26
	3.90 – 4.50	Limons sableux marron gris, quelques cailloux et cailloutis	A1	2.8	0.49

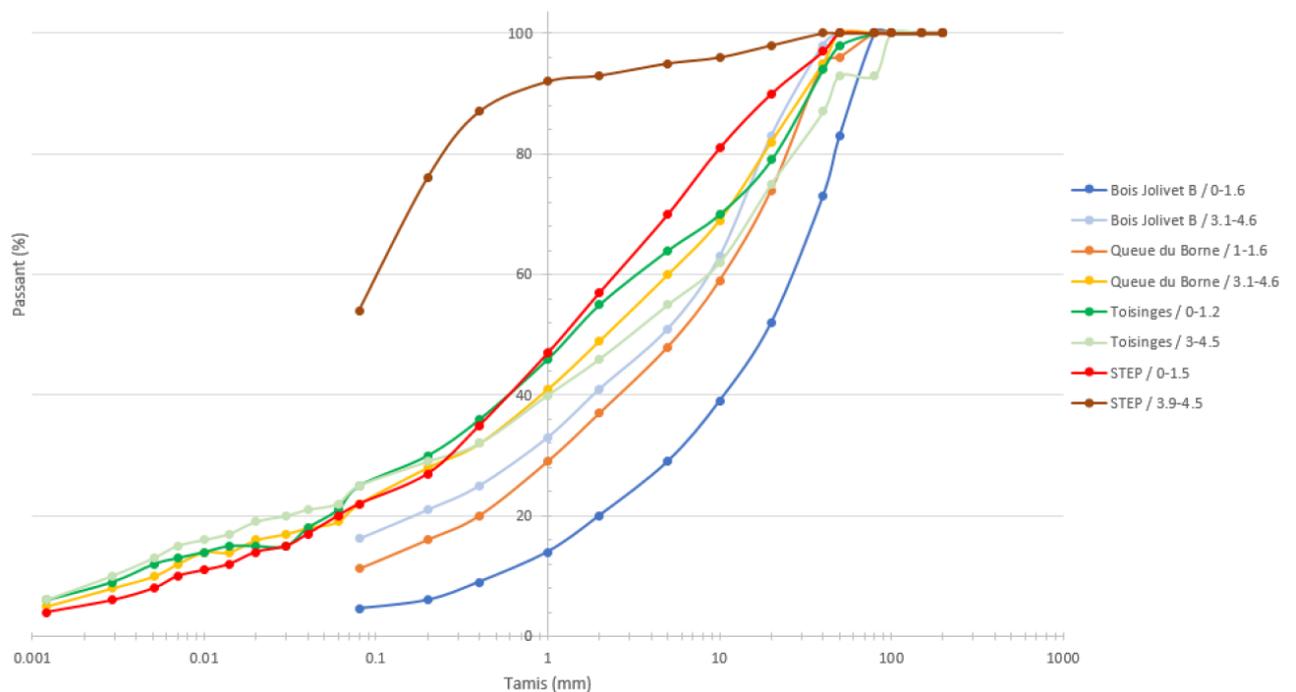


Figure 88 : granulométries

7.1.4.2.3 Caractéristiques physico-chimiques

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur certains échantillons afin de déterminer la catégorie de déchets des potentiels matériaux excavés. Les résultats sont présentés ci-après.

Tableau 34 : Résultats des analyses physico-chimiques

Échantillon	Seuils d'admissibilité en I.S.D (en mg/kg)			QueueBorne – SC253		Toisinges – SC442		BoisJolivetB – SC748	
	I.S.D.I	I.S.D.N.D	I.S.D.D	0,00-1,60	1,60-3,10	0,00-1,20	1,00-2,00	0,00-1,60	2,30-2,60
Sur brut									
pH	-	> 6	> 5 et < 13	8,7	8,5	7,7	7,9	8,4	7,5
indice hydrocarbures	500	2 000	10 000	105,0	107,0	104,0	195,0	492,0	44,9
COT	30 000 ¹	50 000 ²	60 000 ³	18500	34000	22500	20200	28600	15900
somme des HAP	50	100	500	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
somme des PCB	1	10	50	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
somme des BTEX	6	< 30	> 30	<0.0500	<0.0500	<0.0500	<0.0500	<0.0500	<0.0500
Sur lixiviat									
Fraction soluble	4000 ⁵	60000	100000	4910	<2000	<2000	<2000	3570	3110
Carbone Organique Total (COT)	500 ⁴	800 ⁵	1 000 ⁶	<51	<50	<51	<50	55	<50
Chlorure	800 ⁷	15000	25000	16,7	<10,0	16,2	<10,0	13,5	<10,1
Fluorure	10	150	500	<5,08	<5,00	<5,07	<5,00	<5,07	<5,04
Sulfate	1000 ^{7,8}	20000	50000	<50,8	<50,0	59,8	<50,0	<50,7	54,9
Antimoine	0,06	0,7	5	<0,005	<0,005	0,007	0,005	<0,005	<0,005
Arsenic	0,5	2	25	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Baryum	20	100	300	0,29	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cadmium	0,04	1	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Chrome	0,5	10	70	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cuivre	2	50	100	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,36	<0,20
Mercur	0,01	0,2	2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Molybdène	0,5	10	30	0,027	0,014	0,061	0,029	0,017	0,021
Nickel	0,4	10	40	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Plomb	0,5	10	50	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Sélénium	0,1	0,5	7	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zinc	4	50	200	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Indice phénol	1	50	100	<0,51	<0,50	<0,51	<0,50	<0,51	<0,50
Orientation optimisée en Installation de Stockage des Déchets (I.S.D)				I.S.D.I ¹⁰	I.S.D.I ¹⁰	I.S.D.I	I.S.D.I	I.S.D.I	I.S.D.I

L'ensemble des digues sont constituées de matériaux inertes non pollués (ISDI) qu'il est possible de valoriser en l'état (sans dépollution).

7.1.4.3 Synthèse géologique des reconnaissances de 2017

Deux profils type actuels de digue établis sur la base des éléments présentés ci-avant sont présentés ci-dessous, tous les autres profils sont consultables dans le rapport complet de G2 AVP.

Du fait de la non-obtention de données techniques supplémentaires depuis 2017, ces profils sont identiques à ceux proposés dans le diagnostic de 2018. Ils ont été complétés par quelques profils types au niveau de Toisinges et de la STEP.

De la même manière, les caractéristiques géomécaniques des sols déterminés pour le diagnostic de 2018 sur la base des reconnaissances de 2017 restent valables et utilisées pour cette étude.

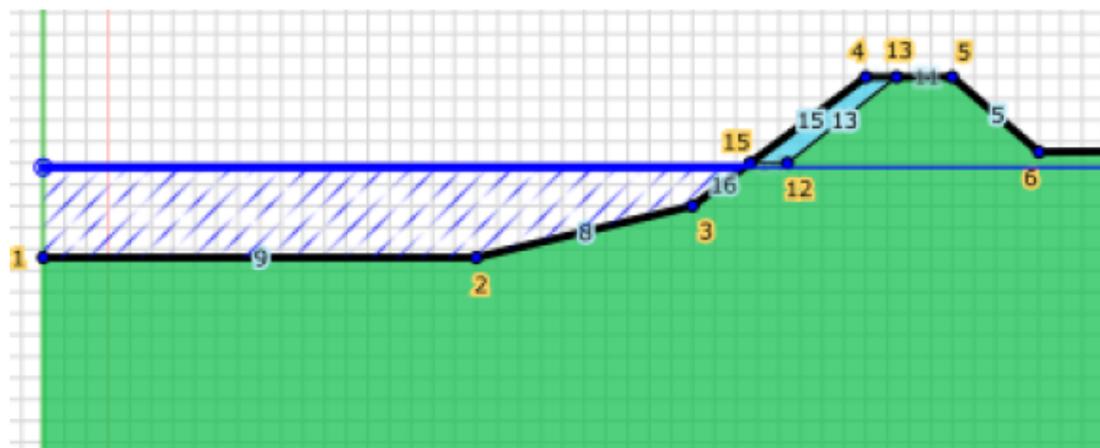


Figure 89 : Toisinges – PM 1300

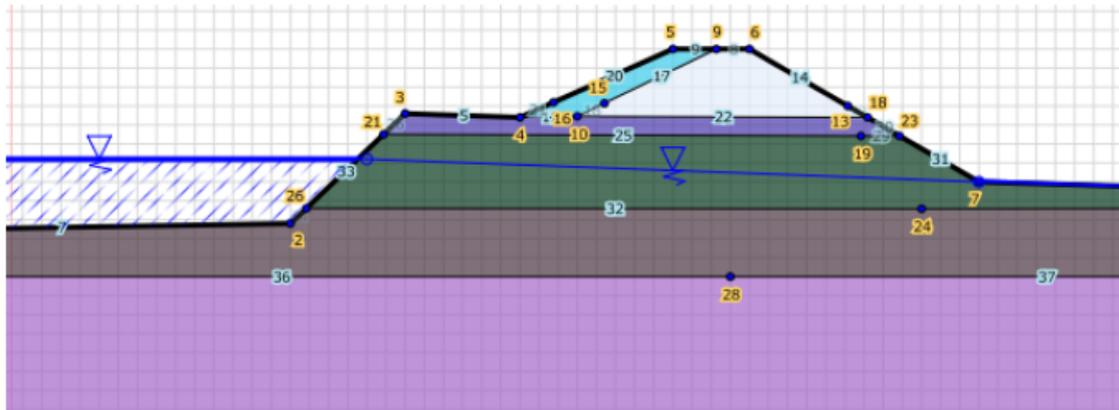


Figure 90 : STEP – PM 300

Tableau 35 : Rive gauche – Paramètres géomécaniques

Caractéristiques mécaniques des sols					
Profil topo	Profondeur	Description	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
Variable	Parement amont	Enrochements/Perrés	20	0	45
TOISINGES					
Profil topo retenu	Profondeur	Description	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
1200+1300+1076	0 à 6m	Graves sablo limoneuses grises à passage plus limono sableux (C1B5)	20	3	31.2
774	0 à 3.5m	Graves sablo limoneuses grises à passage plus limono sableux (C1B5)	20	3	31.2
	3.5 à 6m	Sable fin limoneux à cailloux	21	0	29
STEP					
Profil topo retenu	Profondeur	Description	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
300 + 400	1 à 1.5m	Sable fin limoneux gris beige à nombreux cailloux	21	0	29.2
	1.5 à 2m	Graves propres	20	0	37
	2 à 3.9m	Limon sableux à cailloux	19	4	27
	3.9 à 4.5m	Limons à cailloux (A1)	19	2	25
	4.5 à 6m	Sable fin limoneux à cailloux	21	0	29
145	0 à 1.4 m	Limon sableux à cailloux	19	4	27
	1.4 à 2.4 m	Limons à cailloux (A1)	19	2	25
	2.4 à 6 m	Sable fin limoneux à cailloux	21	0	29

7.1.5 Evaluation de la stabilité des digues existantes

7.1.5.1 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 rapport au diagnostic 2018, les hypothèses suivantes ont changé :

- Les lignes d'eau issues d'une mise à jour du modèle hydraulique traduisant de l'état actuel ont été légèrement modifiées sans remettre en cause les grands principes étudiés au diagnostic 2018 ;
- De manière générale, il a été demandé de considérer une protection à la cote de protection correspondant à la ligne d'eau maximale atteinte lors d'une crue centennale (Q_{100}) avec ajout d'une revanche minimale de 1 m (cf. § 5 de la notice globale d'AVP) ;
- Les profils de calculs additionnels RD-722, RG-1076, RG-774 et RG-145 ont été étudiés dans l'état actuel mais montrent les mêmes tendances que les profils étudiés au diagnostic.

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 36 : Stabilité actuelle – Conclusion générale - Borne

Rive	Tronçon	Charge	Surverse	Erosion interne	Erosion externe Affouillement	Glissement	Risque
Droite	Bois Jolivet B	Q_{10}	$> Q_{100} +$ revanche	Instable	Oui	Talus rivière instable	4
	Queue du Borne	Q_{10}	$> Q_{100} +$ revanche	Instable	Oui	Talus rivière instable	4
Gauche	Toisinges	$< Q_{10}$	$> Q_{100} +$ revanche	Instable	Oui	Talus rivière instable	5
	STEP	$< Q_{10}$	$> Q_{100} +$ revanche	Instable	Oui partie amont au PM145	Talus rivière et terre instables	5

Tableau 37 : synthèse extraite de l'EDD de 2019 avec Arve en état actuel

	Cours d'eau	Charge	B/H	Surverse	Erosion interne	Erosion Externe Affouillement	Glissement	Risque	Préconisations
TOISINGES	Borne RG	$< Q_{10}$	4.0	$> Q_{1000}$	Instable	Oui	Instable talus rivière	5	Abaissement la digue et élargissement ou maintien en fonction des emprises foncières
La STEP		$< Q_{10}$	4.5	$> Q_{1000}$	Instable	Oui partie amont	Instable talus rivière et terre	5	Abaissement la digue et élargissement ou maintien en fonction des emprises foncières

7.1.5.2 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 ont 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.

7.1.6 Caractéristiques issues des reconnaissances géotechniques de 2021

La campagne de reconnaissances géotechniques de 2021 a permis de mettre en œuvre les investigations suivantes :

Secteur bois jolivet

- 1 sondage destructif : PM1232RD ; 8 m de profondeur, essais de chargement in situ de type pressiométrique tous les 1m ;
- 1 sondage carotté : SC1150RD ; 8 m de profondeur.
- 2 essais de perméabilité : Lefranc et Nasberg ;
- Essais en laboratoire : 2 analyses GTR, 1 analyse sédimentométrique, 1 essais de cisaillement à la boîte.

Secteur en queue de Borne

- 5 sondages à la pelle mécanique : PEL500RD, PEL450RD, PEL291RD, PEL 120RD et PEL120RD bis ; Profondeur de 0,8 à 2,6m ;
- 1 sondage destructif : PM220RD ; 8m de profondeur, essais de chargement in situ pressiométrique ;
- Essais en laboratoire : 6 analyses GTR, 5 analyses sédimentométriques, 5 mesures de densité, 4 mesures de teneur en matière organique, 4 mesures de l'indice portant immédiat IPI, 4 analyses de pollution ISDI, 1 essai de cisaillement à la grande boîte.

Secteur Toisinges

- 2 sondages destructifs : PM1333RG, PM1160RG : 15,8 et 16,2m de profondeur, essais de chargement in situ pressiométriques ;
- 1 Sondage carotté : SC673RG : 8m de profondeur ;
- 2 essais de perméabilité : Lefranc et Nasberg ;
- Essais en laboratoire : 3 analyses GTR, 1 analyse sédimentométrique, 1 mesure de densité, 1 essai de cisaillement à la boîte

Secteur STEP

- 6 sondages à la pelle mécanique : PEL210RG, PEL210RG bis, PEL320RG, PEL320RG bis, PEL02RG, PEL01RG : 1,6 à 3,0 m de profondeur.
- 2 essais d'infiltration en grand de type MATSUO : dans sondage PEL01 et PEL02
- 2 sondages destructifs : PM560RG, PM01RG : 13 et 6m de profondeur, essais de chargement in situ de type pressiométrique
- 2 Sondages carotté : SC560RG et SC140RG, 8m de profondeur ;
- 4 essais de perméabilité : Lefranc ou Nasberg, dans SC560RG et SC140RG ;
- Essais en laboratoire dans les SC : 5 analyses GTR, 3 analyses sédimentométriques, 1 analyse de densité, 2 essais de cisaillement à la boîte
- Essais en laboratoires dans les Sondages à la pelle mécanique : 8 GTR, 5 sédimentométriques, 7 analyses de densité, 4 mesures de matière organique, 4 mesures de l'indice portant immédiat IPI, 4 analyses de pollution ISDI, 2 essais de cisaillement à la grande boîte, 1 essai oedométrique.

On retrouve dans la l'implantation des sondages réalisés :

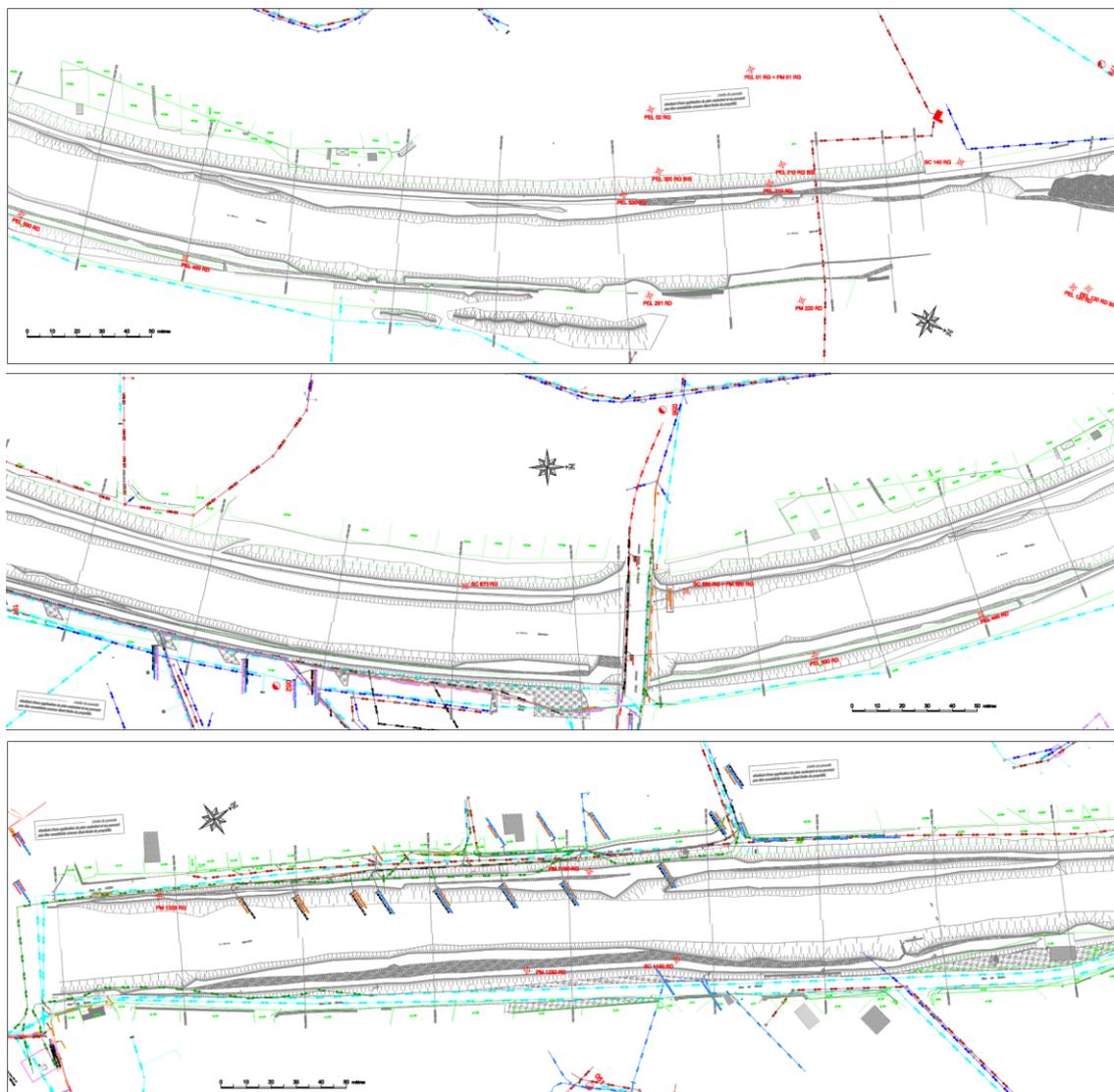


Figure 91 - Plan d'implantation des sondages de la campagne de reconnaissance de 2021 (a: PM 59RG à 465 RG ; b : PM 426RD à 870RD c: 979RD à 1380RD)

Le détail des sondages de la campagne de reconnaissance est fourni en annexes de l'annexe 4.

7.1.7 Conclusions et principes d'adaptation des ouvrages au sol – AVP

Le diagnostic de 2018 ainsi que l'étude de sensibilité de 2020 montrent que les digues objet de l'étude sont à conforter nécessairement sur l'ensemble de leur linéaire vis-à-vis des risques d'érosion externe, érosion interne (suffusion et érosion de conduit) et instabilité mécanique (glissement du talus amont).

Une actualisation spécifique de ce diagnostic à ce projet, via notamment l'intégration d'aspects transverses (emprise foncière disponible, intégration paysagère, etc.), a été réalisée et est présentée dans le document DIGP 2021-776 situé en annexe 1 de la notice globale d'AVP. Cette dernière débouche sur la définition de tronçons homogènes et la proposition de solutions de confortement adaptées à ces tronçons. Les tableaux suivants rappellent pour information le découpage en tronçons homogènes issu de cette analyse spécifique.

Tableau 38 : Découpage en tronçons homogènes – RG

	PM	RG-T-1	RG-T0	RG-T1	RG-T2	RG-T3	RG-T4	RG-T5	RG-T6	RG-T7	RG-T8	RG-T9
Début	1480	1440	1380	1350	1140	1020	590 (Pont)	455	355	225	145	
Fin		1440	1380	1350	1140	1020	605 (Pont)	455	355	225	145	50 (Confluence)

7.2 Dimensionnement de l'avant-projet de confortement

NB :

- La description complète de l'AVP est dans la partie 5.2 du présent rapport, il est question dans cette partie des éléments de justification de la tenue mécanique des aménagements envisagés.
- Le découpage en tronçons décrits dans cette partie correspond à la Figure 3 à laquelle nous renvoyons (Vue en plan de la sectorisation des digues en tronçons homogènes).
- Dans la partie précédente « Etat actuel », nous avons présenté une synthèse des éléments disponibles sur tout le système d'endiguement (Borne). Les éléments détaillés ci-après ne concernent donc que les digues du Borne rive gauche.

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

7.2.1 Principes généraux

Etant donnée 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 consiste en une **Reprise complète des tronçons d'endigements**, soit le corps de digue et la protection des talus.

Les tronçons concernés sont :

- Toisinges – Borne Rive Gauche
- STEP - Borne Rive Gauche.

Remarque : Le tronçon de Corbière ne fait pas partie du système d'endiguement, l'ouvrage n'étant pas en charge pour les crues de projet.

7.2.2 Objectif de protection

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

	Correspondance (Borne)
Crue de protection	Q100 = 178 m ³ /s
Cote des crêtes de digues	Cote Q100 + 1 m

Tableau 39 : Objectifs de protection du système d'endiguement

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

7.2.3 Rappel des profils types

Les profils types sont détaillés en partie 5.2.

7.2.4 Prescription pour répondre aux différents risques d'instabilité

7.2.4.1 Ebauche dimensionnelle des solutions de confortement

Ce paragraphe constitue l'ébauche dimensionnelle des solutions de confortement dont les principes ont été présentés dans le document dans le document en annexe 4 (G2AVP). Il vise à définir les solutions techniques envisagées et qui seront à préciser au stade PRO.

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

7.2.4.1.1 Hypothèses

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

- Cote de protection : niveau d'eau atteint pour Q100 ;
- Cote de crue extrême :
 - Globalement équivalent à la cote atteinte à Q100 à laquelle on ajoute une revanche de 1 m ;
 - Sur le tronçon situé entre les PM 303 et 455, la cote de crue extrême a été modifiée de manière à tenir compte d'un éventuel futur dépôt solide conséquence d'un abaissement des vitesses en crue à l'état projet. Ainsi, l'abaissement de ligne d'eau à Q100 qui allait jusqu'à 80 cm à l'état projet par rapport à l'état actuel n'a été considéré que partiellement à hauteur de 30 cm. Cette disposition est détaillée dans le paragraphe § 5 de la notice globale d'AVP référencée DIGP 2021-776 ;
- Hydraulique : lignes d'eau issues du modèle hydraulique de CNR
- Foncier : Cadastre
- Topographie : levé Sintegra 2017 et LIDAR 2014 & 2015
- Aspect géotechnique : Exploitation des reconnaissances Hydrogéotechnique 2017 comme réalisé pour le diagnostic de 2018 ;
- Autres matériaux :
 - Remblai : type tout venant / $c' = 0$ kPa / $f' = 30^\circ$ / $\gamma = 20$ kN/m³
 - Enrochements : blocométrie adaptée / $c' = 0$ kPa / $f' = 45^\circ$ / $\gamma = 26$ kN/m³

7.2.4.1.2 Méthodologie

L'enveloppe géométrique des ouvrages a été déterminée à partir de modèles réalisés sur le logiciel Talren v5.2.7 en utilisant la méthode de Bishop.

Blocométrie des protections en enrochements (butées et épis) :

Le poids et la taille des enrochements sont estimés à partir de la formule d'Isbach avec correction de Lane (pente de talus).

Les vitesses majorées d'écoulements pour la crue Q100 varient sur les différents tronçons entre 3.2 m/s et 4.2 m/s, **ce qui en première approche conduit à retenir une classe blocométrique de type 300/1000 kg**. L'analyse spécifique est réalisée pour chaque tronçon par la suite.

Butée de pied en enrochements – Géométrie :

L'évaluation de l'affouillement prévisible du fond du lit du Borne a été réalisé lors du diagnostic de 2018 à l'aide de la formule de Degoutte bien que celle-ci s'avère très conservatrice lorsqu'elle est utilisée sur des segments de cours d'eau homogènes. Il a alors été estimé à 1.5 à 2 m le long du Borne entre le pont de la RD1203 et la confluence pour la crue centennale en tenant compte :

- du pavage apparent du fond du lit du Borne
- de la granulométrie apparente relativement grossière des matériaux sédimentaires sous le pavage,
- de notre expérience sur des cours d'eau de géométrie et comportement similaire.

Ainsi, **les sabots de pied seront largement prolongés dans le lit, sur une longueur de 3 m en pied et 2 m en pied de bêche**, ce qui apparaît suffisant compte tenu des conditions d'encastrement initiales de la bêche en enrochements (1.2 m). Il est en effet généralement d'usage de considérer que la longueur de la bêche est égale à environ 2 fois la profondeur d'affouillement prévisible.

Epis en enrochements – Géométrie & positionnement :

La modélisation hydraulique à l'état projet au droit des zones comportant des épis fait ressortir les vitesses maximales suivantes en pied de berge :

- 4.15 m/s pour la Q100 ;
- 3.64 m/s pour la Q10.

L'application d'Isbach à partir de ces vitesses et de la géométrie d'épis proposée ci-dessus fait ressortir la nécessité d'emploi d'enrochements de diamètre D50 de 59 cm équivalent à un W50 de 400 kg. **Ainsi, en première base les enrochements à employer pour la construction des épis sont également de la classe 300/1000 kg.**

L'adaptation spécifique aux tronçons présentant un confortement par épis est réalisée dans les paragraphes suivants.

7.2.4.1.3 Résultats par tronçons

7.2.4.1.3.1 Seuil double rampe

Le nouveau seuil est composé de deux rampes pentues à 1V/30H.

Les modélisations hydrauliques font ressortir les vitesses d'écoulement suivantes :

- 3.6 m/s dans l'état actuel, pour Q₁₀₀, au droit du seuil actuel ;
- 3.7 à 4 m/s pour l'état projeté, pour Q₁₀₀, au droit du seuil projeté.

De manière conservatrice, on retiendra une vitesse de 4.6 m/s (hors majoration) pour le dimensionnement de ce seuil.

Ainsi, l'application de la formule d'Isbach fourni un poids moyen W₅₀ de 630 kg, soit une classe d'enrochements de 300/1000 kg telle que préconisée pour les butées de pied en enrochements proposées sur certains tronçons.

Ainsi, l'épaisseur des seuils sera de 1.3 m minimum (soit 2 fois le D₅₀).

A noter qu'en plus de la survitesse considérée de manière arbitraire, cette application intègre un coefficient multiplicateur de 1.2 à la vitesse pour le calcul du poids moyen d'enrochements.

Une optimisation sera proposée au stade PRO via la mise à jour du modèle hydraulique en intégrant notamment les fonds présumés traduisant des engravements/surcreusements projetés à termes. Cette mise à jour du modèle hydraulique sera également utilisée pour le

recalage des crêtes d'endiguement sur les tronçons situés au plus proches de la confluence avec l'Arve, soit RD-T7, RG-T8 et RG-T9.

7.2.4.1.3.2 Protection de talus sous le pont de Toisinges

La protection de talus sous le pont de Toisinges est actuellement assurée par des enrochements dressés aléatoirement.

En l'absence de documents (plans et notes de calculs) décrivant la protection d'origine et/ou actuelle, il est proposé de reprendre la protection de talus sous le pont de Toisinges à l'aide d'enrochements calibrés, de classe minimale 300/1000 kg, et dressés soigneusement. Il est également proposé de réaliser une percolation des enrochements qui composent la base de cette protection de manière à avoir une assise stable et robuste.

Il conviendra en phase PRO de recueillir les documents décrivant la protection de talus existante afin de définir la solution de confortement la plus adaptée au vu des actions du Borne mais également des actions apportées par le pont (charges routières par exemple).

7.2.4.1.3.3 Tronçons homogènes

Il est donné pour chaque tronçon les résultats des éléments de dimensionnement sans rentrer dans les détails de calculs. La synthèse est illustrée par une coupe type propre à chaque tronçon.

Pour rappel, la justification générale du profil type proposé pour chaque tronçon a été réalisée et détaillée dans le document de définition des tronçons homogènes référencé DIGP 2021-776 et donné en annexe 1 de la notice globale d'AVP.

7.2.4.1.3.3.1 RG – T1 (tronçon hors système d'endiguement)

Détail du principe :

La rampe amont s'établit entre l'amont immédiat de la sortie parking et le passage sous le pont amont du Pont Royal en conservant une lame d'air sous ce pont de 2.3 m. Cela permettrait la tenue d'une piste à la pente moyenne de 6,5 % sur environ 40 m.

Le soutènement de la piste cyclable pourrait alors être assuré par :

- Talus haut compris entre la voirie et la piste :
 - Un soutènement vertical de type mur entre les profils P1 et P7.
 - Une adaptation du mur de soutènement existant entre les profils P7 et P10 avec notamment une reprise en sous œuvre (voir § dimensionnement) ;
- Talus bas entre la piste et le Borne :
 - Un soutènement pentu à 1H/1V ou plus raide entre les profils P1 et P7. Ceci implique la mise en place d'un soutènement robuste de type enrochements percolés au béton.
 - Un soutènement pentu à 3H/2V du profil P8 au P10. Ceci implique la possibilité de mise en place d'une protection de berges en technique mixte (butée en enrochements jusqu'à Q2 et protection végétale au-dessus).

Aspect hydraulique :

D'après la modélisation hydraulique, la piste cyclable sur ce tronçon est située au-dessus de la cote Q₅.

Dimensionnement :

Soutènement haut :

Profils P1 à P7 :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-27.17 - BORNE RIVE GAUCHE



D'après la topographie disponible, le mur de soutènement présenterait une hauteur totale comprise environ entre 2 m au P1 et 4.1 m au P7, répartie de la manière suivante :

- 0,87 m de fiche dans le sol pour création d'une butée de pied et fondation hors gel du mur ;
- 0 m au P1 à 2 m au P7 (jonction avec le mur existant) pour soutènement ;
- 1,10 m pour sécurisation de la voirie.

Le mur de soutènement sera dimensionné en phase PRO en utilisant, si possible, les données géotechniques recueillies pour la construction récente du pont amont.

Profils P7 à P10 :

Le mur de soutènement existant est fondé à la cote de 452.00 avec une plateforme remblayée à 452.83 côté Borne, alors que la piste cyclable est calée à une cote finie de 452.15 au P8 et en-dessous par la suite jusqu'à atteindre la cote finie minimale de 451.50 au profil P10 (jonction avec la culée du pont).

Les travaux de mise en oeuvre de la piste cyclable vont avoir comme conséquences notables de :

- Modifier significativement l'état de poussée/butée pour lequel l'ouvrage a été dimensionné et conçu en terrasant le remblai situé devant le mur ;
- Nécessiter une reprise du soutènement en sous oeuvre entre les profils P8 et P10 de par le terrassement à une cote inférieure à la base de la semelle du mur existant ;
- Supprimer la mise hors gel du mur.

A ce stade, on considère que :

- En l'absence de données de conception (plans de ferrailage, notes de calculs, etc.), la modification de l'état de poussée/butée ne vient pas remettre en cause la stabilité du mur actuel ;
- La mise hors gel du mur existant n'est plus assurée sans pour autant remettre en cause l'intégrité de l'ouvrage actuel.

Un travail d'étude devra être mené au stade PRO de manière à détailler davantage les solutions de soutènement à mettre en oeuvre entre les profils P7 et P10 au vu de la configuration de site (aspect géotechnique, mur existant, caractéristiques de la chaussée, etc.) et des spécifications du maître d'ouvrage (aspect fini, hors gel, etc.).

Soutènement bas :

P1 à P7 :

Entre le profil P1 et P7, le soutènement bas qui présentera une pente comprise entre 0.55H/1V et 3H/2V consisterait en une technique robuste de type enrochements percolés au béton.

Ce soutènement sera dimensionné en phase PRO en utilisant, si possible, les données géotechniques recueillies pour la construction récente du pont amont.

P7 à P10 :

Sur ce tronçon, un talus pentu à 3H/2V peut être introduit sans réduire la largeur du Borne. Dans ce cas, le talus pourrait être réalisé de la manière suivante :

- Une butée de pieds en enrochements du même type que celle réalisée sur les autres profils et ce jusqu'à la cote de Q2 ;
- Une partie superficielle de talus protégée par une technique végétale (en fonction du rampant de talus disponible). A ce stade il semble néanmoins compliqué de pouvoir mettre en œuvre cette technique de par le faible rampant disponible. Ainsi, et par souci d'unicité structurelle et visuelle, il est convenu de mettre en œuvre des enrochements libres tels que précisé dans les figures suivantes.

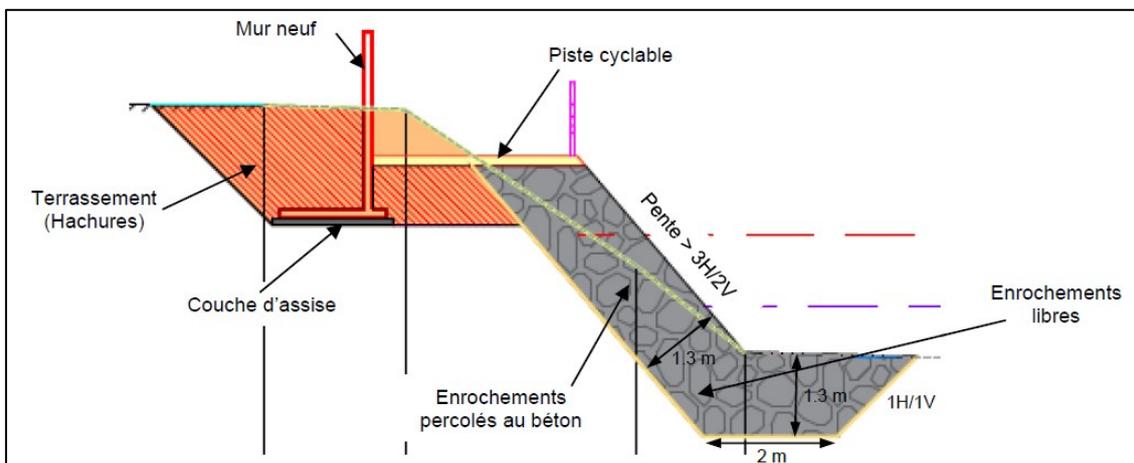


Figure 92 : RG-T(-1) – P1 à P7 – Coupe type (ici P4)

RG-T1 – Rampe aval :

La rampe aval s'établit entre le passage sous le pont aval du Pont Royal et le PM 1347 environ où le TN s'établit à la cote de crue extrême. Cela permet la tenue d'une piste à la pente moyenne de 5,9 % sur environ 40 m.

Le débouché aval se ferait directement sur la rue en Caillat et permettrait un croisement des modes de circulation entre les piétons, les engins de chantier qui peuvent emprunter la voie surveillance mise en place en crête de digue et les cycles qui emprunteront la piste cyclable installée en pied aval.

Le soutènement de la piste cyclable serait alors assuré par :

- Talus haut compris entre la voirie et la piste : un soutènement vertical de palplanches avec un habillage en gabions ;
- Talus bas entre la piste et le Borne : un talus pentu à 3H/2V présentant une protection mixte de type butée de pieds en enrochements jusqu'à Q2 et techniques végétales au-dessus (si rampant suffisant disponible).

Aspect hydraulique :

D'après la modélisation hydraulique, la piste cyclable sur ce tronçon est située au-dessus de la cote Q5.

Dimensionnement :

Soutènement haut :

D'après la topographie disponible, en considérant une fiche équivalente à 2 fois la hauteur visible de par l'absence de données géotechniques disponibles et de manière à avoir un rideau

homogène et qui s'établit dans la continuité du rideau plus en aval, le soutènement en palplanches présenterait une hauteur totale d'environ 12 à 13.5 m.

Un habillage en gabions serait mis en œuvre dans les ondes de palplanches afin d'avoir un aspect plus naturel.

La sécurisation de la voirie serait assurée comme actuellement par une glissière de sécurité routière.

Un travail d'étude devra être mené au stade PRO de manière à détailler davantage les solutions de soutènement à mettre en œuvre entre les profils P14 et P19 (notamment le dimensionnement du rideau de palplanches) au vu de la configuration de site (aspect géotechnique, caractéristiques de la chaussée, etc.) et des spécifications du maître d'ouvrage (aspect fini, etc.).

A noter qu'un mur de soutènement est présent au contact de la culée du pont. Il conviendra de recueillir des éléments sur la conception de ce mur pour venir y intégrer le prolongement par rideau de palplanches nécessaire au soutènement de la piste.

Soutènement bas :

Sur ce tronçon, un talus pentu à 3H/2V peut être introduit sans réduire la largeur du Borne. Dans ce cas, le talus serait réalisé de la manière suivante :

- Une butée de pieds en enrochements du même type que celle réalisée sur les autres profils présentant une butée de pied et ce jusqu'à la cote de Q₂ ;
- Une partie superficielle de talus protégée par une technique végétale (en fonction du rampant de talus disponible). A ce stade le rampant semble assez faible, la protection en enrochements a donc été dessinée sur l'ensemble du talus.

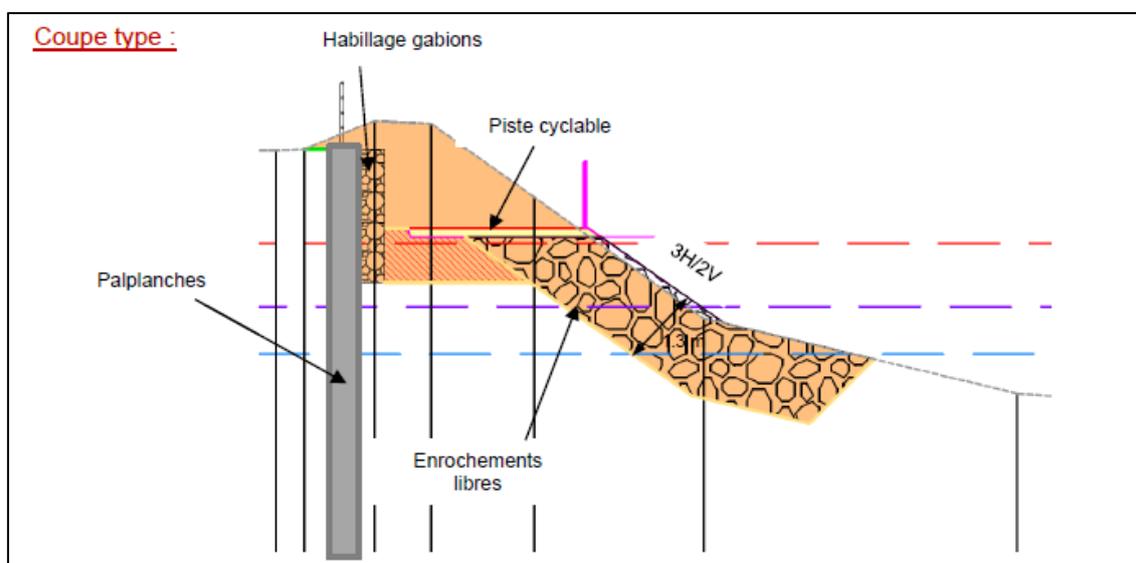


Figure 93 : RG-T1 – Coupe type (ici P18)

7.2.4.1.3.3.2 RG – T2

Dimensionnement :

Auto-stabilité :

Les palplanches sont dites autostables si elles ont la capacité de jouer le rôle de soutènement des terres côté val dans les conditions actuelles et également en cas de disparition de l'ouvrage d'endiguement actuel situé entre le lit mineur du Borne et le futur rideau de palplanches (par érosion externe et/ou glissement par exemple).

L'auto-stabilité des palplanches constitue le facteur prépondérant dans le dimensionnement des palplanches.

Aucun essai pressiométrique n'ayant été réalisé sur cette zone, le dimensionnement se fait sur la base du REX CNR, c'est-à-dire une profondeur de fiche correspondant à 2 fois la longueur hors sol, soit une longueur totale de 12 m.

Concernant le type de palplanches, il est possible de considérer en première approche des PU12. Ceci sera à adapter en fonction des résultats d'essais pressiométriques réalisés sur site en 2020.

Enveloppe géométrique :

Les talus amont et val ne seront pas modifiés. Par contre, la digue sera arasée à la cote de crue extrême. La crête présentera alors une largeur comprise entre 2.9 et 4.7 m, ce qui permettrait :

- D'intégrer une voie partagée cycliste / piéton pour les tronçons de largeur de crête inférieure à 4 m. Cela représente 97 m (PM 1347 à PM 1250) ;
- D'intégrer deux voies séparées cycliste / piéton pour les tronçons de largeur de crête supérieure à 4 m. Cela représente 110 m (PM 1250 à PM 1140) ;
- D'utiliser la crête pour la circulation de l'exploitant dans le cadre des tournées de surveillance d'ouvrage.

Néanmoins, à ce stade il est prévu d'installer la piste cyclable en pied côté val.

Épis – Impact hydraulique :

Des épis ont été intégrés dans une optique de diversification bioécologique du cours d'eau. Ils peuvent également ralentir le phénomène d'érosion externe en diminuant les vitesses d'écoulement en pied de digue.

Le tableau suivant présente les moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté concernant les vitesses d'écoulement.

Les épis ne réduisent pas significativement les vitesses d'écoulement en pied de digue. Leur utilité reste donc uniquement bioécologique et non pas structurelle. Cette inefficacité à réduire le phénomène d'érosion externe ne remet pas en cause la viabilité de la solution de confortement, ces épis ayant été intégrés de façon additionnelle pour un autre but. La solution proposée à l'AVP 2018 serait celle qui permettrait de supprimer le risque d'érosion externe.

Épis – Blocométrie :

L'utilisation de la formule d'Isbach avec la vitesse maximale de 4.12 m/s obtenue par modélisation après intégration des épis reste dans la gamme de celle utilisée pour le dimensionnement général. Ce dimensionnement reste donc valable et des enrochements de la classe 300/1000 kg devront être employés.

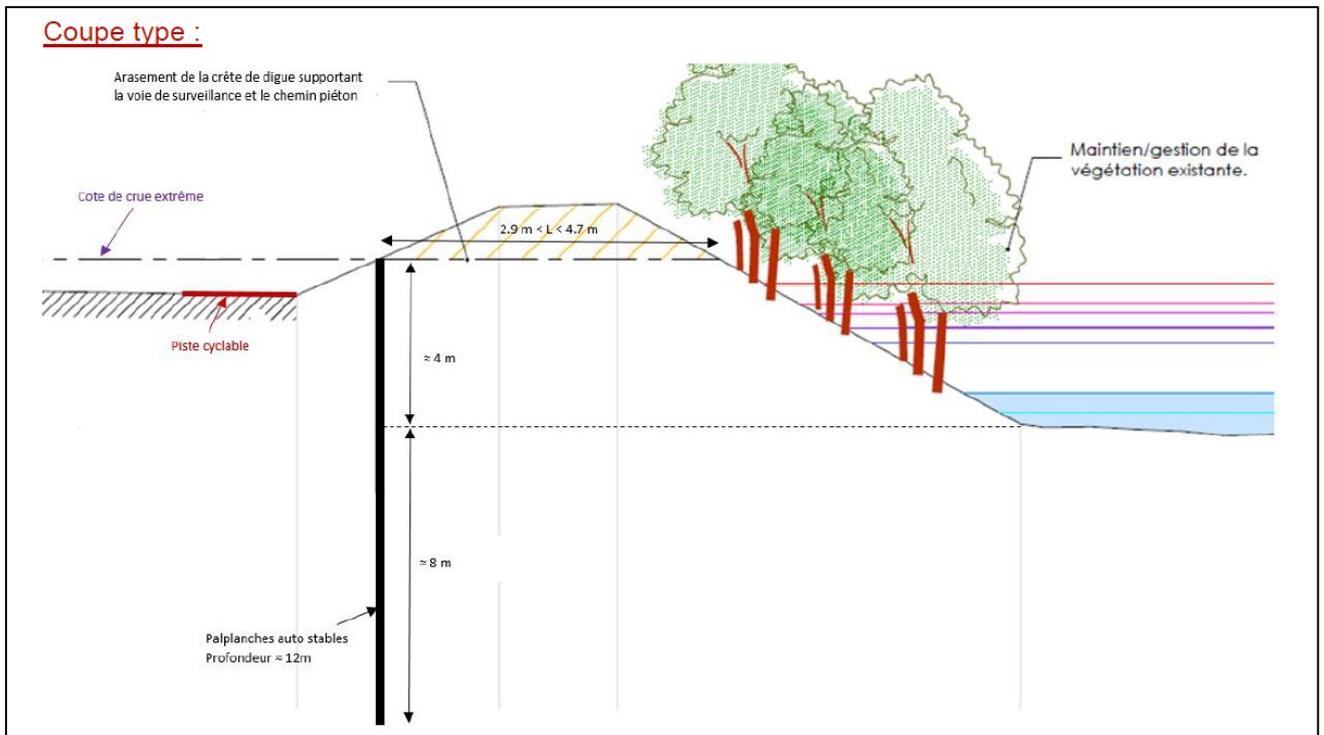


Figure 94 : RG-T2 – Confortement solution 1 – Coupe type

7.2.4.1.3.3.3 RG – T3

L'ensemble de la réflexion est identique au paragraphe précédent aux différences près suivantes :

- Le franc-bord dispense de la mise en place d'épis en pied ;
- Quelle que soit la solution retenue, l'arasement de la digue permettrait d'obtenir une largeur de crête de 4.5 m minimum, permettant la mise en place de deux voies séparées en crête si cette variante venait à être retenue.

Dimensionnement :

Le dimensionnement est identique au profil précédent dans le sens où la seule différence qui résulte entre ces deux tronçons est la présence d'un franc-bord.

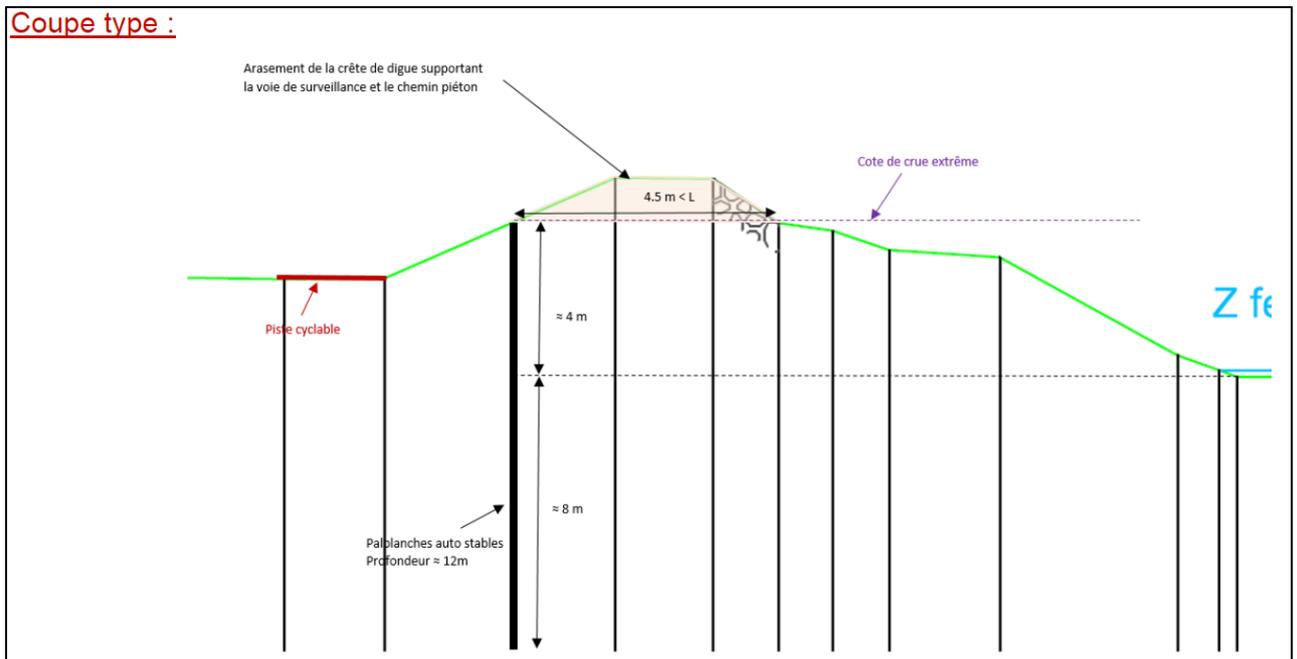


Figure 95 : RG-T3 – Confortement – Coupe type

7.2.4.1.3.3.4 RG – T4

Il serait possible de mettre en place cette nouvelle digue aux caractéristiques géométriques suivantes :

- Hauteur comprise entre 2 et 3.3 m ;
- Largeur en crête de 4 m ;
- Talus amont raidi à la verticale par emploi de remblai renforcé en géogrilles ;
- Talus aval raidi par renforcement en géogrilles selon l'espace foncier disponible.

Végétation :

De manière à ne pas favoriser le risque d'érosion interne par conduit, l'épaulement devra être maintenu exempt de végétation ligneuse et une distance minimale de 5 m non végétalisée par des ligneux sera intégrée entre le talus amont de l'épaulement et le talus amont de l'ancienne digue où les boisements sont maintenus.

Remblai renforcé :

Le renforcement du remblai par géogrilles devra être réalisé au stade exécution par l'entreprise de travaux en utilisant les normes en vigueur.

Epis – Impact hydraulique :

Des épis ont été intégrés dans une optique de diversification bioécologique du cours d'eau. Ils peuvent également ralentir le phénomène d'érosion externe en diminuant les vitesses d'écoulement en pied de digue.

Le tableau suivant présente les moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté concernant les vitesses d'écoulement.

Les épis ne réduisent pas significativement les vitesses d'écoulement en pied de digue. Leur utilité reste donc uniquement bioécologique et non pas structurelle. Cette inefficacité à réduire le

phénomène d'érosion externe ne remet pas en cause la viabilité de la solution de confortement, ces épis ayant été intégrés de façon additionnelle pour un autre but.

La solution proposée à l'AVP 2018 serait celle qui permettrait de supprimer le risque d'érosion externe.

Épis – Blocométrie :

L'utilisation de la formule d'Isbach avec la vitesse maximale de 3.97 m/s obtenue par modélisation après intégration des épis débouche sur la nécessité d'employer des enrochements de diamètre D_{50} de 54 cm soit un W_{50} de 310 kg.

Pour ces épis, des enrochements de type 300/1000 kg pourrait être utilisés, comme proposé dans le dimensionnement général des épis.

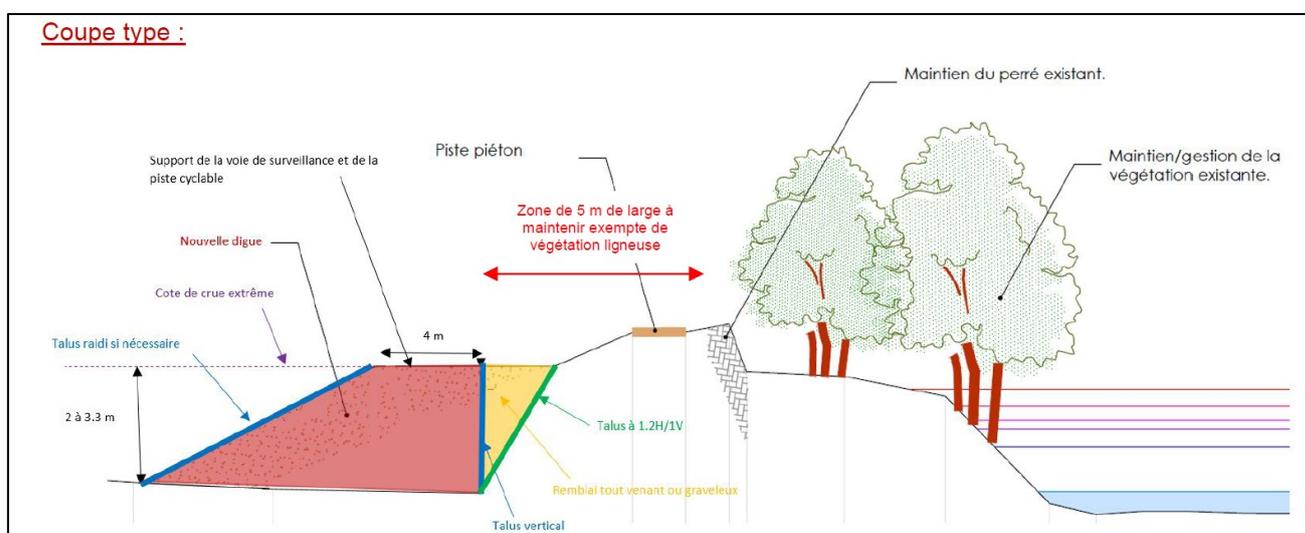


Figure 96 : RG-T4 – Confortement – Coupe type

7.2.4.1.3.3.5 RG – T5

Il sera possible de mettre en place cette nouvelle digue aux caractéristiques géométriques suivantes :

- Hauteur comprise entre 1.8 et 2.7 m ;
- Largeur en crête de 4 m ;
- Talus amont raidi à la verticale par emploi de remblai renforcé en géogrilles ;
- Talus aval raidi selon l'espace foncier disponible jusqu'à la pente maximale de 1.75H/1V environ.

Végétation :
Idem précédent.

Matériaux :

Les matériaux utilisés pour le remblai devront satisfaire les critères de stabilité vis-à-vis des problématiques d'érosion interne, soit principalement :

- Un critère adapté aux matériaux rencontrés et envisagés pour les remblais. Dans la lignée de l'étude de diagnostic, il est proposé de considérer :

- Le critère de Li & Fannin (fusion des critères de Kezdi et Kenney & Lau) pour les fractions granulométriques < 35% (estimation conservatrice) avec $F(d)$ le pourcentage massique des grains inférieur au diamètre d et $H(d) = F(4d) - F(d)$;
- Le critère de Burenkova en gardant à l'esprit ses limitations (expérimentation pour des diamètres maximaux de 100 mm et un CU maximal de 200).

Ces approches sont conservatives et ne tiennent pas compte du degré de porosité et/ou de compacité des remblais mis en œuvre. D'autres approches pourraient être utilisées, le cas échéant pour définir la possibilité d'emploi des matériaux envisagés tout en considérant les limites associées à chaque méthodologie.

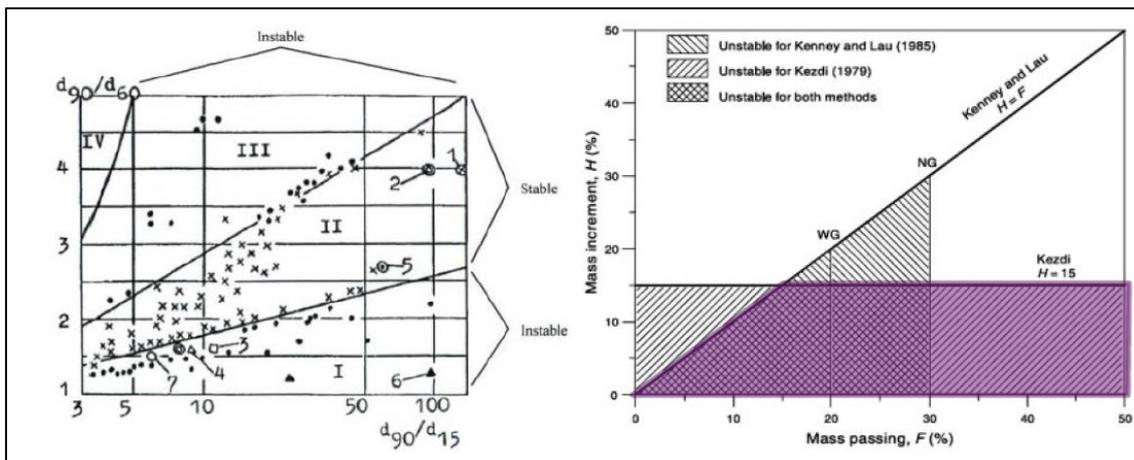


Figure 97 - Résultats des expérimentations de Burenkova (1993, à gauche) et Li&Fannin (2008, à droite).

- Le critère de Terzaghi (ratio $D_{85}/d_{15} < 4$) pour le phénomène d'érosion de contact entre le corps de digue et sa fondation ;
- La possibilité de tenue de fissure en fonction de la fraction en fines de diamètre < 0.075 mm, de la plasticité et de la saturation du remblai (ce dernier étant compacté lors de sa mise en oeuvre), ceci dans le cadre du phénomène d'érosion de conduit.

Globalement, il conviendra de vérifier en particulier que les fuseaux granulométriques des matériaux pressentis ne présentent pas d'éléments grossiers ($D_{max} < 80$ mm, le cas échéant, ils devront être éliminés).

Par ailleurs, les courbes granulométriques des matériaux de remblai devront être suffisamment étalées et continues.

Enfin, les matériaux de remblai devront être exempts de matériaux évolutifs (organiques, etc.). Les tourbes, terre végétale, et remblais anthropiques au sens large du terme sont à proscrire.

Les reconnaissances géotechniques réalisées en préalable de la mission G2PRO seront utilisées, en complément des données existantes, au stade PRO de manière à statuer sur la possibilité mécanique de réemploi des déblais issus de l'aménagement des autres tronçons.

Si de tels matériaux ne pouvaient être obtenus en quantité et qualité suffisante pour la réalisation des ouvrages projetés, il conviendrait de modifier la conception des ouvrages en ajoutant des couches filtres et/ou en les remplaçant par des ouvrages de protection zonés à membrane interne (géomembrane ou béton bitumineux) ou à paroi d'étanchéité (paroi mince ou épaisse) qui s'avèreront de réalisation plus délicate et coûteuse.

Remblai renforcé :

Le renforcement du remblai par géogrilles devra être réalisé au stade exécution par l'entreprise de travaux en utilisant les en vigueur.

Epis – Impact hydraulique :

Des épis ont été intégrés dans une optique de diversification bioécologique du cours d'eau. Ils peuvent également ralentir le phénomène d'érosion externe en diminuant les vitesses d'écoulement en pied de digue.

Le tableau suivant présente les moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté concernant les vitesses d'écoulement.

Les épis ne réduisent pas significativement les vitesses d'écoulement en pied de digue. Leur utilité reste donc uniquement bioécologique et non pas structurelle. Cette inefficacité à réduire le phénomène d'érosion externe ne remet pas en cause la viabilité de la solution de confortement, ces épis ayant été intégrés de façon additionnelle pour un autre but.

La solution proposée à l'AVP 2018 serait celle qui permettrait de supprimer le risque d'érosion externe.

Epis – Blocométrie :

L'utilisation de la formule d'Isbach avec la vitesse maximale de 3.29 m/s obtenue par modélisation après intégration des épis débouche sur la nécessité d'employer des enrochements de diamètre D50 de 37 cm soit un W50 de 100 kg.

Pour ces épis, des enrochements de type 40/200 kg pourraient être utilisés. Néanmoins, pour garder une cohérence avec les autres tronçons, il est proposé de mettre en œuvre des enrochements de type 300/1000 kg.

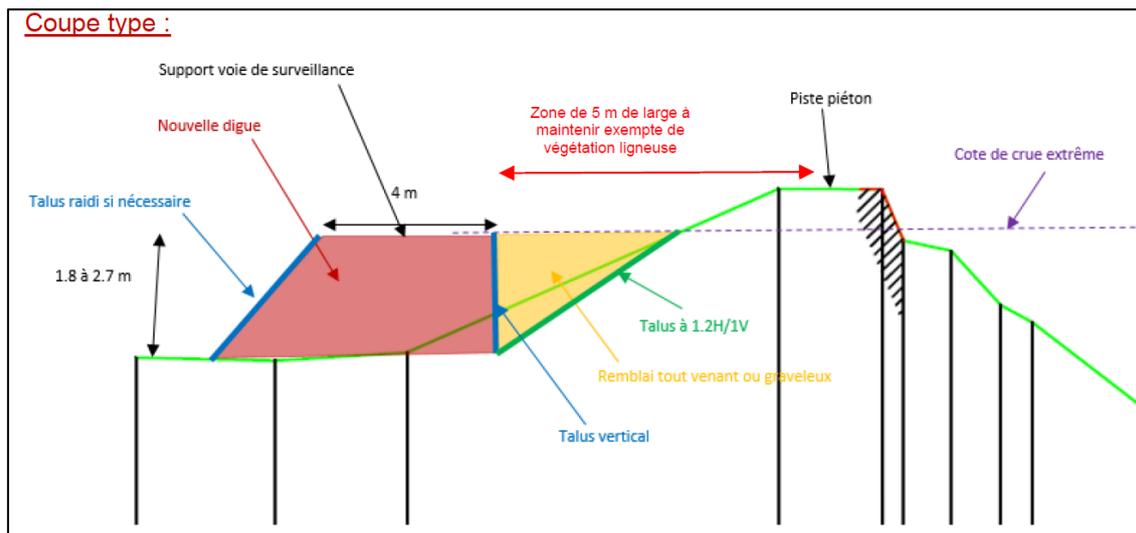


Figure 98 : RG-T5 – Confortement – Coupe type

7.2.4.1.3.3.6 RG – T6

Dimensionnement :

Protection amont :

- Blocométrie : La modélisation hydraulique fait ressortir une vitesse maximale en pied de talus pour la cote de protection (Q100) de l'ordre de 3.6 m/s, les conclusions du paragraphe § 7.1.5.3 restent valables.
- Dimensions du sabot : En considérant les éléments évoqués auparavant, le sabot devra avoir les dimensions minimales suivantes :
 - Epaisseur = 1,3 m (2 fois le D50)
 - Largeur de bêche = 2 m en partie inférieure et supérieure à 3 m en partie supérieure

- **Hauteur enrochements** : L'arase supérieure des enrochements a été calée en première approche à la cote du niveau des eaux moyennes de Mai + 0.20 m. A cette cote, la modélisation hydraulique fait ressortir des vitesses d'écoulement de l'ordre de 1.7 à 2.2 m/s.

Des techniques végétales de type plants et plançons par exemple, pourraient s'avérer suffisantes pour contrer le phénomène d'érosion externe au-dessus de la butée de pied en enrochements. Dans le cas contraire, la cote des enrochements pourra être réhaussée.

Des techniques écologiques de type plants et plançons par exemple, pourraient s'avérer suffisantes pour contrer le phénomène d'érosion externe au-dessus de la butée de pied en enrochements. Dans le cas contraire, la cote des enrochements pourra être réhaussée.

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurelle Talren a été réalisée sur le profil 426RG. L'ensemble des réflexions réalisées ne sont pas mentionnés. Le tableau suivant synthétise les résultats de calcul obtenus pour la géométrie retenue tandis que les résultats globaux sont disponibles dans le rapport complet G2 AVP.

Le talus val serait justifié au glissement pour une pente de 2.5H/1V. Néanmoins, l'emprise foncière disponible côté val empêche cette disposition tant et si bien qu'il convient de raidir le talus val en utilisant un remblai renforcé de géogrilles.

Matériaux :

Idem Tronçon T5, cf 7.2.4.1.3.3.5.

Drainage :

Le parement côté val pourra être protégé par une couche de matériau sablo-graveleux drainant qui permettra de diminuer la charge piézométrique dans l'ouvrage et de drainer les eaux de ruissellement en direction du pied aval, éventuellement dans un dispositif de drainage en pied dont le rejet est à étudier.

Des matériaux de ce type devraient pouvoir être tirés des déblais à venir dans le cadre de la mise en oeuvre de l'ensemble des solutions de confortement.

Remblai renforcé :

Le renforcement du remblai par géogrilles devra être réalisé au stade exécution par l'entreprise de travaux en utilisant les normes en vigueur.

Végétation :

Pour rappel, il est proposé de conforter :

- le tronçon RG-T5 à l'aide d'un épaulement aval permettant de conserver la végétation ligneuse dense actuelle.
- le tronçon RG-T7 en introduisant une nouvelle digue reculée côté val tout en conservant la végétation actuelle présente entre la digue actuelle et la future digue.

Le tronçon RG-T6 présente une digue mise en charge assez rapidement et qui nécessite une protection de type mixte afin de protéger le talus amont vis-à-vis du risque d'érosion externe.

Ainsi, afin de permettre la mise en oeuvre de la technique mixte sur le talus amont sans augmenter le risque d'érosion interne par érosion de conduit initiée par le développement du système racinaire de la végétation, et maintenir une continuité du cordon de végétation en bordure du Borne avec les tronçons adjacents, il a été proposé d'intégrer une coupure mécanique par palplanches. La profondeur a été fixée arbitrairement de manière à ce que la fiche se situe à 1 m sous le TN et ces palplanches n'ont pas été dimensionnées suivant l'aspect hydraulique (coupure hydraulique) ou structurelle (soutènement).

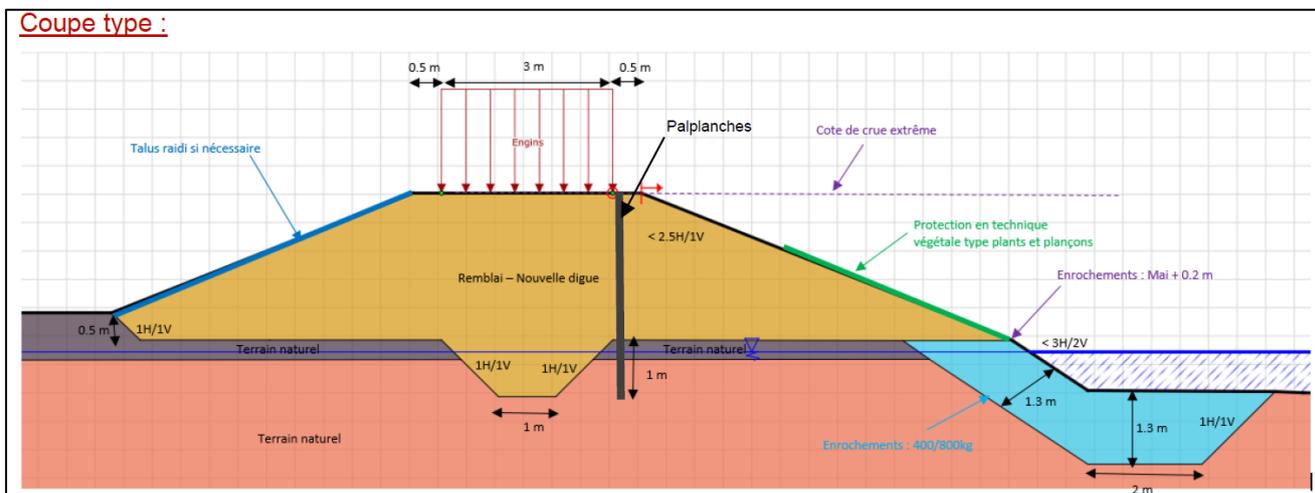


Figure 99 : RG-T6 – Confortement – Coupe type

7.2.4.1.3.3.7 RG – T7

Dimensionnement :

Cote de crue extrême :

Pour ce tronçon, la cote de crue extrême a été déterminée en considérant :

- Une revanche spécifique à ce tronçon (voir notice d'AVP) ;
- Les résultats du modèle hydraulique du Borne à l'état projet pour une crue centennale de ce dernier associé à une crue de période de retour 30 ans de l'Arve. Ce modèle s'appuie sur le plafond actuel du Borne.

Or, la modification de la zone de confluence (seuils et élargissement du lit du Borne) viendra vraisemblablement modifier la cote de plafond du Borne entre le nouveau seuil et la confluence avec l'Arve, tel que précisé dans le profil en long dont un extrait en aval du PM 400 est rappelé ci-après.

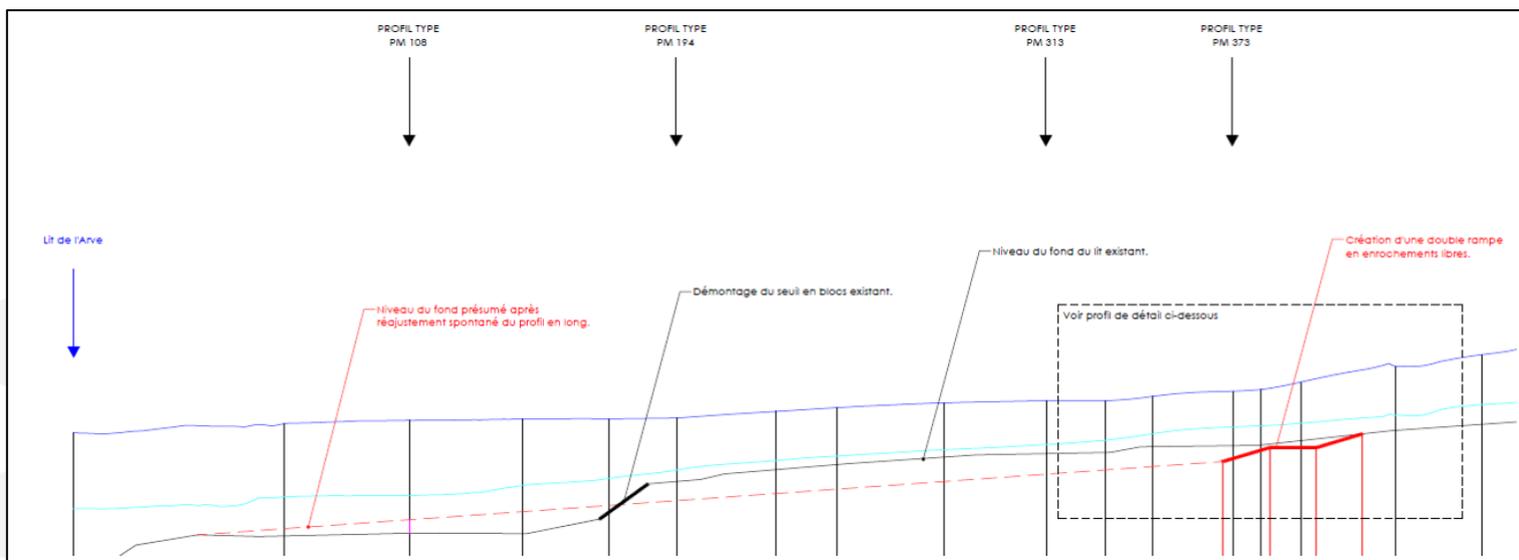


Figure 100 : Profil en long du Borne conforté – Tronçon aval au PM400

Ainsi, la cote de crue extrême considérée pour le dimensionnement des ouvrages des tronçons RG-T7 à T9 :

- Restera vraisemblablement valide et conservative sur le tronçon situé entre le nouveau seuil et le seuil existant, soit RG-T7 ;
- Devra potentiellement être revue à la hausse sur les tronçons RG-T8 et T9 du fait d'un potentiel engrèvement léger du Borne.

Il conviendra en phase PRO de réaliser les actions suivantes :

- 1. Définir la nécessité de reprendre le modèle hydraulique du Borne sur ce tronçon en intégrant les fonds projetés à terme ;
- 2. Revoir les cotes de crues extrêmes des tronçons RG-T7 à T9 en intégrant le point précédent dans le modèle du Borne et en utilisant les résultats issus du modèle hydraulique de l'Arve.

Hauteur de digue :

L'exploitation de la topographie et du modèle hydraulique rend compte d'une digue qui devra présenter une hauteur comprise entre 1 et 2.7 m par rapport au TN actuel pour protéger le côté val à la cote de crue extrême.

Pour le dimensionnement, il a été choisi de modéliser une digue théorique de hauteur maximale, soit 2.7 m.

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurelle Talren a été réalisée sur le profil théorique P1RG1. L'ensemble des réflexions réalisées n'est pas mentionné.

Il est possible d'en conclure l'enveloppe géométrique envisageable suivante :

- Hauteur : 1 à 2.7 m ;
- Largeur en crête : 4 m ;
- Talus amont pentu à minimum 2.5H/1V
- Talus aval pentu à minimum 2.5H/1V.

Matériaux :

Idem Tronçon T5

Drainage :

Idem Tronçon T6

Protection de talus amont :

L'objectif est d'avoir une digue présentant un aspect au plus naturel possible, c'est-à-dire sans protection amont lourde de type dalles béton et/ou enrochements.

En première approche, en considérant le profil 210 RG qui se situe en extrémité aval, on obtient une vitesse en pied amont de l'ordre de 2.1 m/s. Ainsi, la protection du pied amont par une butée en enrochements n'est pas nécessaire, la mise en œuvre d'une géogrille tridimensionnelle permettra le cas échéant de protéger le pied de talus ou des protections végétales.

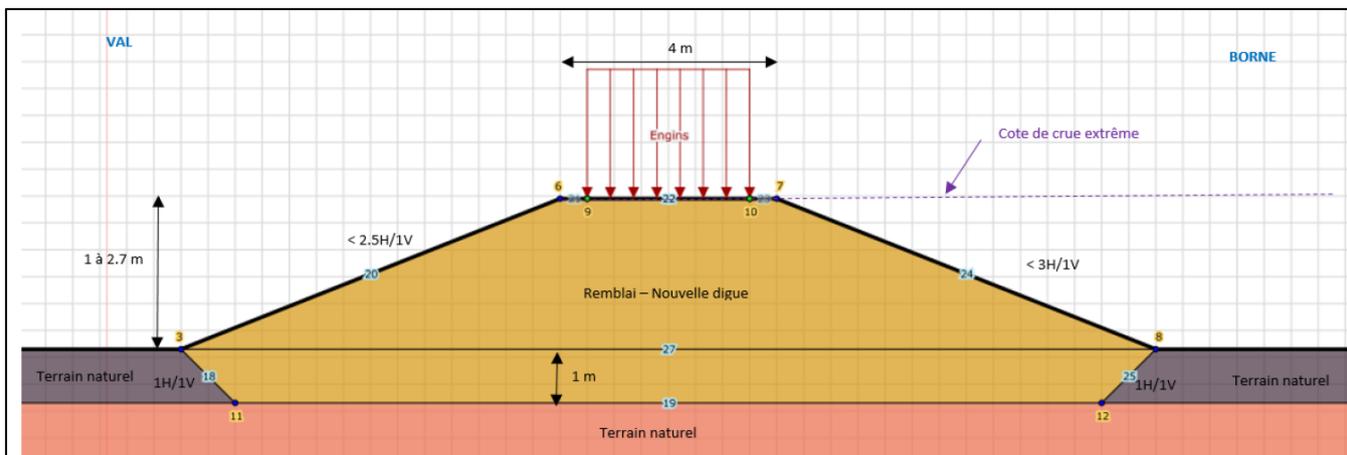


Figure 101 : RG-T7 – Confortement – Coupe type

7.2.4.1.3.3.8 RG – T8

Dimensionnement :

Cote de crue extrême :

Idem Tronçon T6

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurelle Talren a été réalisée sur le profil du PM145 conforté.

L'ensemble des réflexions réalisées ne sont pas mentionnés.

Il est donc possible d'en conclure l'enveloppe géométrique envisageable suivante :

- Largeur en crête : 4 m ;
- Talus amont pentu à minimum 2.5H/1V
- Talus aval pentu à minimum 2.5H/1V.

Matériaux :

Idem Tronçon T5

Drainage :

Idem Tronçon T6

Protection amont :

L'objectif est d'avoir une digue présentant un aspect au plus naturel possible, c'est-à-dire sans protection amont lourde de type dalles béton et/ou enrochements.

En première approche, la modélisation hydraulique de l'état projeté fait ressortir une vitesse maximale en pied amont de l'ordre de 1.9 m/s. Ainsi, la conclusion du paragraphe précédent reste valable.

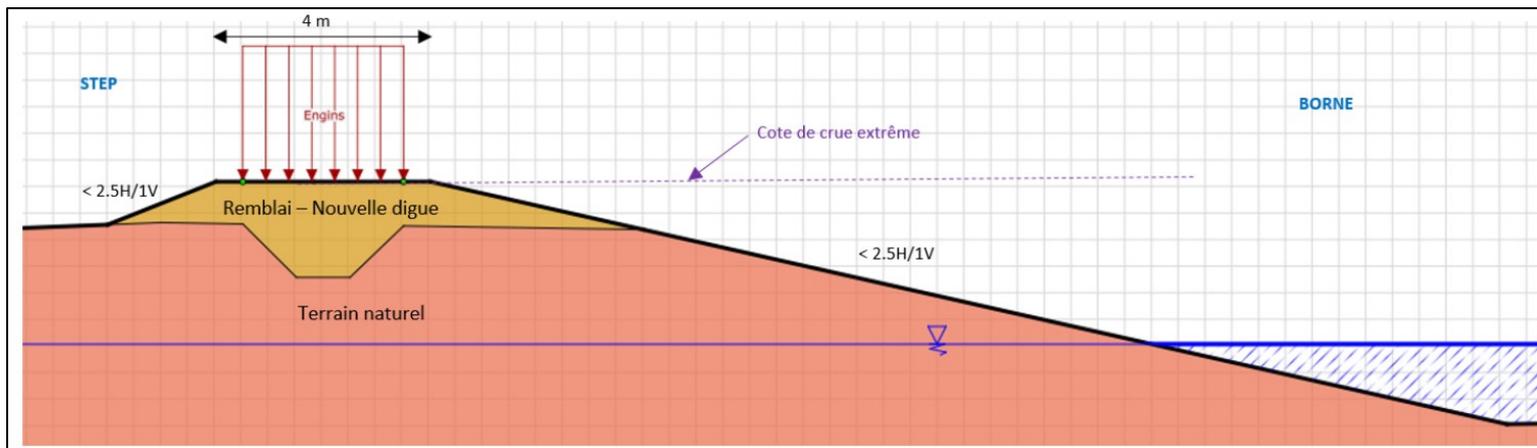


Figure 102 : RG-T8 – Confortement – Coupe type

7.2.4.1.3.3.9 RG – T9

Dimensionnement :

Contrairement au tronçon précédent, la digue présente un important franc-bord protégeant son pied vis-à-vis des risques d'érosion externe et à fortiori de glissement, tant et si bien que la protection de talus en enrochements n'est plus nécessaire.

Cote de crue extrême :

Idem Tronçon T6

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurale Talren a été réalisée sur le profil théorique 115RG. L'ensemble des réflexions réalisées ne sont pas mentionnés.

Il est donc possible d'en conclure l'enveloppe géométrique envisageable suivante :

- Largeur en crête : 4 m ;
- Talus amont pentu à minimum 2.5H/1V
- Talus aval pentu à minimum 2.5H/1V

Matériaux :

Idem Tronçon T5

Drainage :

Idem Tronçon T6

Protection :

L'objectif est d'avoir une digue présentant un aspect au plus naturel possible, c'est-à-dire sans protection amont lourde de type dalles béton et/ou enrochements.

En première approche, la modélisation hydraulique de l'état projeté au niveau du profil 145RG qui est le profil modélisé le plus proche de ce tronçon fait ressortir une vitesse maximale en pied amont de l'ordre de 1.5 m/s.

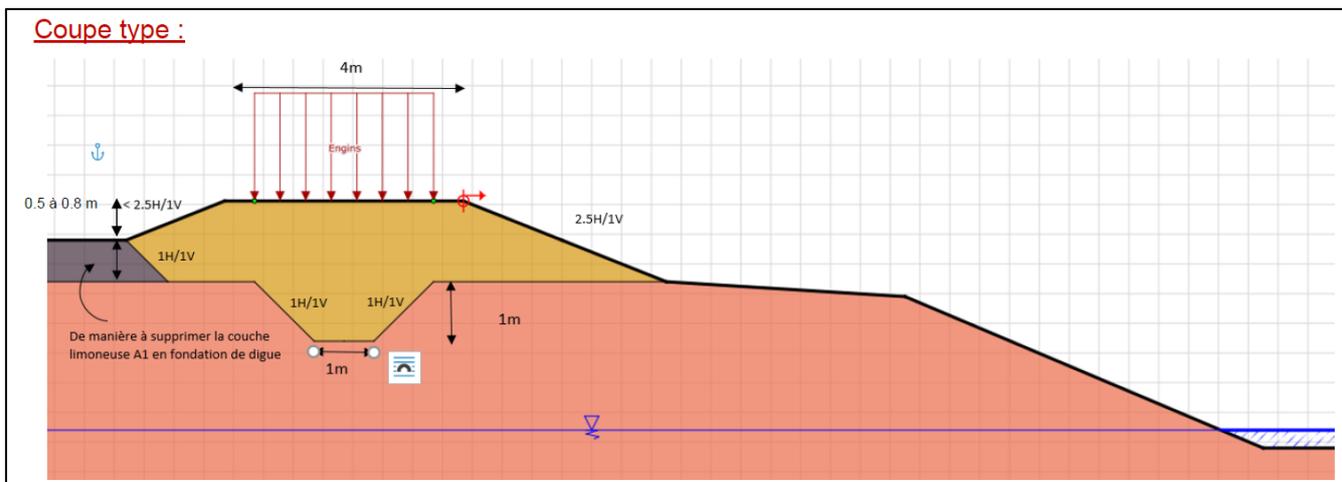


Figure 103 : RG-T8 – Confortement – Coupe type

7.2.4.2 Ebauche hydrogéologique

L'ébauche dimensionnelle hydrogéologique consiste à évaluer le temps de percolation minimal au sein d'un milieu poreux (digue) que mettrait l'eau pour transiter depuis le Borne jusqu'au pied val et à le comparer avec les hydrogrammes de crue.

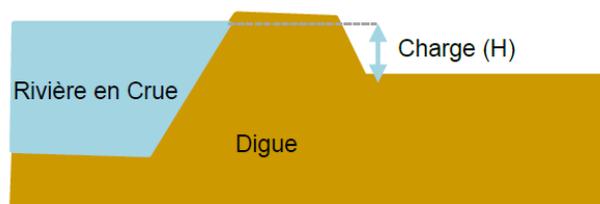
Cette approche s'appuie sur deux lois :

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

Les hydrogrammes de crue du Borne sont traduits, via le modèle hydraulique, en limnigrammes au droit des points étudiés de la digue.

L'interprétation consiste à comparer le **temps modélisé de passage de la crue** dès lors que la digue est mise en charge avec le **temps de percolation calculé**. Cette approche est menée sur 7 profils de digue.

La charge sur la digue correspond à la différence entre le niveau du terrain naturel en aval de la digue (coté terre) et le niveau d'eau.



PM	Tperco		Tcrue	
	K=10 ⁻³ m/s	K=10 ⁻⁴ m/s	1	2
110	14.67	146.7	12	5.68
180	12.08	120.8	18.65	10.16
380	7.6	76	Infini*	22.83*
510	8.62	86.2	Infini*	22.83*
730	7.99	79.9	Infini*	22.83*
830	8.53	85.3	Infini*	22.83*
1080	15.67	156.7	51.15	36.15

* : *Digue en charge constante*

Figure 104 : Comparaison temps de percolation / crue – RG

Tperco [h] est fonction de la perméabilité du matériaux de la digue et de sa géométrie (gradient hydraulique). Il représente le temps nécessaire à la mise en charge hydraulique de l'ouvrage afin que l'eau atteigne le pied aval de la digue (risque de résurgence et de perte de matériaux).

Il est calculé de la manière suivante : $[\text{gradient (en m)} / \text{vitesse de darcy (en m/s)}] / 3600$. Dans notre cas, deux cas possibilités ont été étudiés : perméabilité des matériaux de $K = 10^{-3}$ m/s et perméabilité des matériaux de $K = 10^{-4}$ m/s.

Tcrue [h] est fonction de la durée de la crue centennale modélisée (hydrogramme/limnigramme) et donc de la durée de mise en charge de la digue. Il est calculé suivant deux approches :

- Approche 1 : Une approche très conservatrice qui consiste à considérer, dès mise en charge de la digue, que cette dernière est saturée et que la charge qui s'applique est celle obtenue pour le pic de crue extrême. Ceci revient à maximiser le temps de passage de crue et à minimiser le temps de percolation.
- Approche 2 : Une seconde approche, plus réaliste mais aussi conservatrice, qui consiste à considérer l'activation du phénomène de percolation en milieu saturé lorsque le pic de crue extrême est atteint et avec une charge appliquée maximale (cote de crue extrême). Cette approche, induit un temps de mise en charge plus court que l'approche 1 mais plus proche de la réalité.

Conclusions :

Les comparaisons présentées ci-avant montrent que l'emploi d'un matériau de perméabilité 10^{-4} m/s sera suffisant pour couvrir l'ensemble des risques hydrogéologiques moyennant une réalisation soignée.

Une étude plus fine pourra être réalisée au stade PRO en fonction des résultats de reconnaissances in situ afin d'optimiser le réemploi des matériaux.

7.3 Caractérisation des probabilités de rupture des digues

7.3.1 Méthode de vérification de la tenue des ouvrages

7.3.1.1 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 au plus 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.

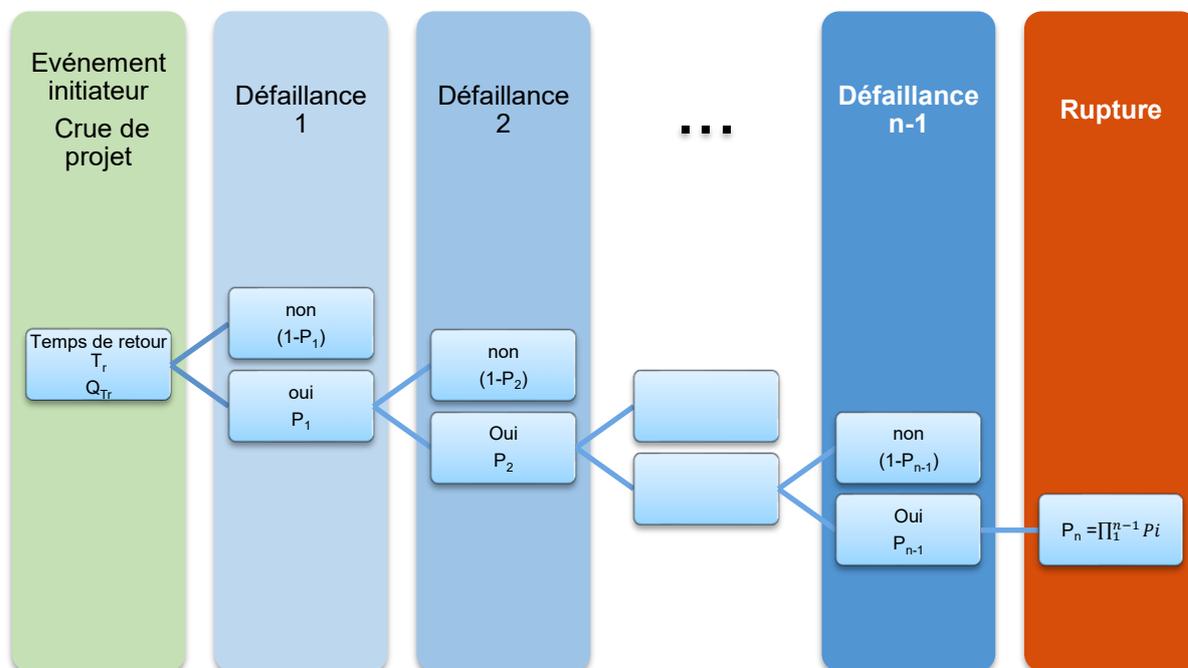


Figure 105 - Arbre type de probabilité

7.3.1.2 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 6.2 de ce rapport.

7.3.1.3 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 [10] 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) [11]. 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) [10] 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 [11]. 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) [10]	Gamme de probabilités Reagan et al (1989) [11]
Très improbable En raison de conditions physiques connues ou des procédés qui peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance		0.01	0 - 0,05
Improbable Bien que la possibilité ne puisse être écartée		0.1	0,002 – 0,15
Neutre Avec aucune raison de croire qu'un résultat est plus ou moins probable que l'autre		0.5	0,45 - 0,55
Probable Mais sans être complètement certain		0.9	0,75 - 0,90
Très probable En raison de conditions physiques connues ou des procédés qui peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance		0.99	0,9 - 0,995

Tableau 40 - Probabilité conditionnelle proposée par Vick (2002)

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

7.3.2 Caractérisation des probabilités de rupture des digues

7.3.2.1 Calcul de sollicitations hydrauliques

L'analyse des modes de rupture des ouvrages est réalisée pour la crue de dimensionnement théorique des ouvrages à l'état projet, soit la crue de période de retour 100 ans sur le Borne. Si le risque de rupture résiduel est supérieur à 5% pour la crue centennale, alors, il est cherché le niveau d'eau maximal pouvant garantir un risque de rupture inférieur à 5%.

La ligne d'eau du Borne est directement issue du modèle hydraulique réalisé par la CNR et présenté dans la Figure 115. Les niveaux d'eau côté zone protégée ont été évalués par une modélisation des écoulements dans le corps des digues et de leur fondation dont les résultats sont décrits dans la note hydraulique en annexe de la présente étude.

7.3.2.2 Modes de rupture considérés

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

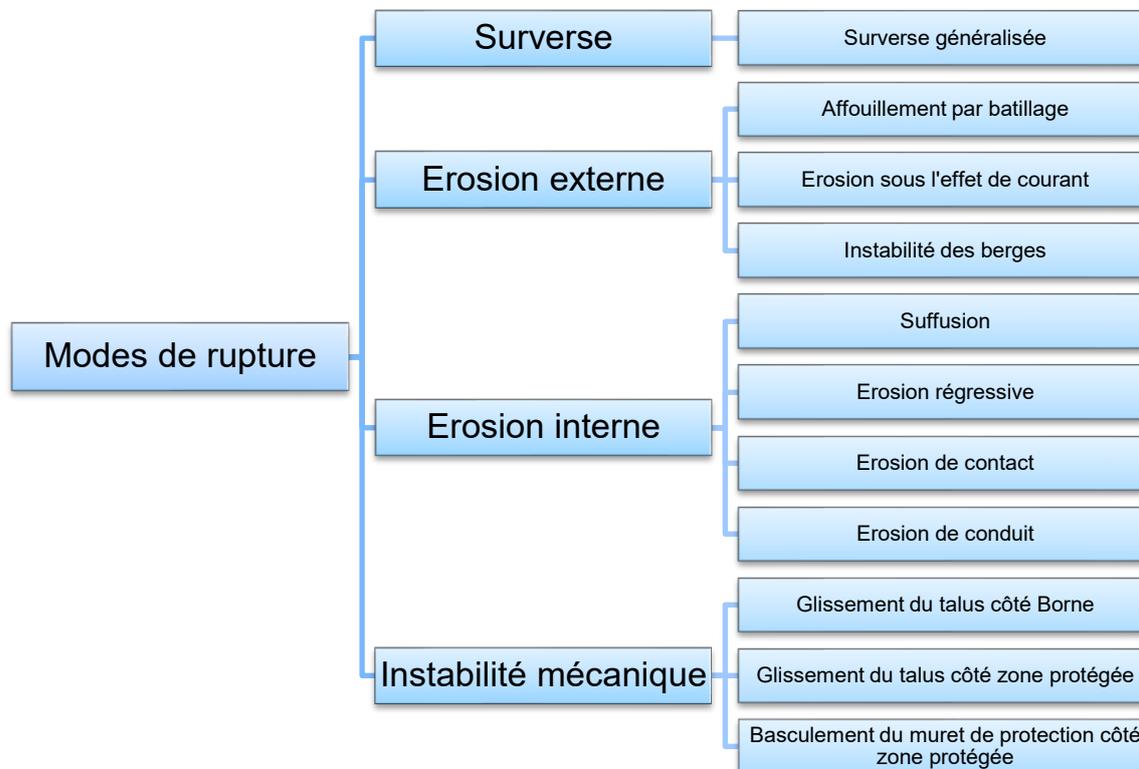


Figure 106 - Modes de rupture considérés

Selon les recommandations du groupe de travail barrage et séismes d'octobre 2014 [9], l'étude du cas d'une rupture sous séisme n'est pas nécessaire compte tenu de la classe de la digue (classe C) 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	α	α	α	α
2	α	α	α	α
3	α	α	α	β
4	α	α	β	β
5	α	β	β	β

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

α : vérification de la conformité aux règles du génie civil
 β : vérification de la stabilité par méthode pseudo-statique

Figure 107 - Vérification de la stabilité de la digue au séisme (Recommandation du MEDDE, 2014 [9])

A la date de publication des recommandations du MEDDE, la définition des classes de digues était différente. On retrouve dans la Figure 110 la définition des classes de digues avant et après le décret de 2015 :

	Décret 2007	Décret 2015
Notions générales	"Digues de protection contre les inondation et les submersions et digues de rivières"	Système d'endiguement, aménagements hydrauliques, zone protégé et niveau de protection
Classement des ouvrages	A P ≥ 50 000 habitants et H ≥ 1 m	> 30 000 personnes
	B P ≥ 1 000 habitants et H ≥ 1 m	> 3 000 personnes
	C P ≥ 10 habitants et H ≥ 1 m	≥ 30 personnes
	D P < 10 habitants et H < 1 m	Classe supprimée
Dossier d'ouvrage	Tenir à jour (structure, environnement, études diverses, entretien/surveillance...)	Idem 2007 + <u>Registre</u>
Visite Technique Approfondie	A = 1 an B = 1 an C = 2 ans D = 5 ans Après un EISH	Entre deux rapports de surveillance - Après un EISH Plus d'obligation d'adresser le rapport au préfet
Rapport de surveillance	A = 1 an B = 5 ans C = 5 ans D = sans objet	A = 3 ans B = 5 ans C = 6 ans
Etude de Danger	Tous les 10 ans	A la demande d'autorisation du SE puis A = 10ans B = 15 ans C = 20 ans
<small>*possibilité de classement même si l'ouvrage est inférieur à 1,5m, si demande du gestionnaire</small>		

Figure 108 - Tableau de synthèse des évolutions entre le décret 2007 et 2015 (Source : France-Digue)

7.3.2.3 Rupture par surverse

7.3.2.3.1 Qualification des sollicitations

La rupture par déversement sur la crête de la digue constitue un des mécanismes les plus fréquents de ruine des digues.

Cette rupture se produit si la sollicitation (lame de surverse, durée de surverse et hauteur de chute) est suffisante.

La mise en vitesse de l'écoulement sur le parement aval dépend de la hauteur du parement aval, de sa pente et de son revêtement (rugosité).

La résistance à l'érosion de la digue en pied de parement aval dépend du revêtement du parement et de la nature du revêtement (cohésion, compacité).

Les conditions d'écoulement de surverse pouvant induire une érosion importante en fonction du type de remblai sont cependant mal connues d'un point de vue quantitatif et les références dans la littérature sont peu nombreuses.

On retiendra qu'en règles générales, l'érosion démarre dès le début de la surverse avec de faibles lames d'eau (inférieures à 10 cm) pour les ouvrages dont le pied aval est en remblai dont la qualité de mise en place a été médiocre. En revanche, un ouvrage protégé (présence d'enrobé ou de béton côté zone protégée) peut supporter des lames d'eau plus importante (typiquement 10 à 30 cm) pendant quelques heures.

On estime que le risque de surverse devient nul dès lors que la revanche est supérieure à 50 cm.

En se basant sur les descriptions des ouvrages et de leur état, on peut par ailleurs analyser les critères suivants de résistance à la rupture :

- Nature du terrain côté zone protégée,
- Géométrie (largeur de la digue, pente des talus, hauteur du muret),

Dans le cas d'un mur de protection, la rupture par surverse est un mécanisme en deux étapes : d'abord l'érosion du pied aval par la surverse puis le basculement du mur de protection. D'autres critères sont donc à prendre en compte comme l'ancrage du mur et son profil.

La situation considérée étant une situation de projet, la cote de crête projetée de la digue correspond à la cote prévue dans l'AVP de la digue de $Z_{Q100} + 1$ m.

7.3.2.3.2 Arbre de défaillance

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

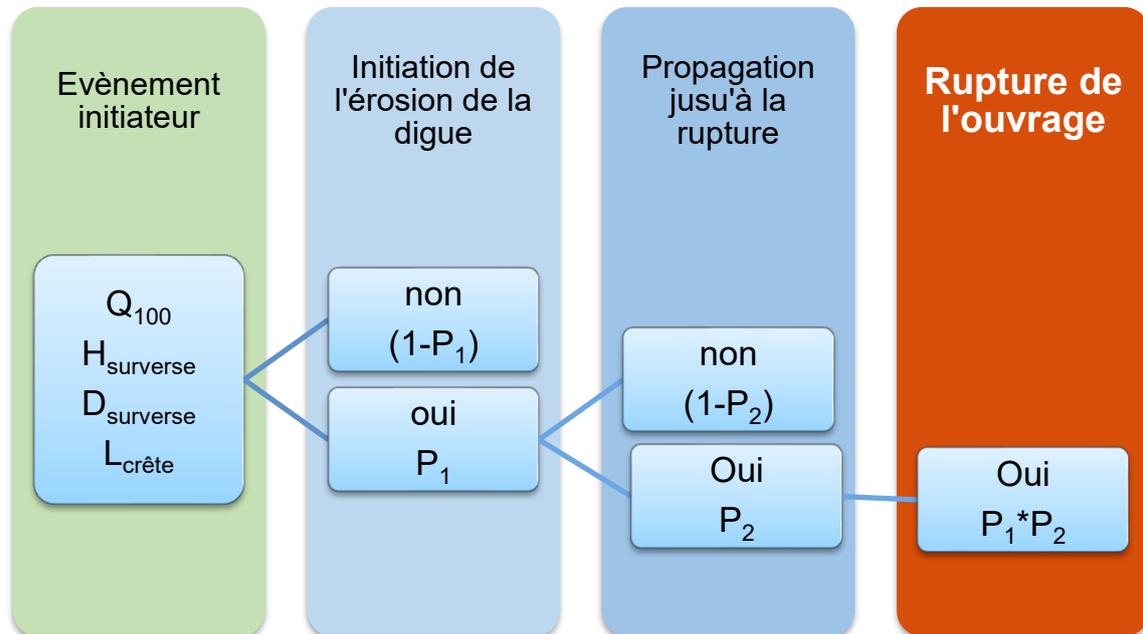


Figure 109 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par surverse

7.3.2.3.3 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 [12] :

- Appréciation du débit spécifique,
- Appréciation de la vitesse d'écoulement selon les recommandations du CIRIA en considérant la pente et la hauteur des talus ; cette vitesse va dépendre du débit spécifique et des caractéristiques du couvert herbacée (le coefficient de rugosité varie selon l'intensité du débit) ;
- Appréciation de l'initiation avec les abaques du CIRIA en considérant la vitesse et la durée des écoulements.

Calcul de la sollicitation :

Le débit de surverse est calculé à partir d'une loi hauteur-débit en assimilant la digue à un déversoir. La hauteur de surverse est calculée à partir de la ligne d'eau majorée (cf. §7.3.2.3.1).

L'équation générale est de la forme :

$$q = \mu * \sqrt{2 * g * H_{surverse}^3}$$

Avec :

q le débit d'écoulement par unité de longueur (m^2/s)

μ coefficient de débit

$H_{surverse}$: charge sur la crête (m)

D'après nos connaissances pour ce type de situation et d'après la littérature, la valeur de μ pour un déversoir latéral est généralement compris entre 0,15 et 0,30 (valeur à ne pas dépasser pour des digues : seuil épais et parallèle à l'écoulement). On retiendra ici la valeur conservative de 0,25.

La vitesse d'écoulement sur le talus aval est ensuite calculée d'après les recommandations du Guide Internationale sur les digues du Cerema [13], 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_s = le débit critique en situation permanente ($m^3/s/ml$)

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 110 - Vitesse d'écoulement sur le talus d'une digue en surverse - Cerema [13]

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 :

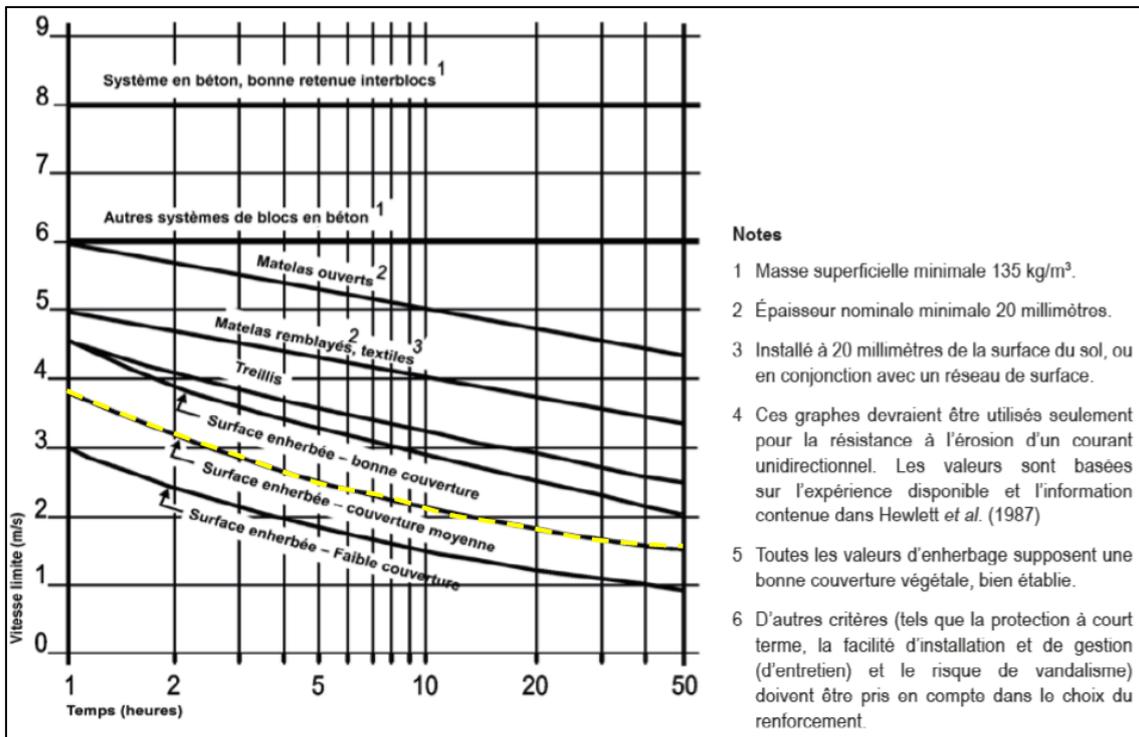


Figure 111 - Valeurs limites de dimensionnement de la résistance à l'érosion pour des mesures anti-érosions sélectionnées (source: Hewlett et al. – 1987 [14])

Au vu de ces résultats, il est proposé de retenir la grille de probabilité suivante :

Comparaison sollicitation/résistance	Qualification verbale	Probabilité suggérée Vick (2002)
Point situé en dessous de la courbe « faible couverture »	Initiation de l'érosion du talus très improbable	0,01
Point situé entre les courbes « faible couverture » et « couverture moyenne »	Initiation de l'érosion du talus improbable	0,1
Point situé sur la courbe « couverture moyenne »	Initiation de l'érosion du talus incertaine	0,5
Point situé entre les courbes « couverture moyenne » et « bonne couverture »	Initiation de l'érosion du talus probable	0,9
Point situé au-dessus de la courbe « bonne couverture »	Initiation de l'érosion du talus très probable	0,99

Progression jusqu'à la rupture : P₂

L'analyse de la littérature indique deux mécanismes de formation de brèche par surverse :

- Remblai constitué de sols fin cohésifs ; le mécanisme est celui du « Head-Cut », ou formation progressive à partir du pied aval de marches avec alternance d'érosion par jet impactant et détachement de matériau par blocs ;
- Remblai constitué de sols granulaire à granulométrie fine (sableux) ; érosion répartie sur l'ensemble de l'ouvrage (crête et talus aval).

Pour les digues du Borne, le mécanisme principal concerné est donc le mécanisme 1 présenté ci-dessous.

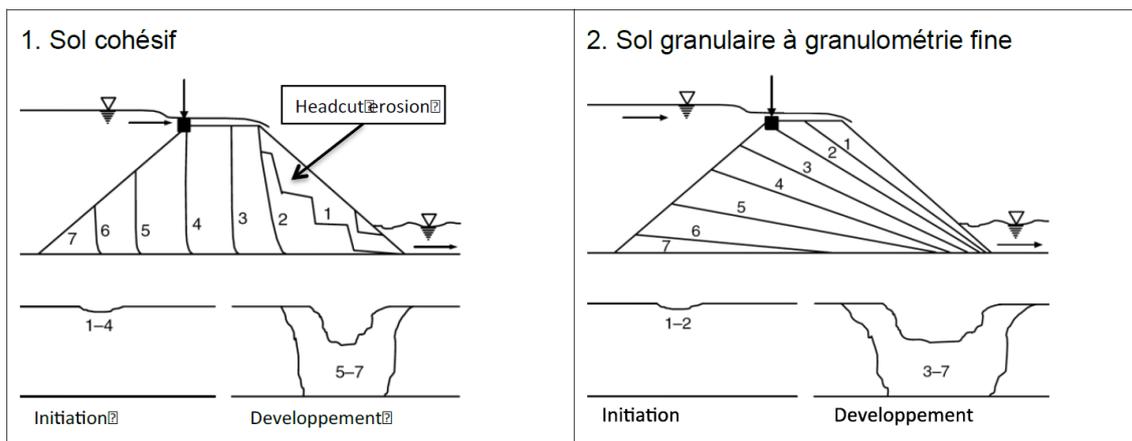


Figure 112 - mécanisme d'érosion par surverse en fonction des matériaux de la digue

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 41 - grille de probabilités conditionnelles pour la progression de l'érosion par surverse jusqu'à la rupture

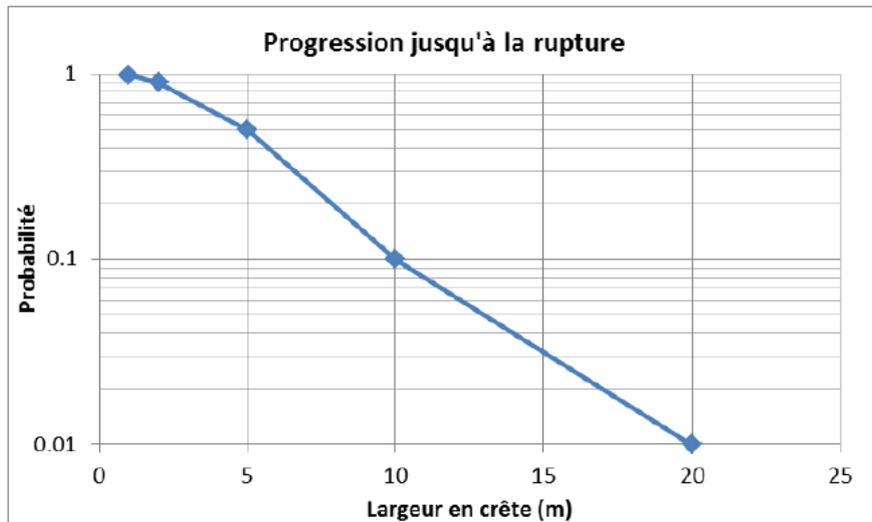


Figure 113 - Largeur en crête et probabilité conditionnelle associée

7.3.2.3.4 Analyse par tronçon

Ligne d'eau

La cote de submersion projetée, défini lors de l'AVP, correspond à la cote de $Z_{Q100} + \text{revanche}$. Pour une crue de projet Q_{100} il apparaît ainsi qu'aucune zone de submersion n'est présente sur le linéaire en rive gauche du Borne.

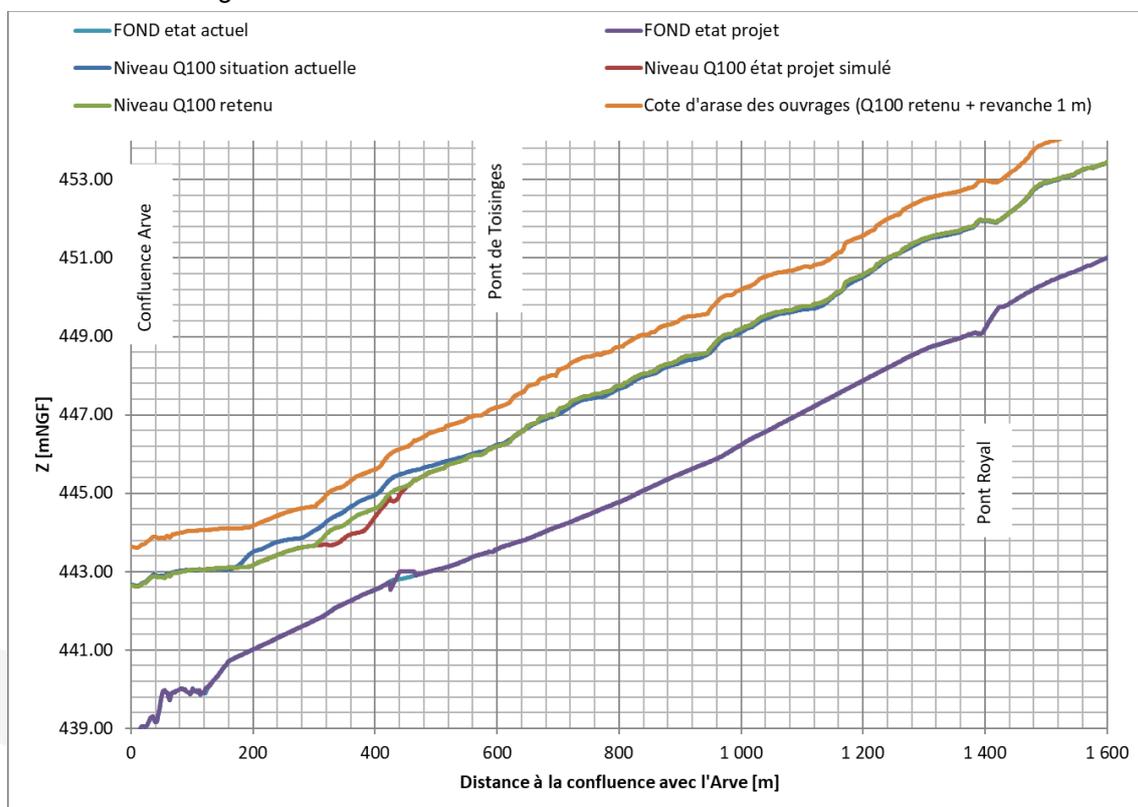


Figure 114 - Profil en long de la digue en RG du Borne à l'état projet et ligne d'eau associée

Tableau 42 - Probabilités conditionnelles de surverse pour une crue Q₁₀₀

Tronçon	Cote de crête (m NGF)	Probabilité (%)
T1	>Z _{Q100} +1m	0 %
T2	>Z _{Q100} +1m	0 %
T3	>Z _{Q100} +1m	0 %
T4	>Z _{Q100} +1m	0 %
T5	>Z _{Q100} +1m	0 %
T6	>Z _{Q100} +1m	0 %
T7	>Z _{Q100} +1m	0 %
T8	>Z _{Q100} +1m	0 %
T9	>Z _{Q100} +1m	0 %

On retrouve également dans la figure suivante les niveau d'eau du Borne pour différentes occurrences de crue :

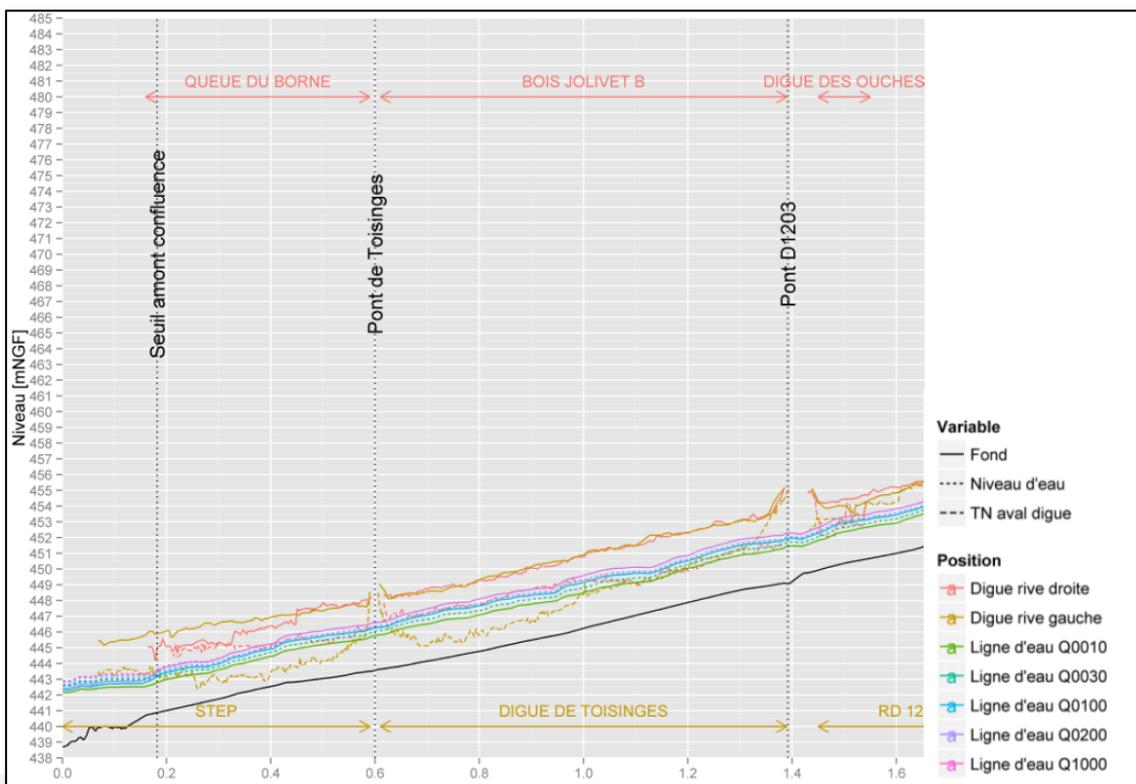


Figure 115 - Profil en long pour différents temps de retour de crue (source : CNR)

On constate qu'en tout point du linéaire, la ligne d'eau pour une crue de temps de retour 1000 ans est à moins de 1m de plus de la ligne d'eau d'une crue de temps de retour 100 ans. On peut donc en déduire que la protection à la surverse est également effective a minima pour une crue de temps de retour 300 ans.

7.3.2.4 Rupture par instabilité du talus

7.3.2.4.1 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.

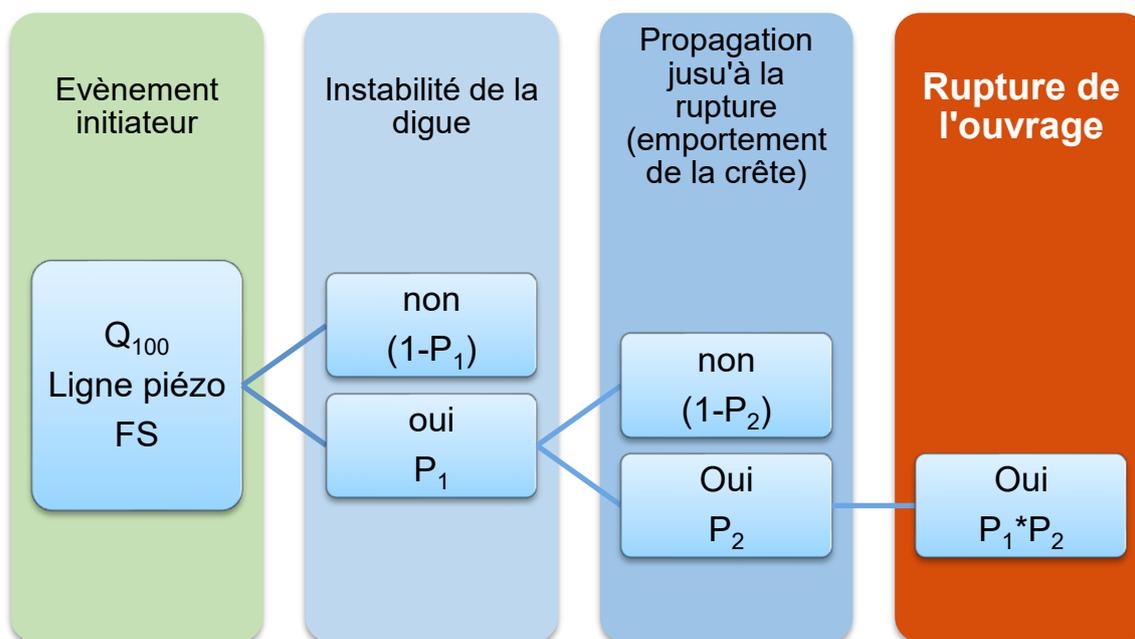


Figure 116 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai)

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 (Tronçon T1). Il s'agit ici de voir si le glissement du talus peut entraîner la rupture du mur en pied de digue et conduire ainsi à la ruine complète de l'ouvrage. La stabilité de ces éléments est étudiée dans le rapport de G2-PRO en annexe.

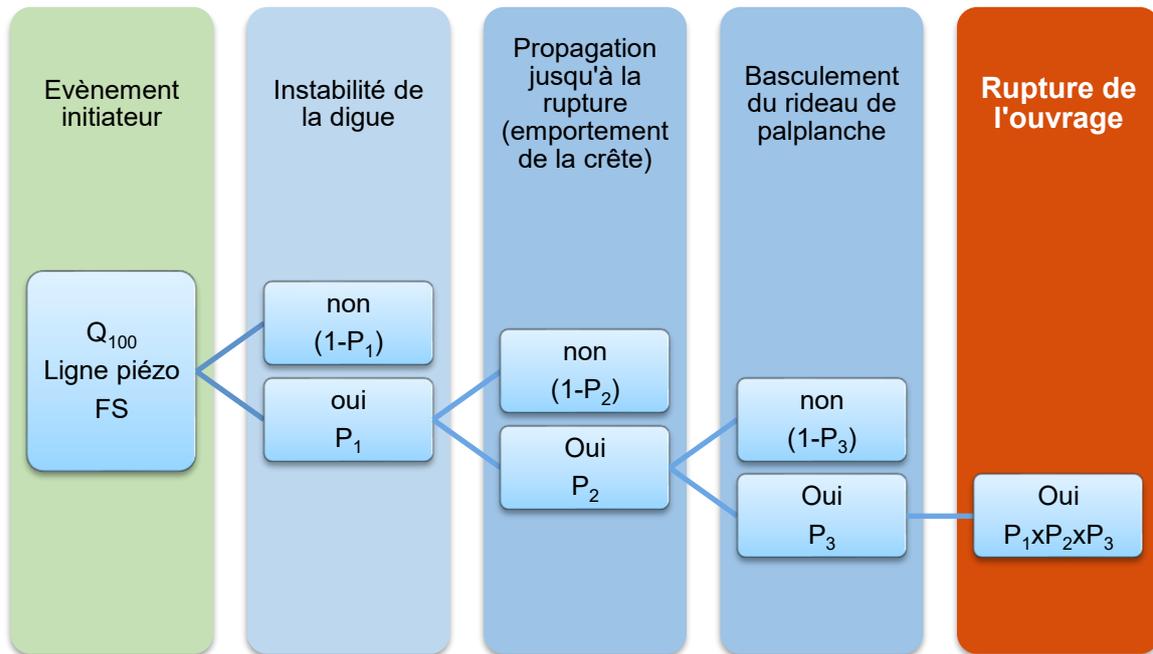


Figure 117 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus (digue en remblai avec rideau de palplanche)

7.3.2.4.2 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 suite à 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. 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 : P₁

La détermination de la probabilité de glissement consiste à la relier à un facteur de sécurité de stabilité.

Situations	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan \phi'$	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient de modèle γ_d
normale d'exploitation	1,25	1	1,2
rare de crue	1,2	1	1,2
transitoire ou rare	1,1	1	1,2
exceptionnelle de crue (PHE)	1,1	1	1,2
extrêmes de crue, sismique ou autres	1	1	1,1

Figure 118 - Coefficients partiels et de modèle pour le glissement (Source: CFBR, 2015 [15])

Les facteurs de sécurité obtenus par l'analyse sans coefficients partiels peuvent être comparés aux facteurs de sécurité ci-dessous, obtenus par multiplication des coefficients partiels et de modèle préconisé par le CFBR. Une probabilité conditionnelle est ensuite affectée à chaque facteur de sécurité afin d'obtenir une probabilité totale de 10^{-4} pour chaque situation.

Situation	Facteur de sécurité	Probabilité de la situation	Probabilité associée au facteur de sécurité
Normale	$F_s=1,50$ (1,25x1,20)	1	10^{-4}
Rare de crue	$F_s=1,44$ (1,20x1,20)	10^{-1}	10^{-3}
Exceptionnelle de crue	$F_s=1,32$ (1,2x1,10)	10^{-2}	10^{-2}
Extrême de crue	$F_s=1,10$ (1,1x1,00)	10^{-3}	10^{-1}

Tableau 43 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après le CFBR (pour $F_s > 1,10$)

Pour les facteurs de sécurité inférieurs, ces probabilités conditionnelles peuvent être étendues par la grille de Vick :

Bilan de l'analyse du phénomène	Facteur de sécurité	Probabilité suggérée	Probabilité associée au facteur de sécurité
Aucune raison de croire qu'un résultat est plus probable qu'un autre	$F_s=1$	0,50	Neutre
Une certaine confiance dans la probabilité d'occurrence mais la probabilité inverse ne peut être écartée	$F_s=0,9$	0,90	Probable
Les conditions physiques connues et/ou les procédés peuvent être décrits et peuvent qualifier l'occurrence avec une entière confiance	$F_s=0,8$	0,99	Très probable

Tableau 44 : Probabilités conditionnelles d'instabilité des talus au glissement d'après Vicks (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 45 - probabilités conditionnelles pour l'instabilité des talus au glissement

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 :

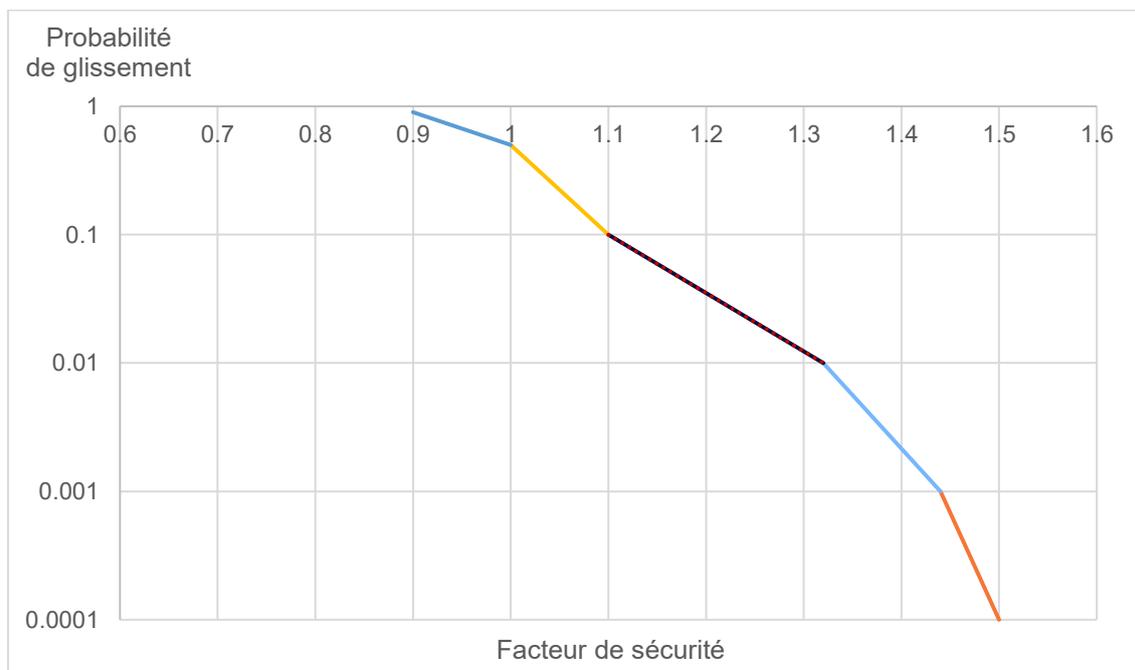


Figure 119 - extrapolation des valeurs de facteur de sécurité au glissement et probabilité conditionnelle

Les modèles de stabilité réalisés sur le logiciel Talren dans le cadre de la G2-AVP donnent les facteurs de sécurité suivants :

Tableau 46 - Facteurs de sécurité de stabilité pour les différents tronçons

Tronçon	Etiage		Crue de protection		Crue extrême	
	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont
T1	-	-	-	-	-	-
T2	-	1,01	-	1,03	-	0,98
T3		1,01		1,03		0,98
T4	1	1,31	1,14	1,39	1,07	1,45
T5	1,10	1,22	1,18	1,24	1,26	1,25
T6	1,02	1,09	1,18	1,14	1,27	1,21
T7	1,09	1,06	1,23	1,44	1,23	1,21
T8	1,14	1,45	1,30	1,41	1,34	1,41
T9	1,22	1,29	1,38	1,21	1,48	1,18

Le tronçon T1 correspond à une rampe sous le pont aval du Pont royal et le PM 1347, dont la protection est établie par la mise en place d'un rideau de palplanches. Il n'est donc pas concerné par l'analyse de la probabilité 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).

Le guide international sur les digues de 2019 indique qu'en cas de glissement rotationnel profond, à savoir un glissement depuis la crête jusqu'au pied, une brèche peut survenir très rapidement à défaut de réparation.¹

Il y est également indiqué que « Quand plus de la moitié de la largeur utile en crête de digue est affectée, le problème doit être traité comme une urgence absolue ».

à partir de ces éléments, Il est estimé à dire d'expert de manière sécuritaire qu'au-delà d'un tiers de largeur L de crête emportée par glissement, la rupture est très probable ($P=0,99$). En effet ce glissement d'une partie majeure de la digue a une plus forte probabilité d'entraîner la rupture du reste de l'ouvrage, soit par glissement, soit par érosion interne. 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
$L_e \leq 0,05*L$	0,01
$0,05*L < L_e \leq 0,10*L$	0,1
$0,10*L < L_e \leq 0,20*L$	0,5

¹ Page 191 du guide international sur les digues – ILH, 2019

$0,20*L < L_e \leq 0,30*L$	0,9
$L_e > 0,30*L$	0,99

Tableau 47 - Probabilités conditionnelles pour la propagation du glissement jusqu'à la rupture

Basculement du rideau de palplanches (P₃)

Pour les tronçons T1, T2 et T3 la digue est constituée d'un corps en remblais et d'un rideau de palplanches côté val. La probabilité P3 correspond à la stabilité des palplanches à la suite du glissement du remblais de la digue. Il a été montré dans le rapport de G2-AVP que les palplanches sont dimensionnées afin d'être auto-stables. Le caractère auto-stable des palplanches est établi sur la base du REX de la CNR, par la fiche des palplanches sur une profondeur correspondant à 2 fois la longueur au-dessus du TN amont à la digue.

De plus, comme mentionné dans l'AVP le dimensionnement des palplanches est effectué de sorte qu'elles restent stables en cas de glissement du talus amont de la digue.

On peut donc considérer que la probabilité de basculement du rideau de palplanches dans les tronçons concernés est **très improbable (P=0,01)**.

Pour le tronçon T6, les palplanches n'ont pas été dimensionnées suivant l'aspect structurel. On considérera donc que le basculement du rideau de palplanche en cas de rupture de la digue est **très probable (P=0,9)**.

7.3.2.4.3 Analyse par tronçon

Tronçon T1

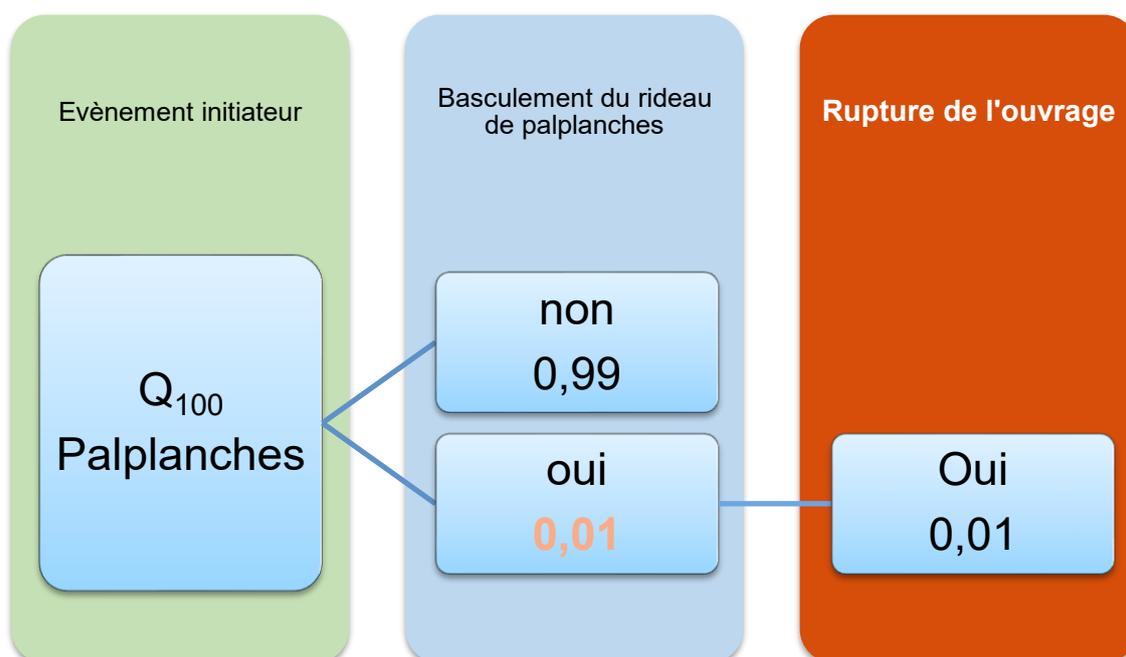


Figure 120 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – tronçon T1

Tronçon T2

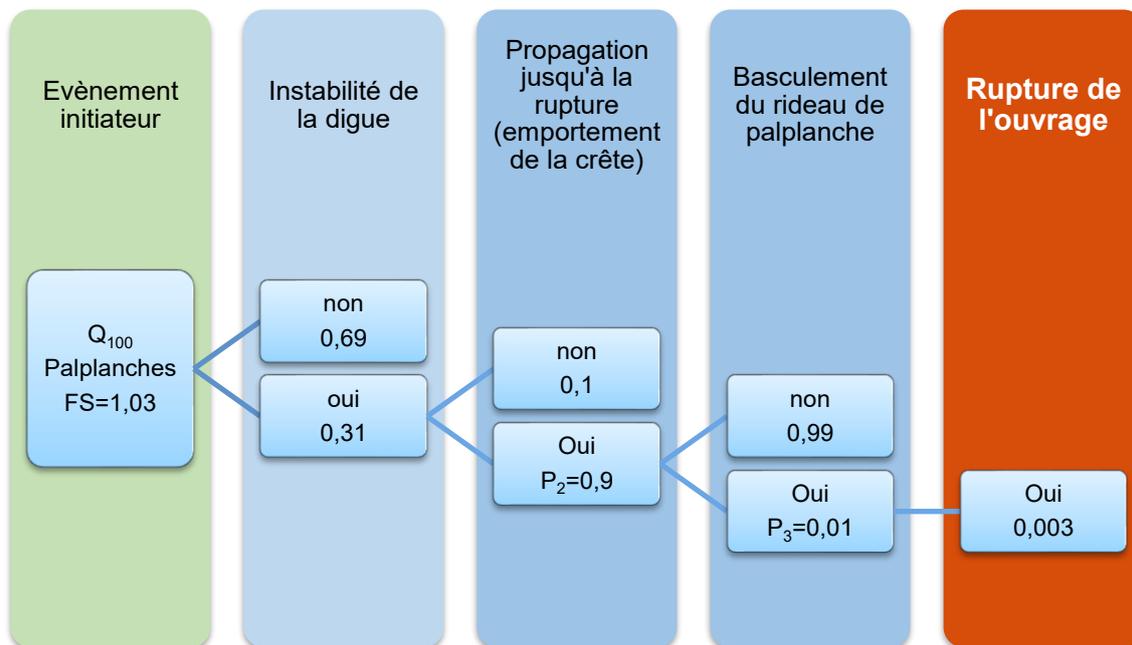


Figure 121 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – tronçon T2

Tronçon T3

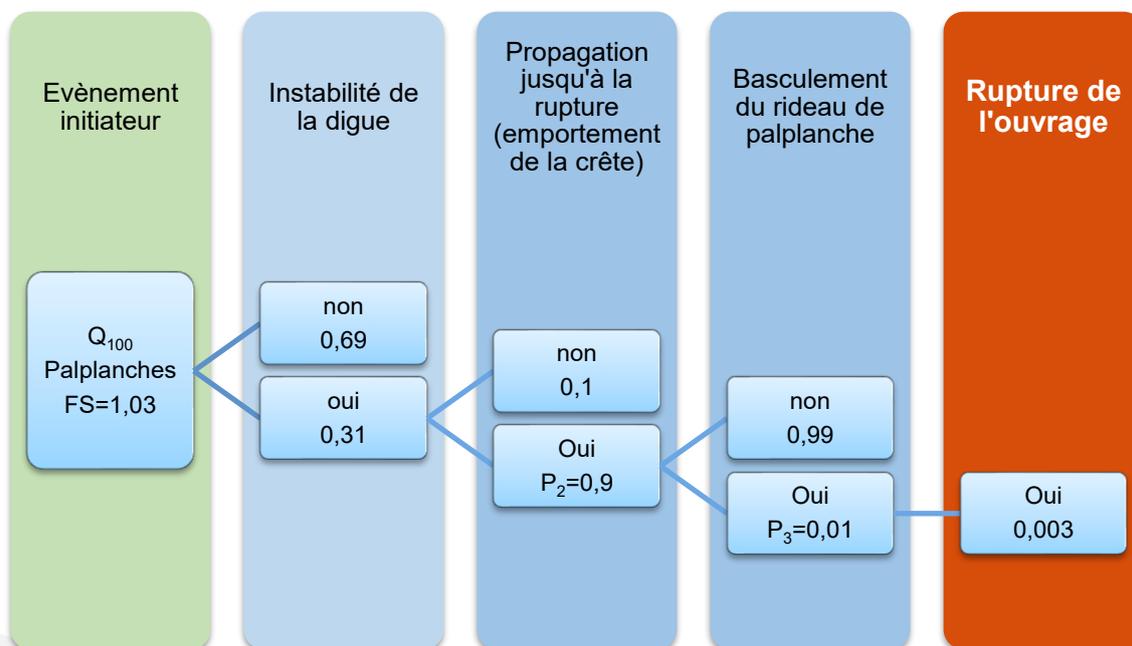


Figure 122 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T3

Tronçon T4

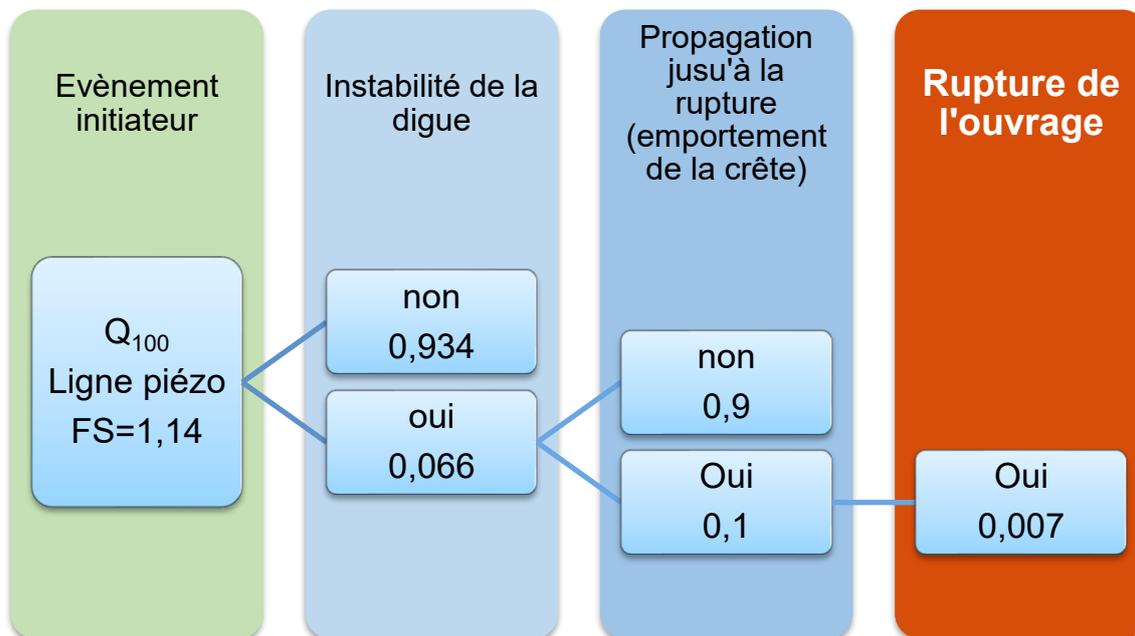


Figure 123 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T4

Tronçon T5

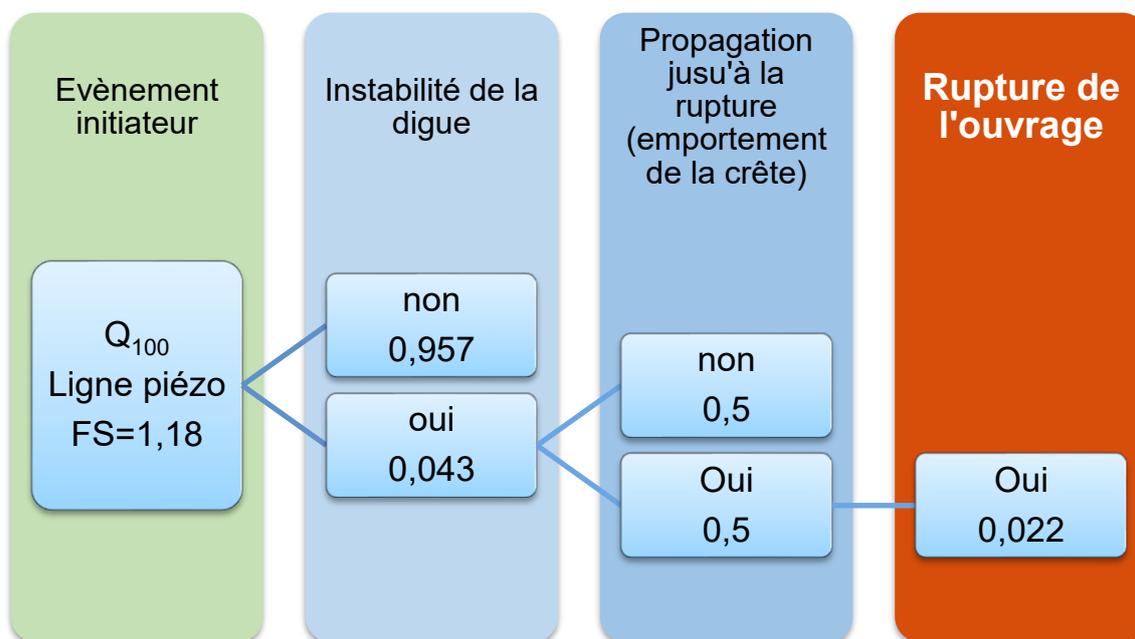


Figure 124 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T5

Tronçon T6

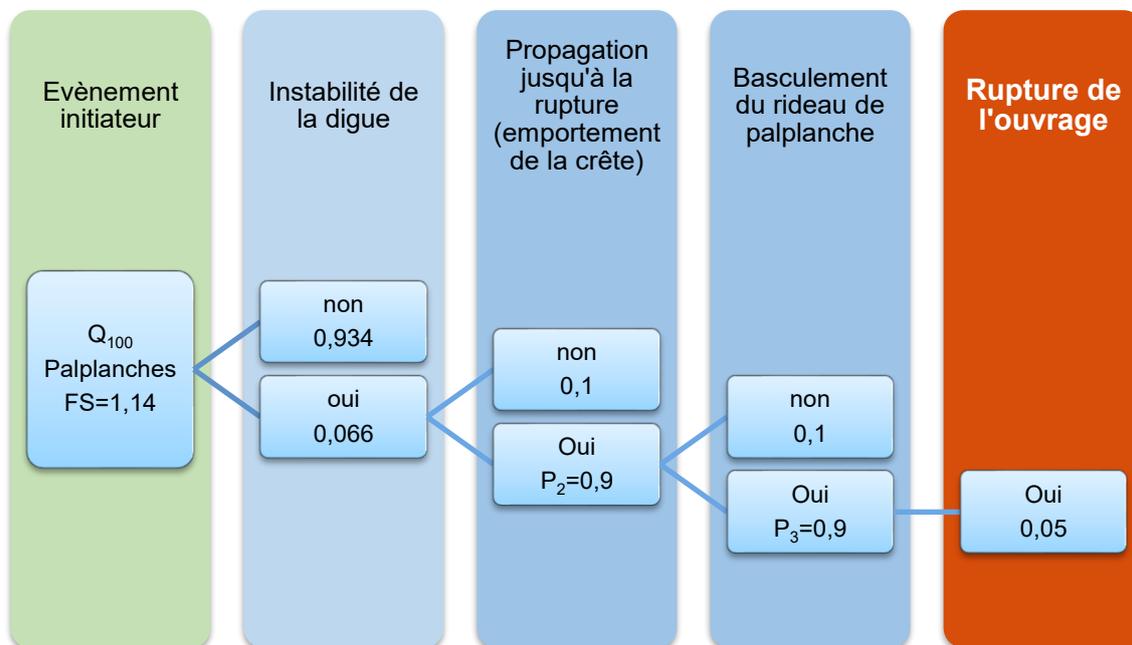


Figure 125 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T6

Tronçon T7

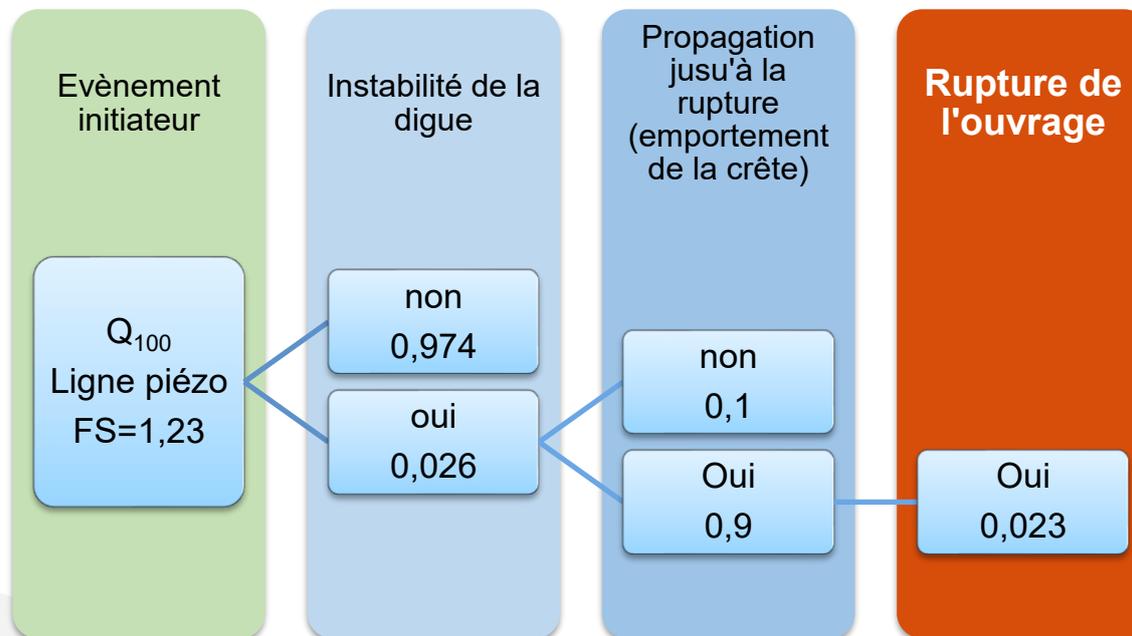


Figure 126 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T7

Tronçon T8

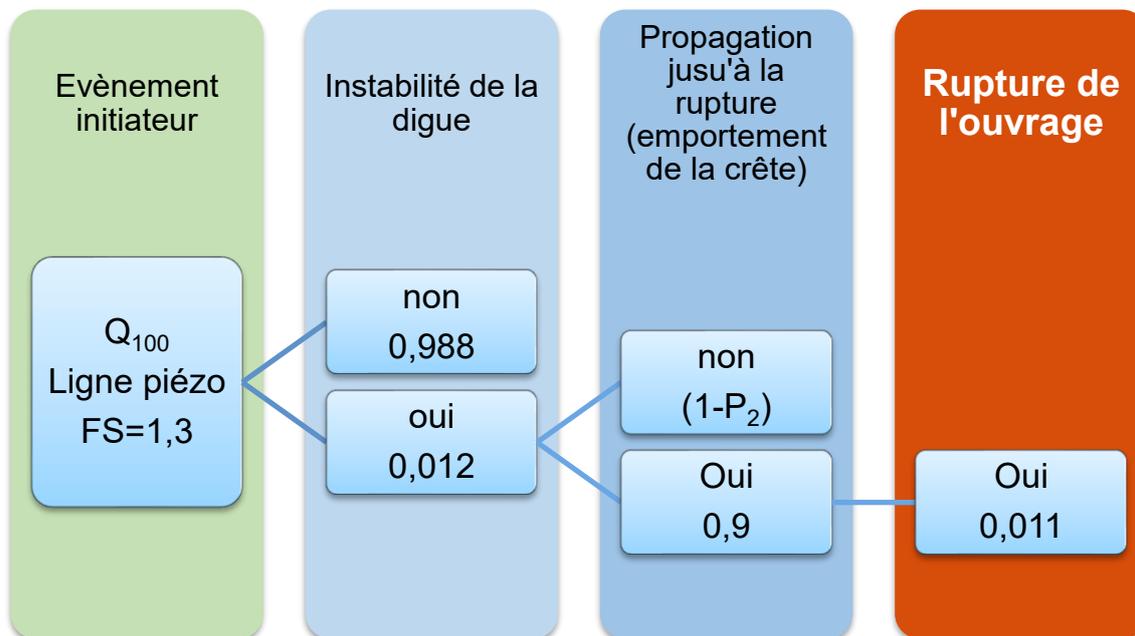


Figure 127 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T8

Tronçon T9

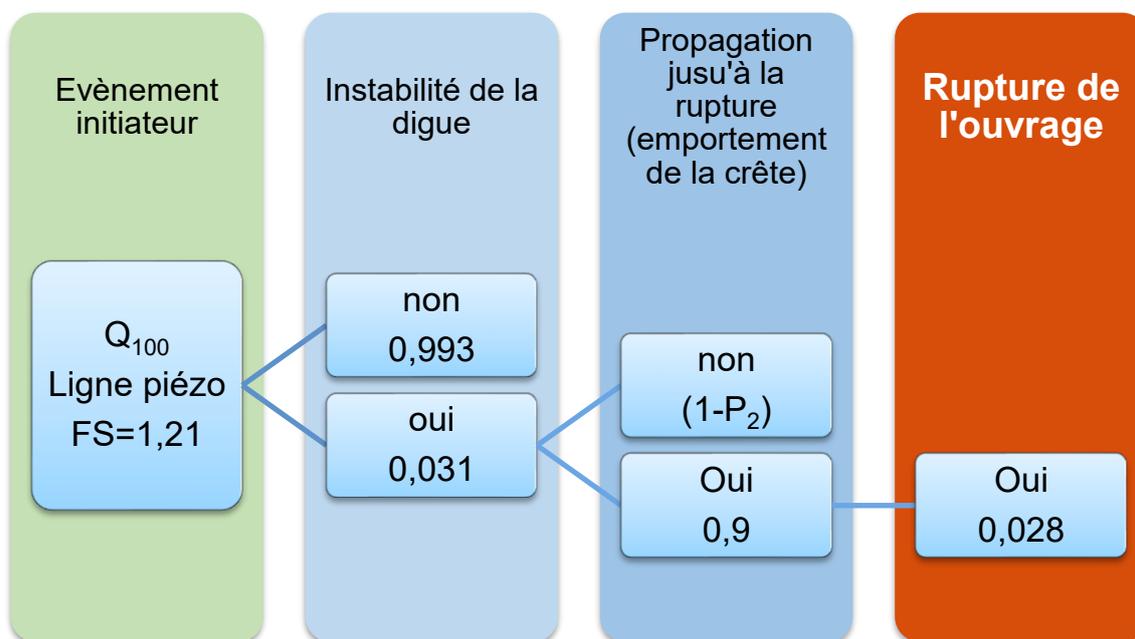


Figure 128 - Arbre de défaillance associé à la rupture par glissement de talus – Tronçon T9

Synthèse

Sur la base de l'ensemble de ces critères le tableau ci-après détaille la valeur des probabilités de rupture par instabilité des rehausses (mur en pied aval) pour la crue centennale Q100.

Tronçon	Probabilité (%)
T1	1
T2	0,3
T3	0,3
T4	0,7
T5	2,2
T6	5
T7	2,3
T8	1,1
T9	2,8

Le tronçon le plus critique est le tronçon T6, qui présente une probabilité de rupture par glissement de talus de 5%.

7.3.2.5 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

7.3.2.5.1 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.

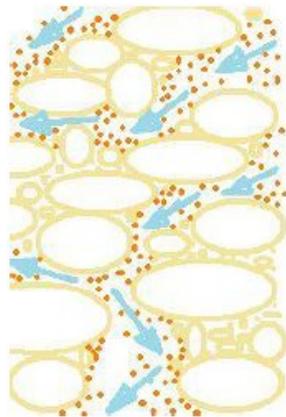


Figure 129 - Schéma du phénomène de suffusion

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'apparait que dans les sols où les fines ne comblent pas les vides des particules granulaires. Toutefois, la suffusion est un phénomène aggravant de l'érosion de contact ou de l'érosion régressive.

D'après le bulletin n°164 du CIGB, sont considérés en pratique comme **non suffusifs** les sols possédants :

- Soit un indice de plasticité supérieur à 7,
- Soit un pourcentage d'argile (passant à 2 μm) supérieur à 10%,
- Soit un pourcentage de fines (passant à 80 μm) supérieur à 40%.

Les sols ne remplissant pas ces critères granulométriques sont considérés comme potentiellement suffusifs.

Le risque d'initiation de la suffusion dans un sol peut être appréhendé plus spécifiquement à partir de critères granulométriques et différents critères :

- **Les critères de stabilité du sol** : critère d'auto-filtration de Terzaghi, critères de Kenney & Lau. Ces critères décrètent la stabilité d'un milieu, par conséquent, et compte tenu de leur caractère conservatif, il est assuré que la stabilité d'un sol vérifiant un de ces critères sera effective. En revanche, si ces critères ne sont pas vérifiés, l'instabilité n'est pas acquise.
- **Les critères d'instabilité** : il s'agit des critères de Burenkova et de Wan & Fell (qui donne une probabilité d'instabilité du sol)

A l'état projet, les matériaux prévus ne présentent pas de risques de suffusion.

Les matériaux en place dans les tronçons T1 et T2 ne respectent pas les critères énoncés ci-dessus. Cependant, comme on le verra dans les parties dédiées aux phénomènes d'érosion de contact et d'érosion régressive, ces tronçons ne présentent pas de risques particuliers concernant ces phénomènes.

7.3.2.5.2 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.

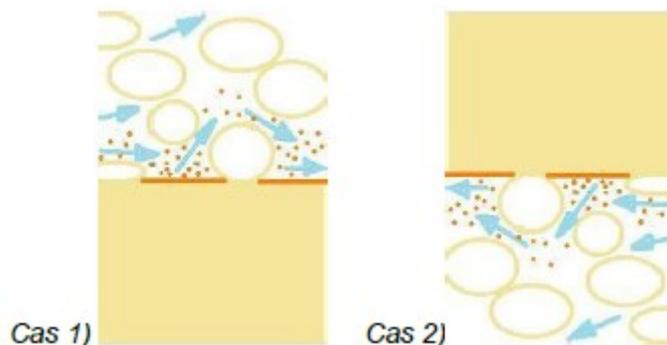


Figure 130 - Schéma du phénomène d'érosion de contact

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.

7.3.2.5.3 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 débouillage 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 :

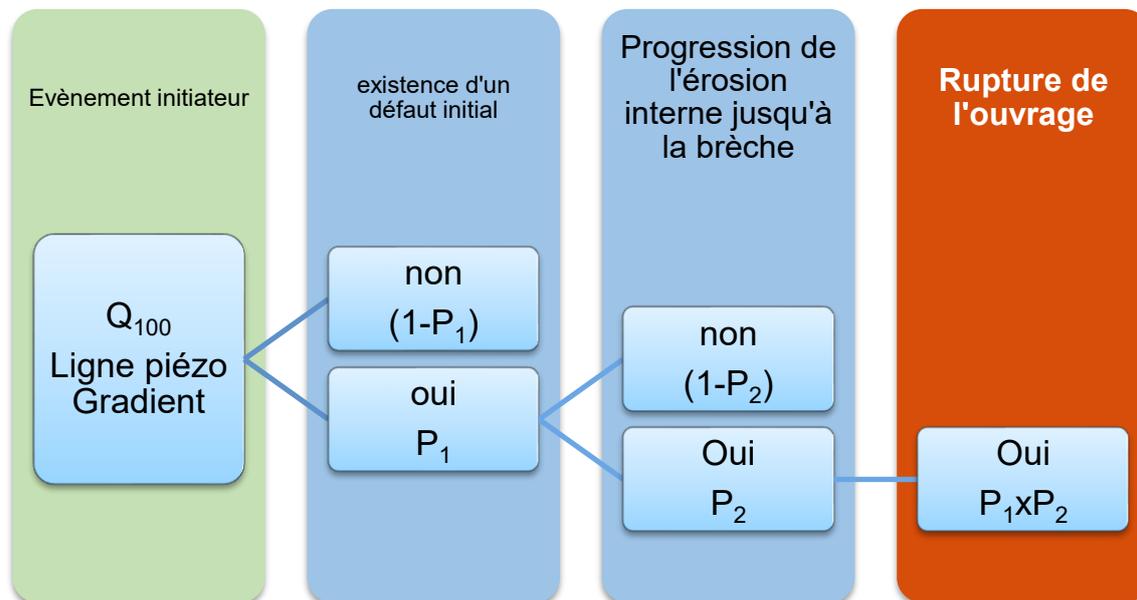


Figure 131 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit

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 [10].

Les observations de terrain serviront également à fixer un ordre de grandeur du diamètre des défauts préexistants. Il est proposé d'adopter les dimensions suivantes en tant qu'ordres de grandeur :

- Diamètre d'un terrier de fouisseur : 8 cm,
- Fissure le long d'un ouvrage traversant : 3 cm,
- Diamètre d'une cavité créée par une racine : 5 cm.

La localisation et la profondeur du défaut au sein de la digue est également un paramètre essentiel. Le défaut initial ne traverse pas forcément l'ouvrage de l'amont vers l'aval mais peut devenir traversant à la faveur d'un claquage hydraulique du bouchon aval. La charge hydraulique amont intervient alors.

Pour les tronçons 1 et 2, la présence de végétation ligneuse peut favoriser le risque d'érosion de conduit par le développement de système racinaires.

	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)
T1	Oui	Non	Etat projet : non	Interface entre les enrochements et le TN	Oui : Rampe	Très Improbable 0,01
T2	Oui	Oui	Etat projet : non	Interface entre le remblai et les palplanches	Non	Très Improbable 0,01
T3	Oui	Non	Etat projet : non	Interface entre le remblai et les palplanches	Non	Très Improbable 0,01
T4	Non	Oui	Etat projet : non	Interface entre le perré et le remblai	Non	Improbable 0,1
T5	Non	Non	Etat projet : non	Interface entre le perré et le remblai	Non	Improbable 0,1
T6	Oui	Non	Etat projet : non	Interface entre le remblai et les palplanches	Non	Très Improbable 0,01
T7	Non	Non	Etat projet : non	Matériaux relativement homogènes	Non	Improbable 0,1
T8	Non	Non	Etat projet : non	Matériaux relativement homogènes	Non	Improbable 0,1
T9	Non	Non	Etat projet : non	Matériaux relativement homogènes	Non	Improbable 0,1

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

Sur les tronçons T2, T3 et T6, la mise en place d'un rideau de palplanches en partie aval de la digue permet d'empêcher la formation de débouché de conduit aval, et ainsi limiter la formation de conduits entre les parements amont et aval. La progression de l'érosion jusqu'à la brèche est donc considérée comme **très improbable (P=0,01)** sur ces tronçons.

Sur les tronçons T7, T8 et T9, le risque de progression de l'érosion jusqu'à la brèche est plus important car le développement de conduits est possible entre l'amont et l'aval. La progression est donc jugée comme **neutre (P=0,5)**.

Sur les tronçons T4 et T5, le risque de progression de l'érosion jusqu'à la brèche est possible mais moins probable étant donné la grande épaisseur de remblai et la présence de géogrille tridimensionnelle. La progression est donc jugée comme **peu probable (P=0,1)**.

Sur le tronçon T1, la berge amène directement au TN aval, le risque de formation de conduits est donc **nul (P=0)**.

Les probabilités totales de rupture par érosion de conduit sont données ci-après pour chacun des tronçons :

Tronçon T1

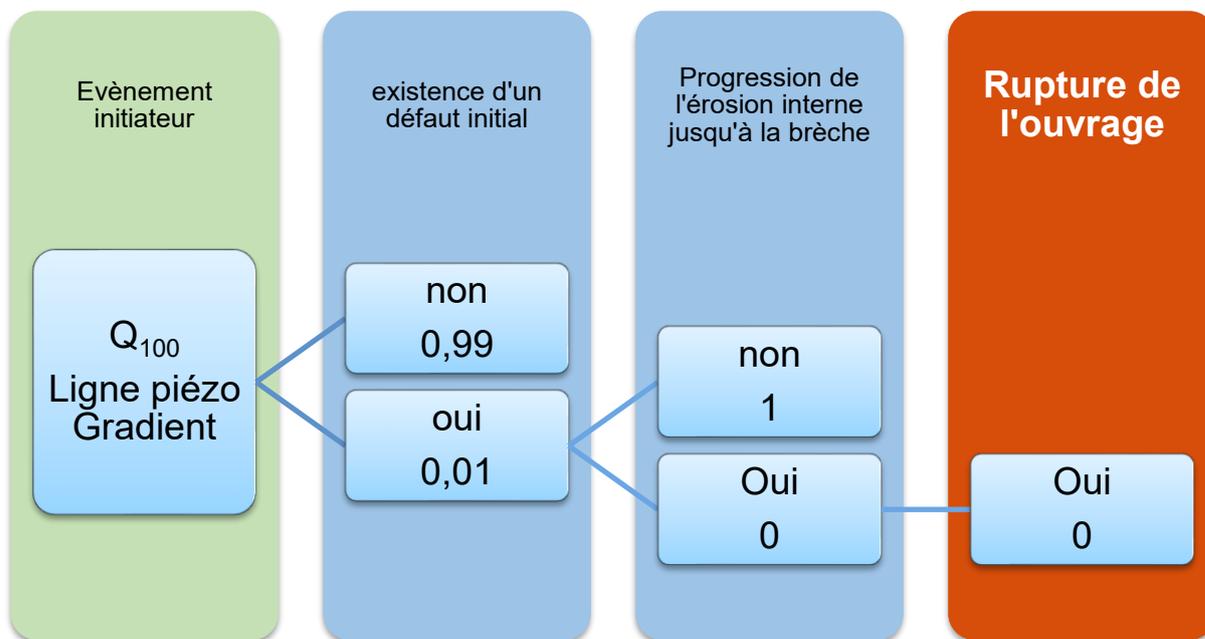


Figure 132 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T1

Tronçon T2

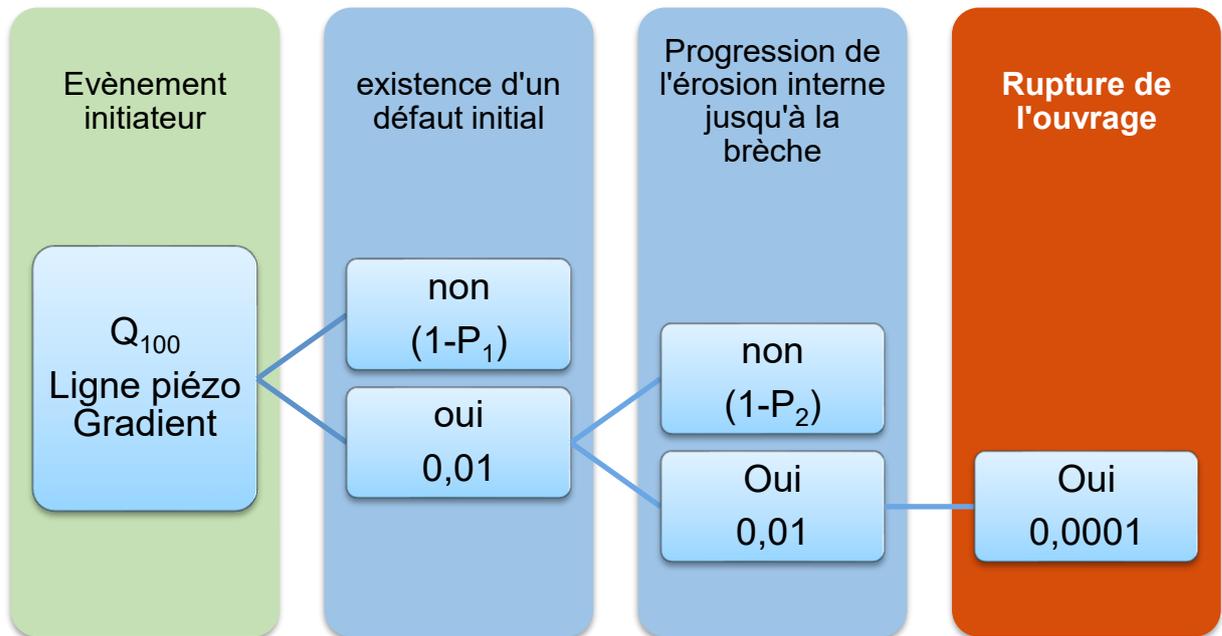


Figure 133 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T2

Tronçon T3

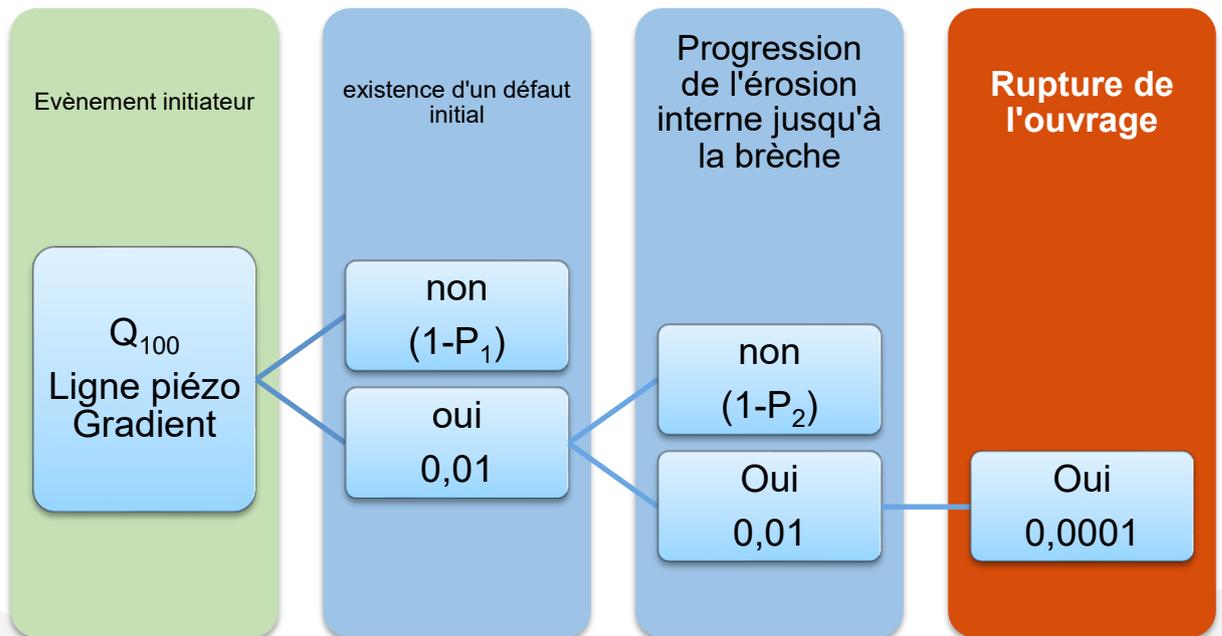


Figure 134 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T3

Tronçon T4

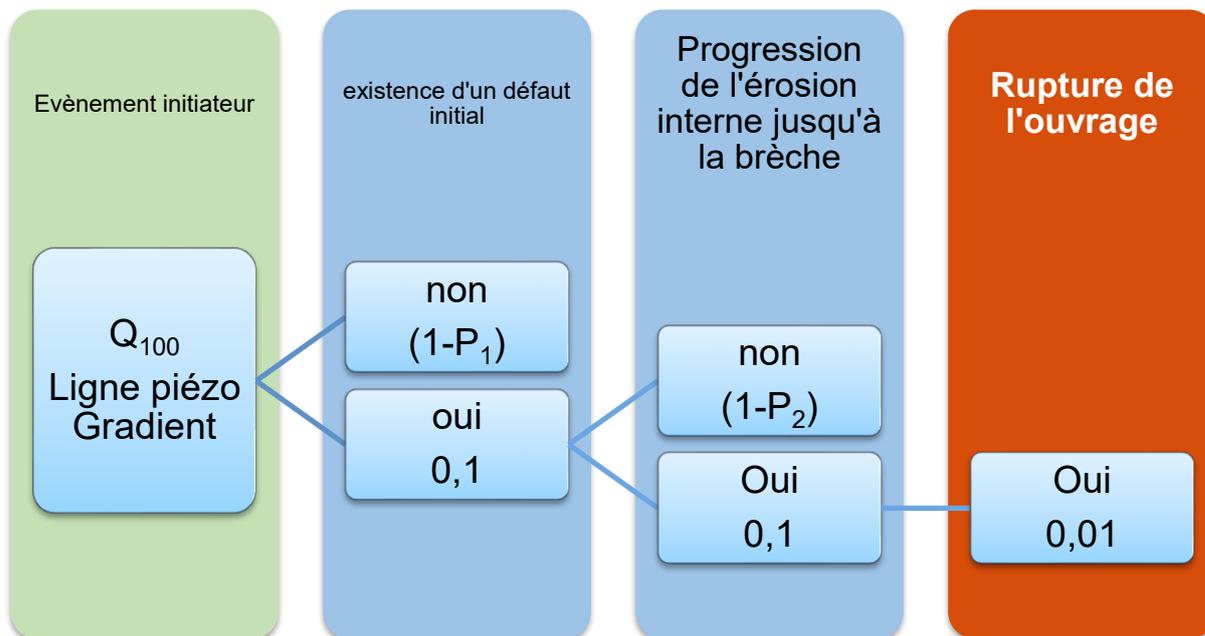


Figure 135 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T4

Tronçon T5

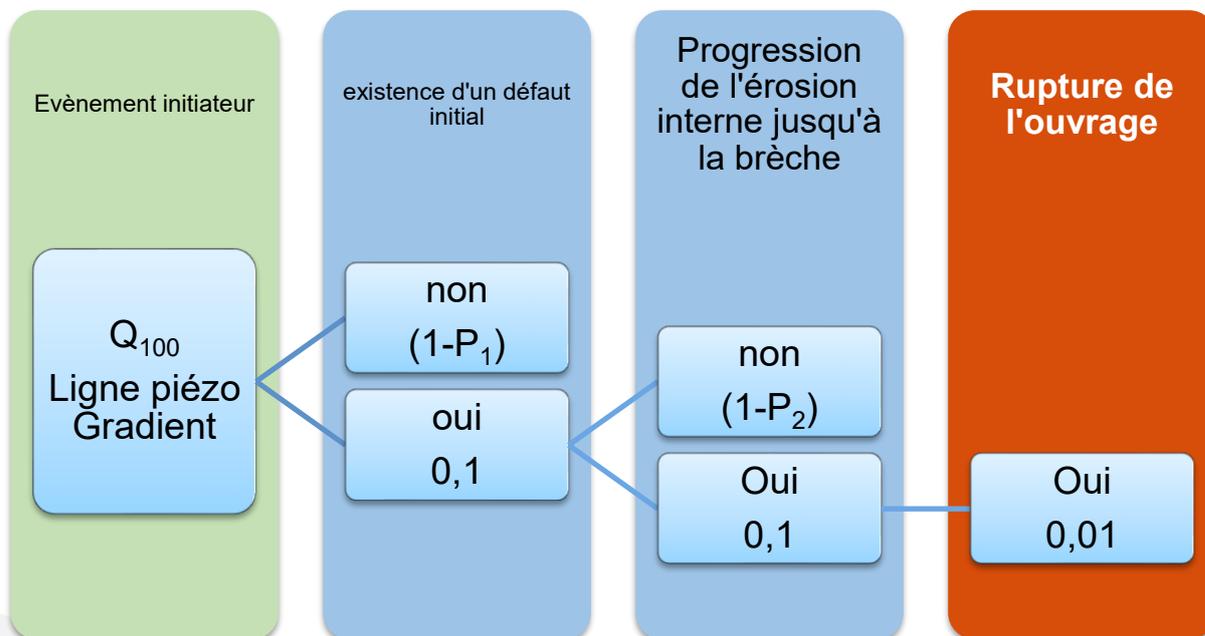


Figure 136 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T5

Tronçon T6

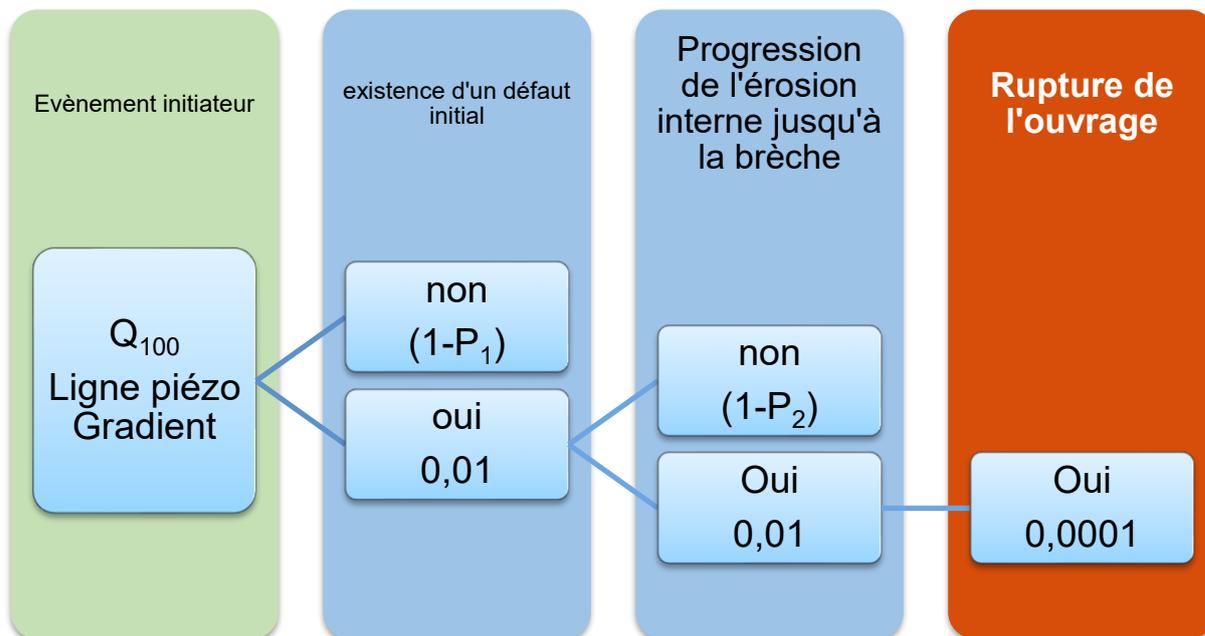


Figure 137 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T6

Tronçon T7

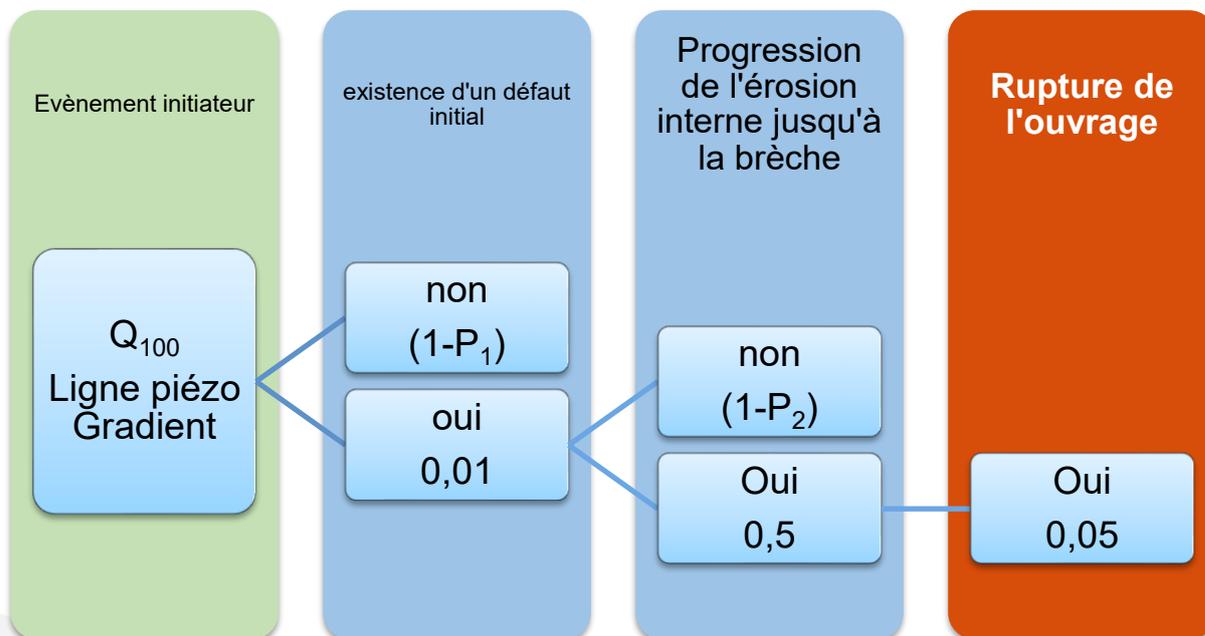


Figure 138 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T7

Tronçon T8

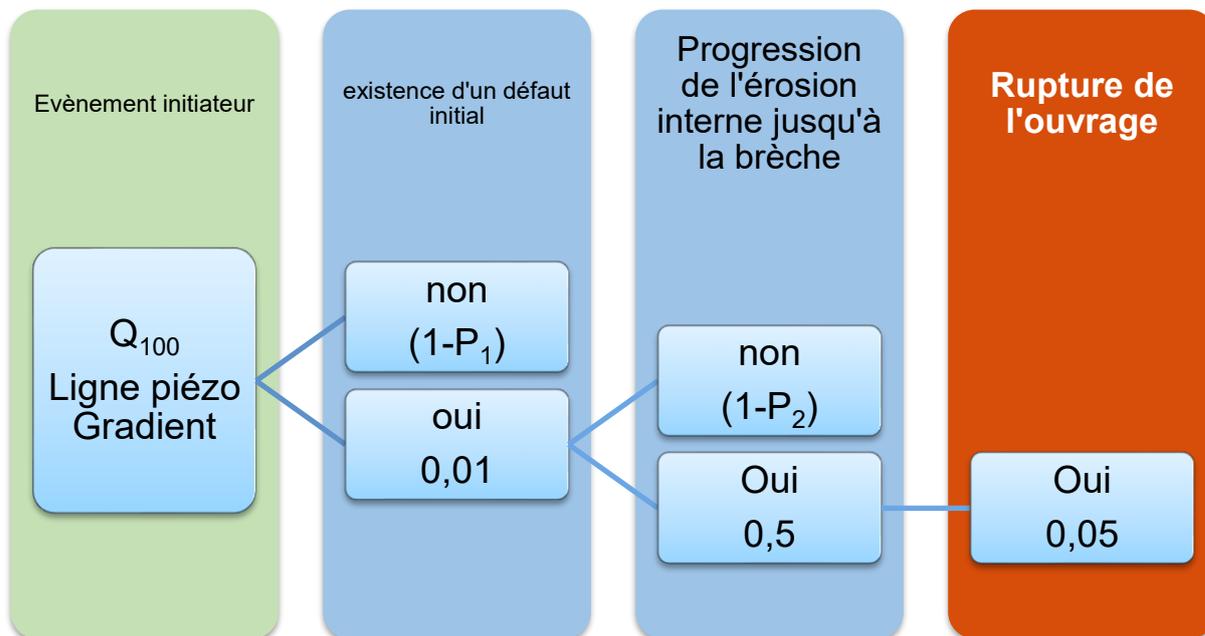


Figure 139 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T8

Tronçon T9

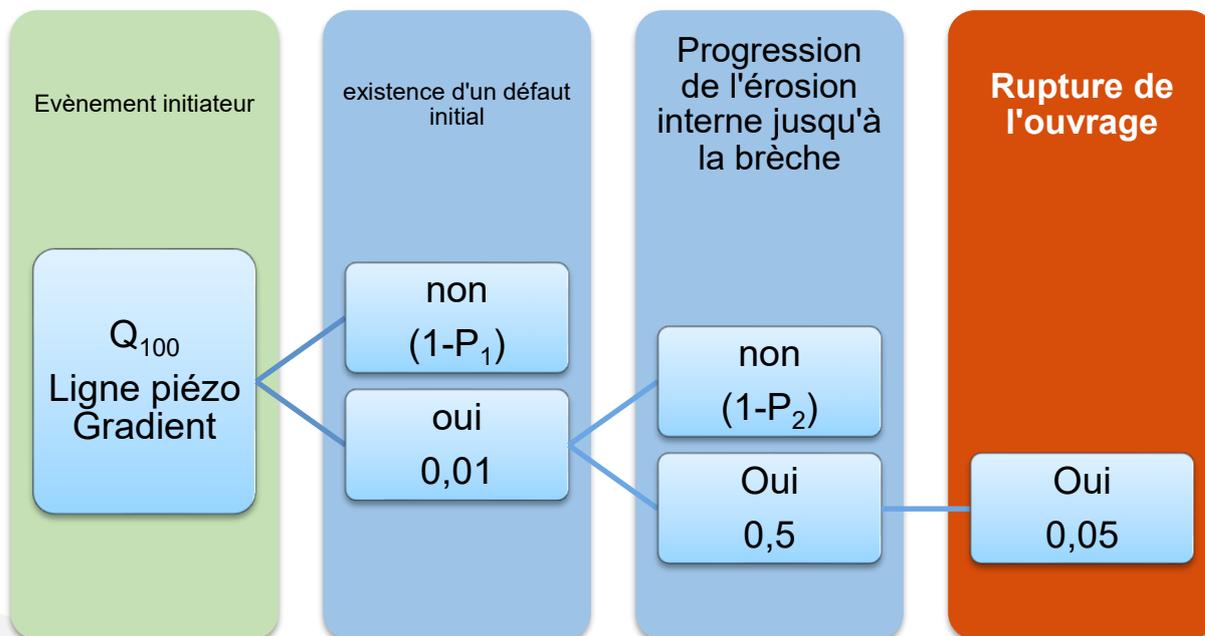


Figure 140 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion de conduit - Tronçon T9

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_{100}

Tronçon	Probabilité (%)
T1	0 %
T2	0,01 %
T3	0,01 %
T4	1 %
T5	1 %
T6	0,01 %
T7	5 %
T8	5 %
T9	5 %

Figure 141 - Probabilités de défaillance par érosion de conduit des tronçons

7.3.2.5.4 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).

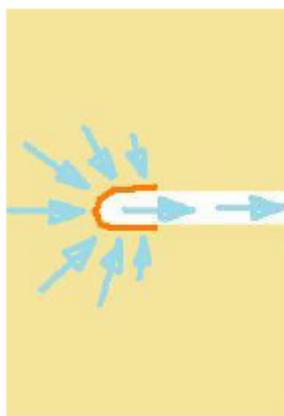


Figure 142 - Schéma du phénomène d'érosion régressive

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 bouillie 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).

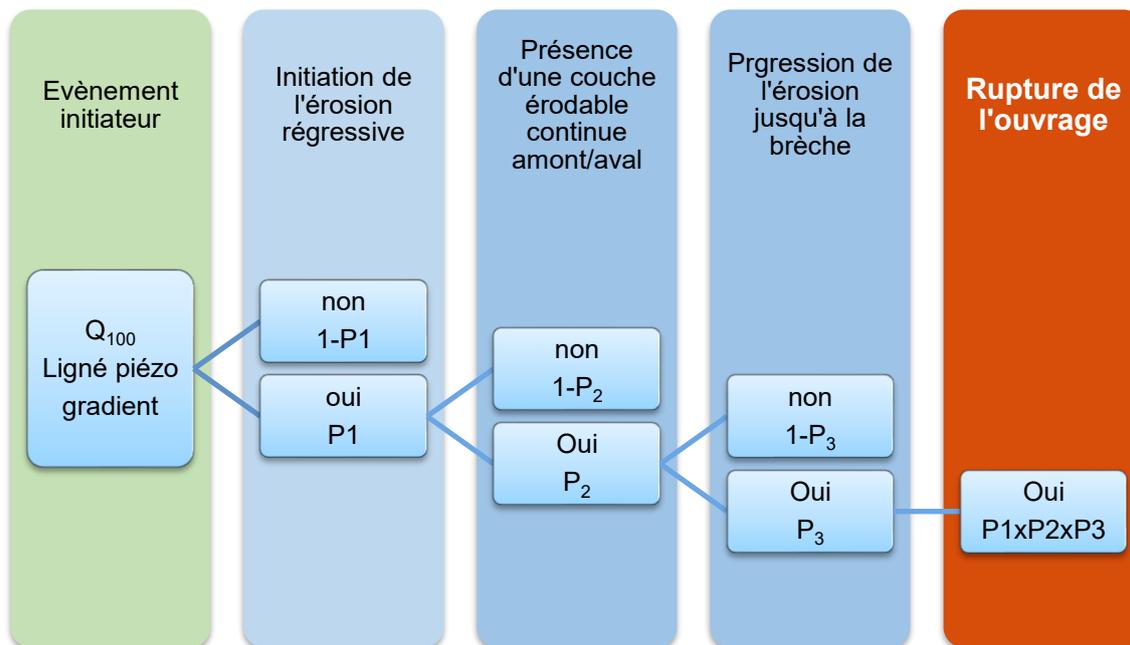


Figure 143 - Arbre de défaillance associé à la rupture par érosion régressive

Les tronçons T1 à T3 et le tronçon T6 présentent des rideaux de palplanches dans le corps de la digue, Ils ne sont donc pas sensibles au phénomène d'érosion régressive.

Les matériaux des tronçons T6 à T9 seront déterminées en phase projet afin de ne pas présenter de sensibilité à l'érosion régressive.

- Caractérisation des matériaux potentiellement érodables

Les essais géotechniques font ressortir ponctuellement des matériaux érodables sur les tronçons T4 et T5, correspondant aux tronçons conservant en partie amont les matériaux des digues actuelles, notamment des sables graveleux.

- Appréciation du gradient hydraulique moyen

Le gradient est estimé sur la base du gradient moyen (H/L) de manière géométrique. Ce gradient correspond au rapport entre :

- H l'écart entre la ligne d'eau maximale en crue (Z_{Q100}) et la cote du pied de digue côté aval,
- L la distance horizontale entre le point d'entrée de la ligne d'eau dans la digue et le pied de digue côté aval.

Le gradient moyen majore le gradient susceptible d'affecter un horizon amont/aval érodable.

Il intègre implicitement des données géométriques sur la coupe de l'ouvrage.

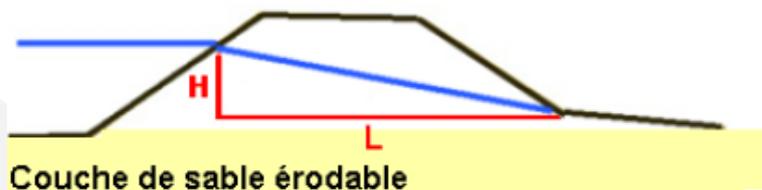


Figure 144 - Illustration du gradient moyen

On retrouve pour les tronçons étudiés les gradients suivants pour une crue centennale :

Tronçon	H (m)	L (m)	Gradient moyen (H/L)
T4	3,3	14	0,24
T5	2,7	14	0,19

- **Détermination du gradient hydraulique critique**

L'abaque de Sellmeijer donne une estimation du gradient critique en fonction de la perméabilité géométrique du matériau κ et du diamètre correspondant à 70% du tamisat. D_{70} du matériau.

La perméabilité géométrique κ peut être estimée à partir des valeurs de perméabilité K mesurées in-situ par des essais Lefranc : $\kappa = \frac{K \times v}{g}$ avec v la viscosité cinématique.

Le gradient critique dépend du coefficient adimensionnel $(\kappa \cdot L)^{1/3} / D_{70}$, où L est la longueur de la couche considérée.

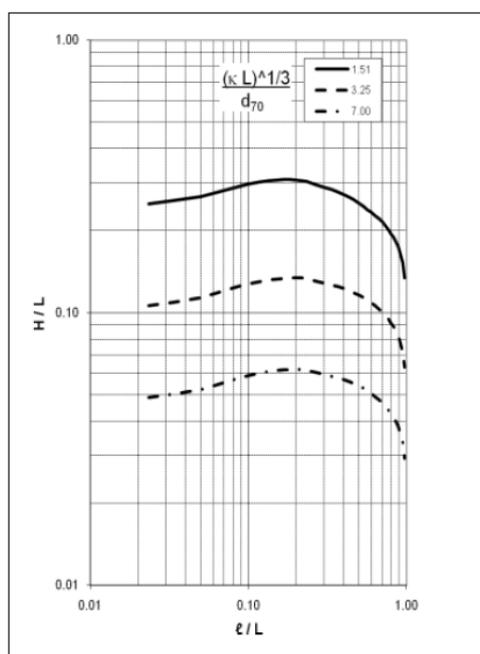


Figure 145 - Abaque de Sellmeijer

Le gradient critique déduit de l'abaque de Sellmeijer est donné ci-dessous :

Tronçon	D_{70} (mm)	K (m/s)	Kg (m ²)	$(K_g \times L)^{1/3} / D_{70}$	Gradient critique i_c
T4	15	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-3}$	>0,5
T5	2	10^{-6}	10^{-13}	$7,5 \cdot 10^{-3}$	>0,5

Le coefficient adimensionnel est en dehors des courbes de l'abaque, on considère donc une valeur de gradient critique sécuritaire de 0,5.

- **Initiation de l'érosion régressive**

Au vu de ces résultats, il est proposé de retenir la probabilité suivante :

Tableau 48 - Evaluation de la probabilité conditionnelle d'initiation de l'érosion régressive

Tronçon	H/L	i_c	Probabilité associée
T4	0,24	>0,5	Très improbable 0,01
T5	0,19	>0,5	Très improbable 0,01

Présence d'une couche érodable continue amont/aval (P2)

L'entraînement du matériau érodable ne peut générer la formation d'une brèche que si d'autres conditions sont réunies :

- La couche doit avoir une continuité amont/aval ;
- La couche doit avoir une épaisseur suffisante (plusieurs décimètres) pour permettre la formation d'un conduit suffisamment important pour entraîner les matériaux encadrant la couche.

Les coupes types des tronçons T4 et T5 permettent d'affirmer que les épaisseurs de couches sont suffisantes pour permettre le développement des conduits.

Au vu de ces résultats, il est proposé de retenir la probabilité suivante :

Tableau 49 - évaluation de la probabilité de présence d'une couche érodable amont/aval - érosion régressive

Tronçon	Continuité de la couche amont/aval	Epaisseur de la couche	Probabilité associée
T4	0,24	>0,5	Probable 0,9
T5	0,19	>0,5	Probable 0,9

Progression de l'érosion régressive (P3)

Dans le cas des digues fluviales, les durées de crue ne sont probablement pas toujours suffisantes pour pleinement développer l'érosion régressive. Cela pourrait expliquer pourquoi on observe tant de tumulus de sable et si peu de ruptures par érosion régressive. Sur les rares cas documentés (accidents et essais), l'érosion régressive, détectée au pied des digues par l'apparition de tumulus de sable semble prendre plus de temps à se développer que l'érosion de conduit.

La durée de mise en charge de la digue au-dessus de la cote du pied de digue aval est inférieure à 1 jour. Il est donc proposé de retenir la probabilité suivante :

Tronçon	Durée de sollicitation du talus de la digue	Probabilité associée
T4	<1 jour Insuffisant pour conduire à la rupture	Improbable 0,1
T5	<1 jour Insuffisant pour conduire à la rupture	Improbable 0,1

Les probabilités de rupture des tronçons concernés par l'érosion régressive sont décrites dans les arbres de défaillance suivants :

Tronçon T4

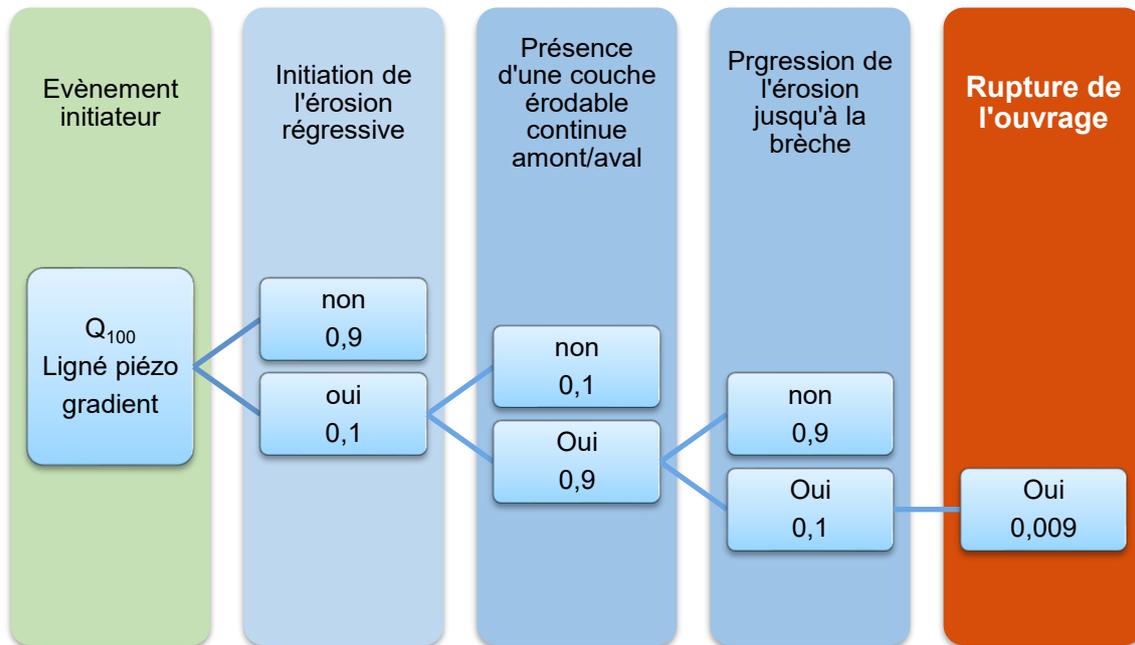


Figure 146 - Arbre de défaillance associé à la rupture par érosion régressive – Tronçon T4

Tronçon T5

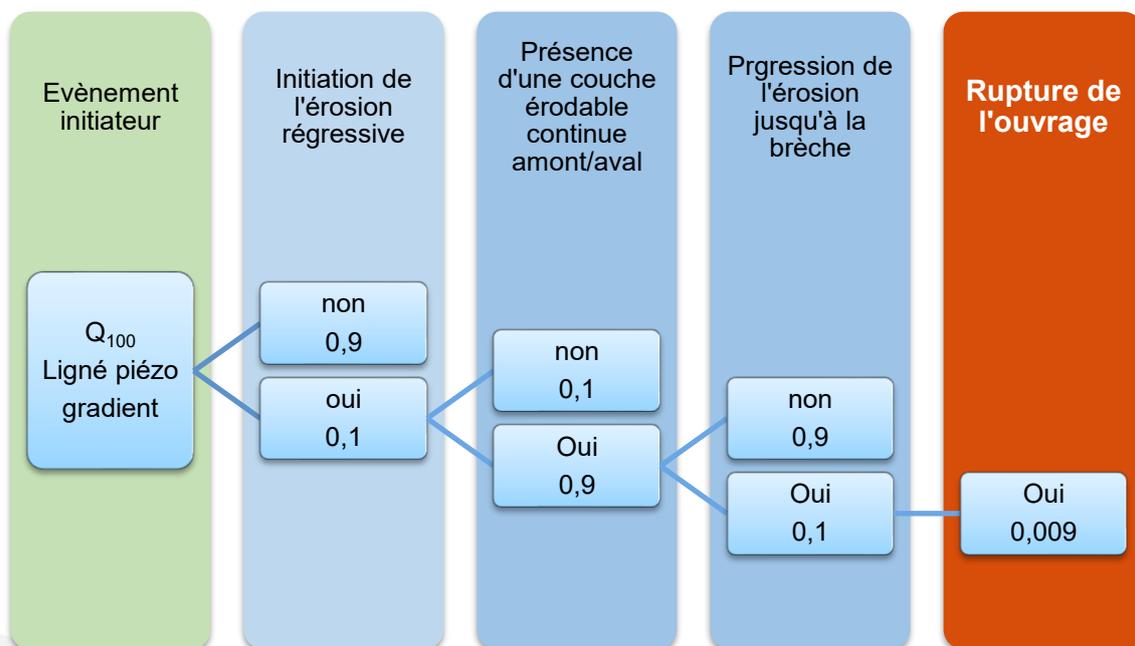


Figure 147 - Arbre de défaillance associé à la rupture par érosion régressive – Tronçon T5

7.3.2.6 Rupture par érosion externe

7.3.2.6.1 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 relativement forts (entre 7 et 8m/s au maximum). Cependant les effets des vents principaux observés restent limités au vu de la configuration du Borne au droit de la digue étudiée. L'orientation principalement Sud-Ouest/Nord-Est et Sud-Est/Nord-Est du Borne ne permet pas un Fetch suffisant vis-à-vis des vents importants, provenant principalement du Sud, et du Sud-Est (avec une génération de vagues vers la rive opposée)

⇒ **Mode de rupture ne concernant pas la digue en RG du borne.**

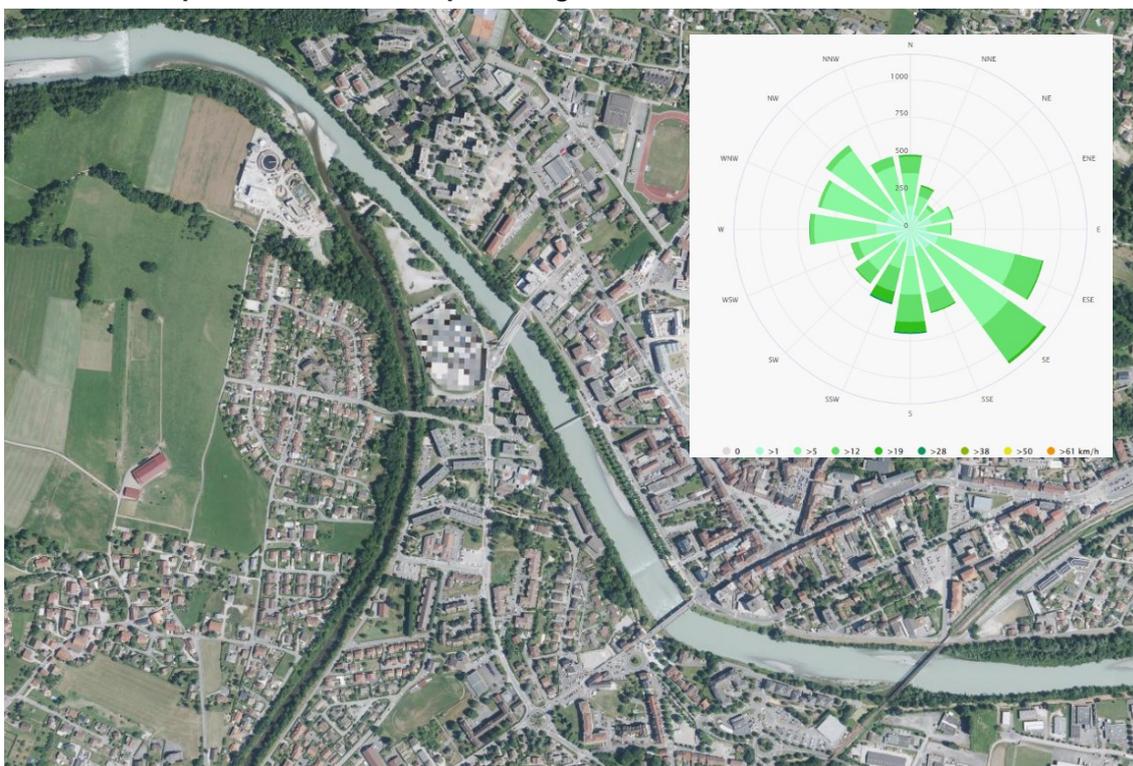


Figure 148 - Rose des vents à Bonneville (Source : Meteoblue)

Erosion sous l'effet du courant

L'érosion sous l'effet du courant concerne l'érosion du talus côté Borne de la digue, ou le sapement de la digue par érosion de la risberme sur les tronçons concernés.

Le graphique ci-dessous donne les vitesses d'écoulement maximales du Borne modélisées devant la digue (ce graphique est issu de la note de calcul hydraulique rédigée par CNR en 2021).

On constate que pour chacun des tronçons les vitesses évoluent entre 2 et 4 m/s.

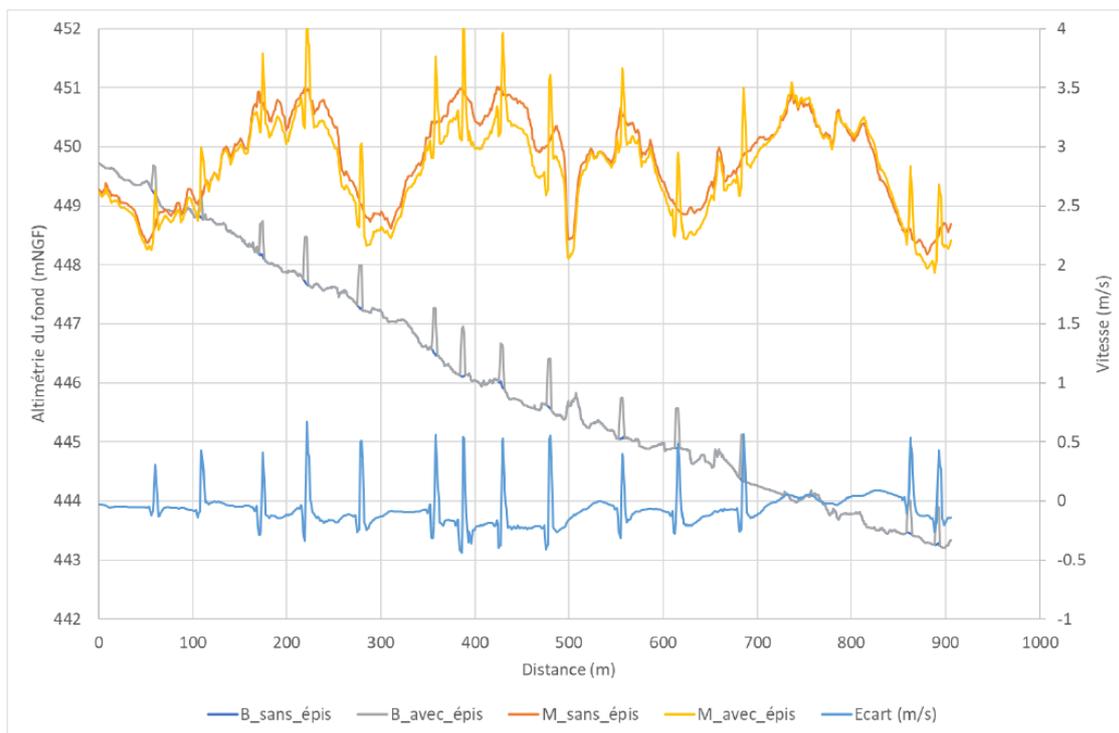


Figure 149 - Profil en long du fond (B) et des vitesses (M) avec et sans épis pour la rive gauche du Borne à Q100

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 Borne 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 du Borne 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.

7.3.2.6.2 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 Borne de la digue ou bien le sapement de la digue par érosion de la risberme.

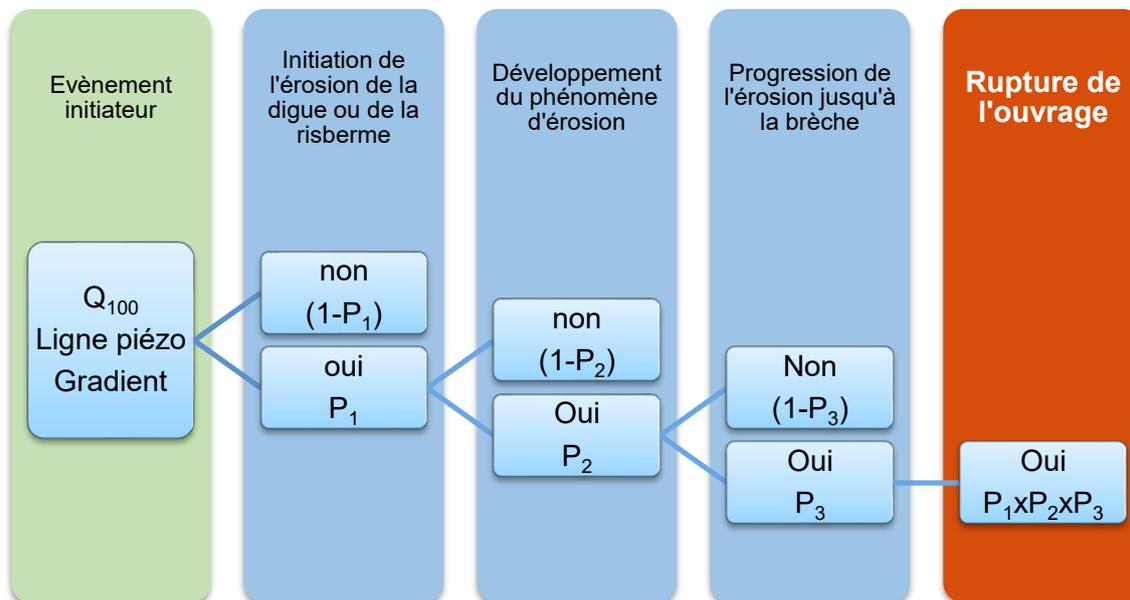


Figure 150 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe

7.3.2.6.3 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.

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 du Borne, les dimensions des enrochements des épis 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.

La vitesse maximale modélisée en pied de berge est de 4,15 m/s, ce qui permet de définir par la formule d'Isbach une nécessité d'emploi d'enrochements de diamètre D_{50} de 59cm, équivalent à une masse W_{50} de 400kg. Il a ainsi été déterminé que les enrochements mis en place seront de la classe 300/1000 kg.

On retrouve pour les différents tronçons les données de vitesses maximales en pied de berge et de blocométrie suivantes :

Tronçons	V _{max,Q100} (m/s)	Type d'enrochements (kg)
T1	-	300/1000
T2	4,12	300/1000
T3	4,12	300/1000
T4	3,97	300/1000
T5	3,29	300/1000
T6	3,6	300/1000
T7	2,1	-
T8	1,9	-
T9	1,5	-

Les enrochements ayant été dimensionnés pour des vitesses égales ou supérieures aux vitesses maximales sur les tronçons, **on considère que l'initiation de l'érosion externe est improbable. On prendra donc une probabilité de 0,1.**

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.

En ce qui concerne la tenue des techniques végétales, nous utilisons la définition de la contrainte tractrice d'un écoulement sur un talus de pente d'angle β avec l'horizontale qui s'écrit :

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

Avec :

- φ : angle de frottement du sol (°)
- $\tau_0 = \gamma_w \cdot R_h \cdot i$ la contrainte tractrice sur fond plat où :
 - γ_w le poids volumique de l'eau (9,81 kN/m³),
 - R_h le rayon hydraulique (m)
 - i , la pente du cours d'eau.

La vitesse est introduite dans l'équation de la contrainte tractrice en utilisant la formule de Manning-Strickler : $V = k_s \cdot R_h^{2/3} \cdot i^{1/2}$

k_s , le coefficient de rugosité est ici pris égal à 15 pour les digues de Blagnac.

On en déduit la formule générale :

$$\tau_b = \sqrt{1 - \frac{\sin(\beta)^2}{\sin(\varphi)^2}} \cdot \gamma_w \cdot \frac{V^2}{k_s^2 \cdot R_h^{1/3}}$$

Tronçons concernés par du confortement mixte :

- RG-T6 : reprise intégrale de digue. Talus amont protégé en technique mixte contre l'érosion externe :
 - Enrochement 300/1000 kg jusqu'au niveau du débit moyen mensuel du mois de mai surélevé de 20 cm,
 - Lits de plants et plançons 20 cm au-dessus du niveau du débit moyen mensuel de mai établis sur trois niveaux
 - Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de prairie indigène adaptée (pas de plantations ligneuses au-dessus du TN).
- RG-T7 : pas de GV
- RG-T8 et T9 : recul de la digue et un adoucissement du talus amont avec emploi de techniques de génie écologique

Les vitesses et hauteurs d'eau sont directement issues du modèle réalisé par CNR. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 50 : Vitesses et contraintes tractrices maximales pour l'érosion externe pour la Q100

Tronçon	PK amont	PK aval	Hauteur d'eau en talus de digue (m)	Vitesse en talus de digue (m/s)	Contrainte tractrice en talus de digue (N/m ²)
RG-T2	1350	1140	2.5	3 – 3.5	70 - 90
RG-T3	1140	1020	2.5	3 – 3.5	70 - 90
RG-T4	1020	605	2.5	3 – 3.5	70 - 90
RG-T5	590	455	2.5	3 – 3.5	70 - 90
RG-T6	455	355	2.0	3 – 3.5	60 - 80
RG-T7	355	225	2.0	3 – 3.5	60 – 80
RG-T8	225	145	2.0	3 – 3.5	60 - 80
RG-T9	145	50	3.0	2.5 – 3	40 - 60

RG-T1 correspond au passage de la piste cyclable sous la RD1201, ce tronçon ne fait pas partie du système d'endiguement même si des aménagements y sont prévus.

La résistance d'un talus ou d'une berge se caractérise principalement par la nature du sol (fonction du D50 et de la cohésion) mais également du revêtement de ce dernier.

L'emploi de techniques de génie végétal vient apporter une résistance supplémentaire :

- Lits de plants et plançons disposés en partie basse de digue côté cours d'eau

- Végétalisation simple de la partie supérieure du talus sous forme de prairie indigène adaptée (pas de plantations ligneuses au-dessus du TN).

Le tableau ci-après, issu du Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales (B. Lachat), donne les valeurs de résistance à l'arrachement de différents matériaux et techniques de confortement de berge.

Matériaux et techniques	τ (N/m ²)
Sable fin ($\leq 0,2$ mm)	2
Petit gravier (< 2 cm)	12
Gazon quelconque, longtemps immergé	15-18
Gazon préfabriqué	25-30
Gazon quelconque, peu immergé	25-50
Petits galets	40-60
Fascine de roseaux	50
Saules, 1-2 ans	50-70
Gazon jeune, bonne qualité	60-80
Saules, > 2 ans	100-140
Herbacées sur *géotextile tissé	120
Pavé-gazon	160
Tressage de saule, pieux battus	180
Enrochement	200
Pieux dans enrochement en vrac	250
Fascine de saule (pieux battus)	250
Couche de branches à rejet	300
Boutures interstitielles	350
Saules, 20 ans	800

Figure 151 : Valeurs de résistance à la contrainte d'arrachement de différents matériaux et techniques en cours d'eau (source : B. Lachat)

Tableau 51 : Principaux critères de dimensionnement / bien-fondé des techniques de protection en génie végétal (SUEZ CONSULTING)

Technique végétale	Localisation	Critères					
		Résistance hydrique	Résistance mécanique à la pose théorique [N/m ²]	Résistance mécanique théorique après 3 ans [N/m ²]	Rapidité de reprise	Gains écologiques	Coûts
Ensemencement avec géotextile	Ensemble de la berge	++	+ 10-30 N/m ²	++ 100 N/m ²	+++	++	+++
Matériaux grossiers percés de matériaux graveleux terreux ensemencés	Ensemble de la berge	++	++ 20-35 N/m ²	++ 120 N/m ²	+++	++	+++
Lit de plants en plançons (avec enrochement en pied)*	Milieu de berge	+++	++ 120-160 N/m²	+++ >200 N/m²	++	+++	++
Boutures de salicacées*	Pied à milieu de berge	++	++ 60-80 N/m ²	+++ >150 N/m ²	++	++	++
Plantations	Haut de berge	++	+ 20 N/m ²	++ 100-150	++	++	++
Enrochements végétalisés*	Pied à milieu de berge	+	+++ 200 N/m ²	+++ 350 N/m ²	+	+ Invasives	-
Enrochements nus	Pied à milieu de berge	NC	+++ 250 N/m ²	+++ 250 N/m ²	NC	- Invasives	-

*Les techniques à base de bouture de salicacées peuvent supporter des contraintes > 800 N/m² si la reprise est bonne après 10 ans

Les 3 niveaux de lits de plants et plançons préconisés (avec enrochement en pied de berge) ont une résistance mécanique à la pose théorique de 120 à 160 N/m²

On retiendra finalement une gamme plus sécuritaire de valeurs comprises entre la tenue mécanique de boutures de salicacées et la tenue de lit de plants soit entre 80 et 120 N/m².

En fonction des résultats précédents et des performances connues des techniques de confortement en génie végétal, il est proposé de retenir la grille de probabilité suivante :

Analyse Sollicitation / résistance	Qualification verbale	Probabilité suggérée de Vick (2002)
$\tau b \leq 100 \text{ N/m}^2$	Initiation de l'érosion du talus très improbable	0.01
$100 \text{ N/m}^2 < \tau b \leq 125 \text{ N/m}^2$	Initiation de l'érosion du talus improbable	0.1
$125 \text{ N/m}^2 < \tau b \leq 150 \text{ N/m}^2$	Initiation de l'érosion du talus incertaine (neutre)	0.5
$150 \text{ N/m}^2 < \tau b \leq 200 \text{ N/m}^2$	Initiation de l'érosion du talus probable	0.9
$\tau b > 200 \text{ N/m}^2$	Initiation de l'érosion du talus très probable	0.99

En conclusion la probabilité (P1) retenue et commune à tous les tronçons d'étude concernés par des techniques de confortement en génie végétal soit T6 – T8 et T9 en rive gauche du Borne est de 0.01

Sur tous les autres tronçons confortés en techniques minérales, les enrochements ayant été dimensionnés pour des vitesses égales ou supérieures aux vitesses maximales sur les tronçons, on considère que l'initiation de l'érosion externe est improbable. On prendra donc une probabilité de 0,1.

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-érosive (type gabions, enrochements ou fascines végétales) réduit le risque d'érosion externe ;
- **Franc-bord de berge** : Le franc-bord peut contribuer à protéger le pied de la digue de l'affouillement, sous réserve qu'il ne soit pas remobilisé lors de la crue. On observe que les forces tractrices en présence sont susceptibles de remobiliser des sédiments fins enherbés, voire des sédiments moyens à grossiers. La question est alors de savoir la largeur d'érosion éventuelle lors d'une crue. La présence d'un franc bord est donc considérée comme un facteur plutôt favorable, sans être une protection en tant que telle.
- **Ouvrages singuliers** : Des ouvrages singuliers, sur le talus de digue ou en berge, peuvent créer des perturbations augmentant localement le champ de vitesse. C'est un facteur défavorable.
- **Végétation côté Borne** : La présence de végétation en pied de parement amont ou sur la berge peut accélérer le processus d'érosion externe localement, notamment la présence de tronc/arbre isolé de diamètre important. On distingue cependant :

- Les aspects favorables : augmentation de la résistance liée à l'enracinement, réduction des vitesses par effet de peigne ...
- Les aspects défavorables : source de perturbations locales, encoches d'érosion en cas d'arrachement du fait de la pression dynamique, du vent...

La présence ou non d'arbres penchés en direction de la rivière est à considérer en notant que d'après nos observations de terrain, il n'y a généralement pas de gros arbres penchés sur le talus de la digue côté Borne mais de tels individus sont observables sur la risberme et la berge. La description des tronçons est donnée au chapitre 5.2 présent rapport.

- **Durée de la crue** : Une crue longue sollicitera d'avantage les talus des digues par rapport à une crue courte, favorisant la propagation de l'érosion externe.

L'analyse des tronçons est présentée dans le tableau ci-après.

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)
T2	Largeur crête : entre 2 et 3 m Largeur assise : 20 m Pente talus amont : 2H/1V Présence d'enrochement en épis <i>Neutre</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Oui : environ 10 m <i>Très favorable</i>	Non <i>favorable</i>	Oui présence d'arbre sur le France bord et en crête <i>Défavorable</i>	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01
T3	Largeur crête : entre 2 et 3 m Largeur assise : 20 m Pente talus amont : 2H/1V Présence d'enrochement en épis <i>Neutre</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Oui : environ 10 m <i>Très favorable</i>	Non <i>favorable</i>	Oui présence d'arbre sur le France bord et en crête <i>Défavorable</i>	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01
T4	Largeur crête : 4 m Largeur assise : 12-15m Pente talus amont : 2,5H/1V Présence d'enrochement en épis <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01
T5	Largeur crête : 4 m Largeur assise : 12-15m Pente talus amont : 2,5H/1V Présence d'enrochement en épis <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01
T6	Largeur crête : 4 m Largeur assise : 12-15m Pente talus amont : 2,5H/1V Présence d'enrochement en épis <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01
T7	Largeur crête : 4 m Largeur assise : 12-15m Pente talus amont : 2,5H/1V Présence d'enrochement en épis <i>Favorable</i>	Oui : enrochements en épis <i>Favorable</i>	Non <i>Défavorable</i>	Non <i>Favorable</i>	Non <i>Favorable</i>	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01

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)
T8	Largeur crête : 4 m Largeur assise : 12-15m Pente talus amont : 2,5H/1V Présence d'enrochement en épis Favorable	Oui : enrochements en épis Favorable	Non Défavorable	Non Favorable	Non Favorable	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01
T9	Largeur crête : 4 m Largeur assise : 12-15m Pente talus amont : 2,5H/1V Présence d'enrochement en épis Favorable	Oui : enrochements en épis Favorable	Non Défavorable	Non Favorable	Non Favorable	<1 jour Favorable	Très improbable 0,01

Figure 152 - Synthèse des facteurs aggravant vis-à-vis de l'érosion externe

Progression jusqu'à la brèche (P3)

Une rupture par érosion externe/affouillement ne conduit pas forcément à une venue d'eau dangereuse.

La mise en place de palplanches côté terre sur les tronçons T1 à T3, la grande largeur de la digue des tronçons T4 à T6, et les faibles pentes (<2,5H/1V en aval et <3H/1V) permettent de considérer la probabilité de progression de l'érosion externe jusqu'à la brèche comme **improbable (P=0,1)**.

7.3.2.6.4 Analyse par tronçon

Tronçon T1

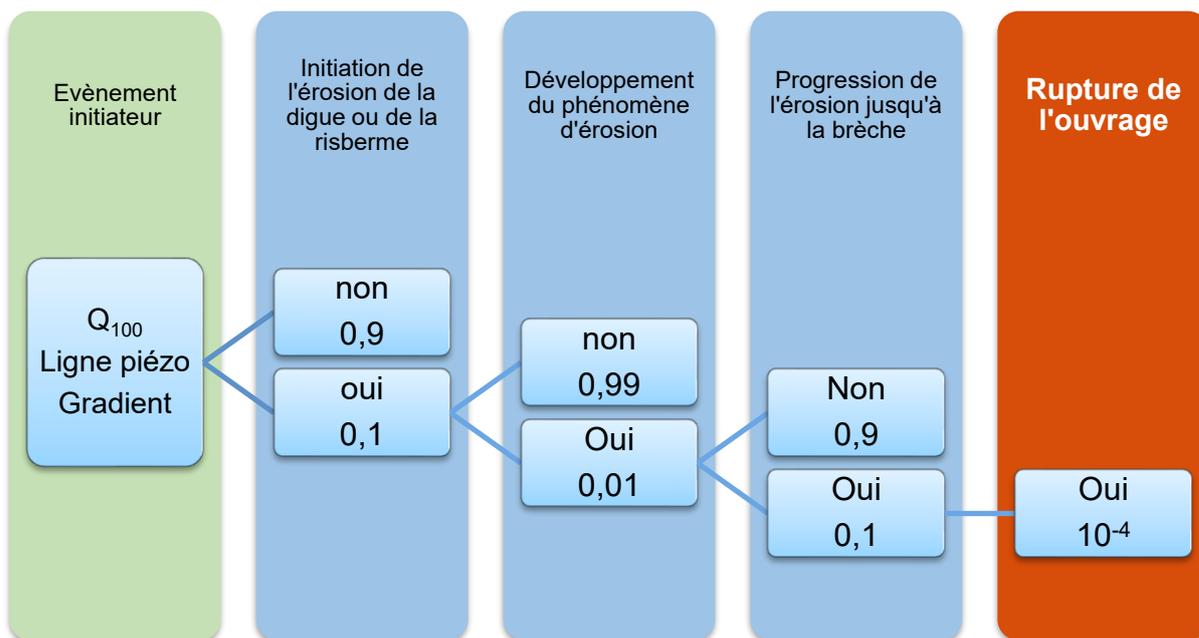


Figure 153 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T1

Tronçon T2

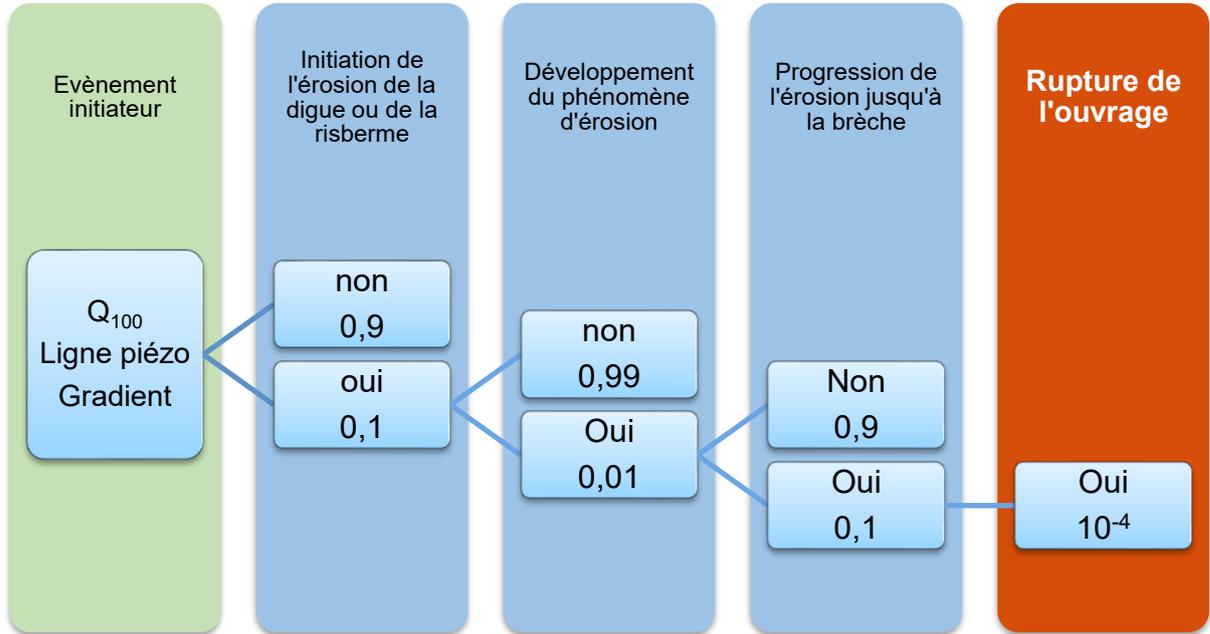


Figure 154 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T2

Tronçon T3

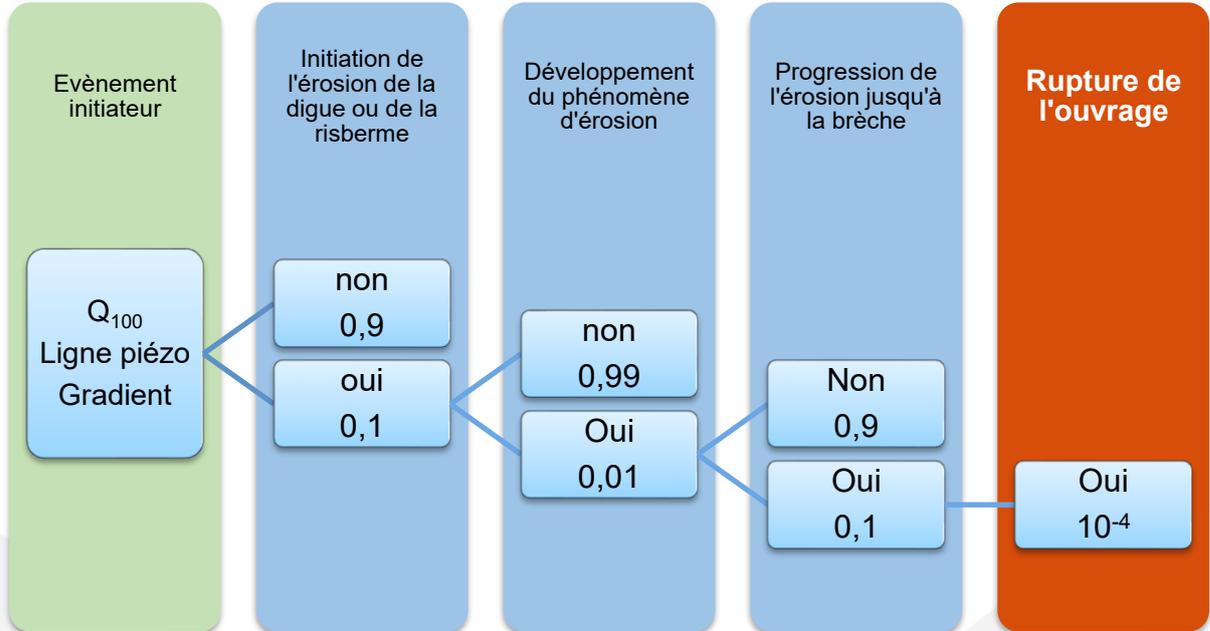


Figure 155 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T3

Tronçon T4

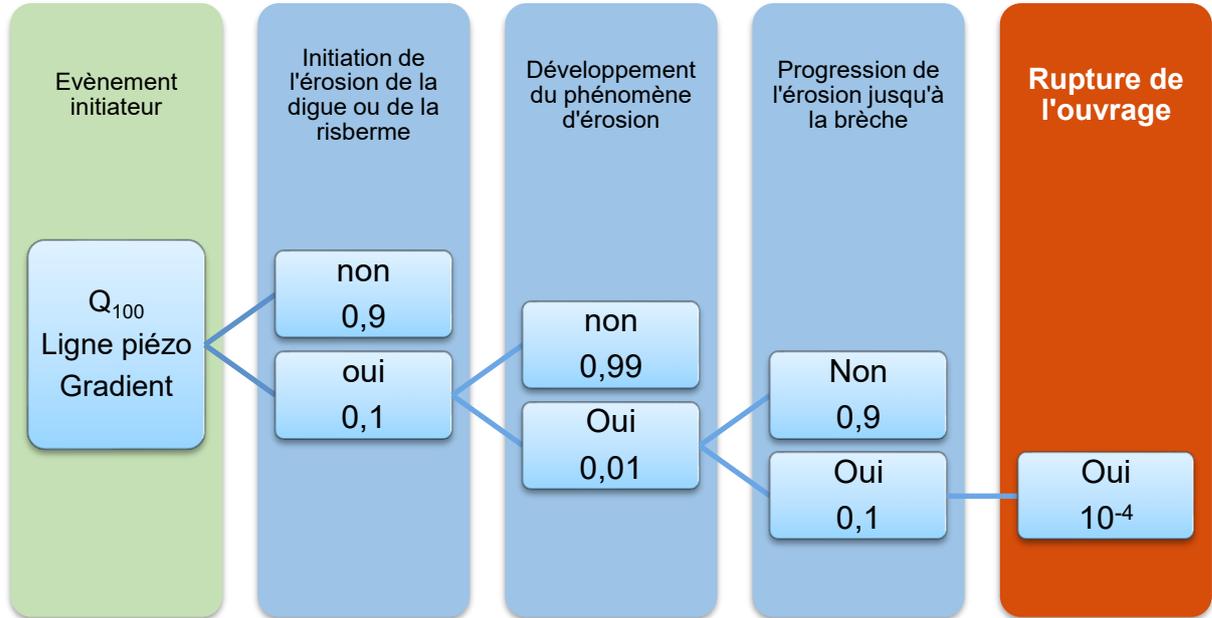


Figure 156 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T4

Tronçon T5

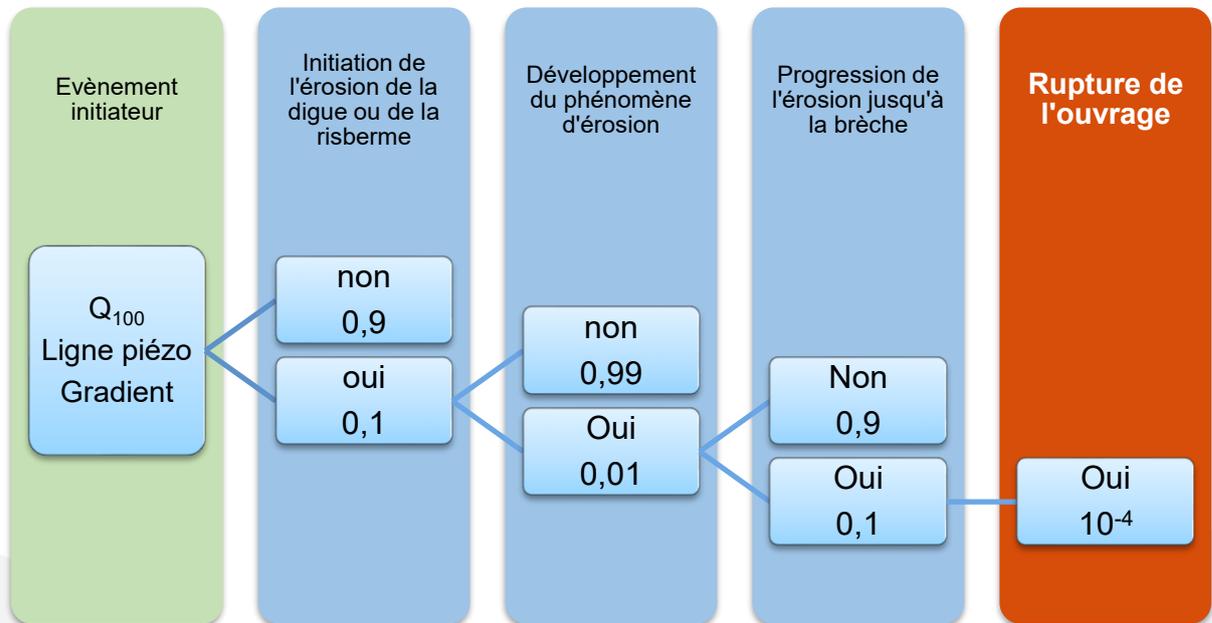


Figure 157 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T5

Tronçon T6

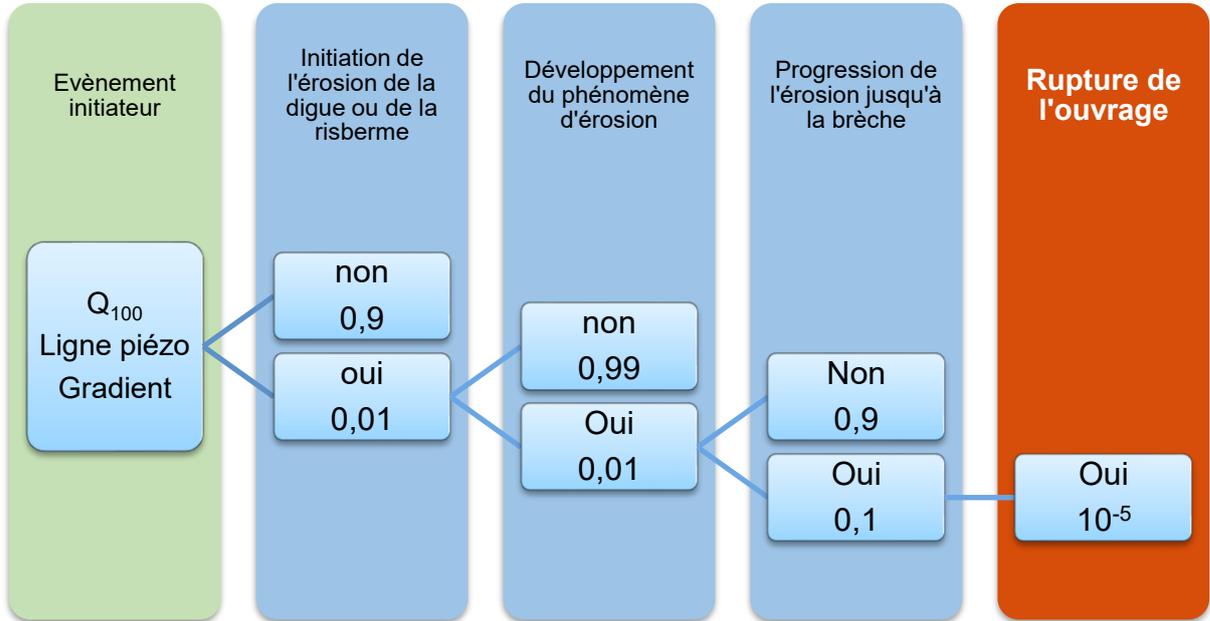


Figure 158 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T6

Tronçon T7

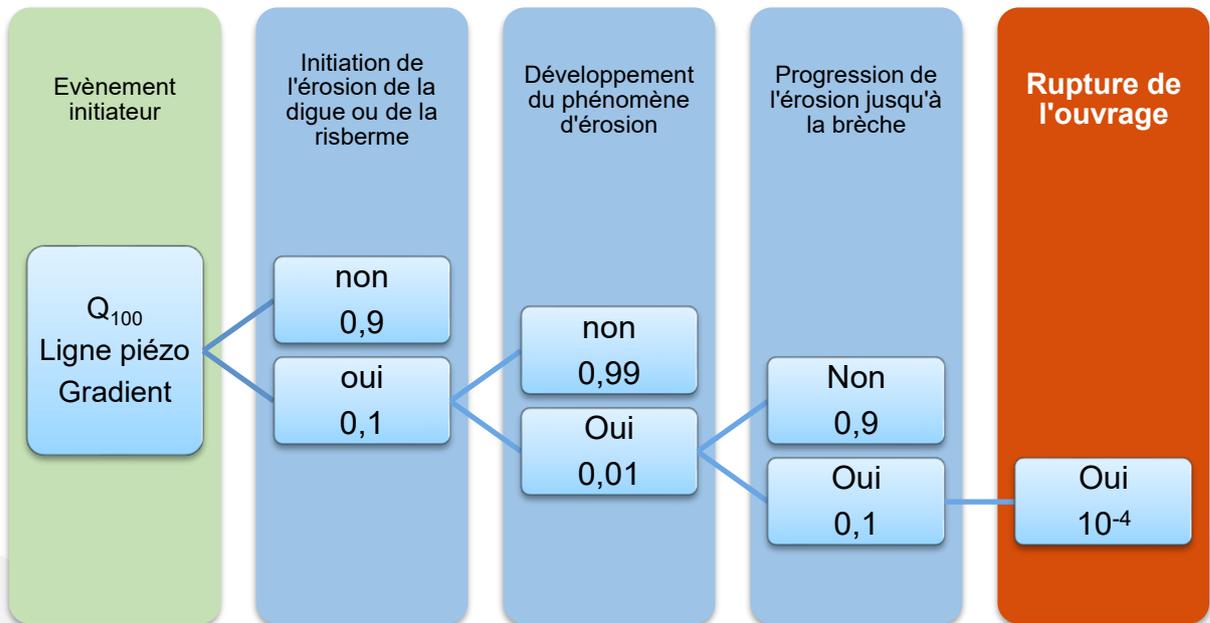


Figure 159 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T7

Tronçon T8

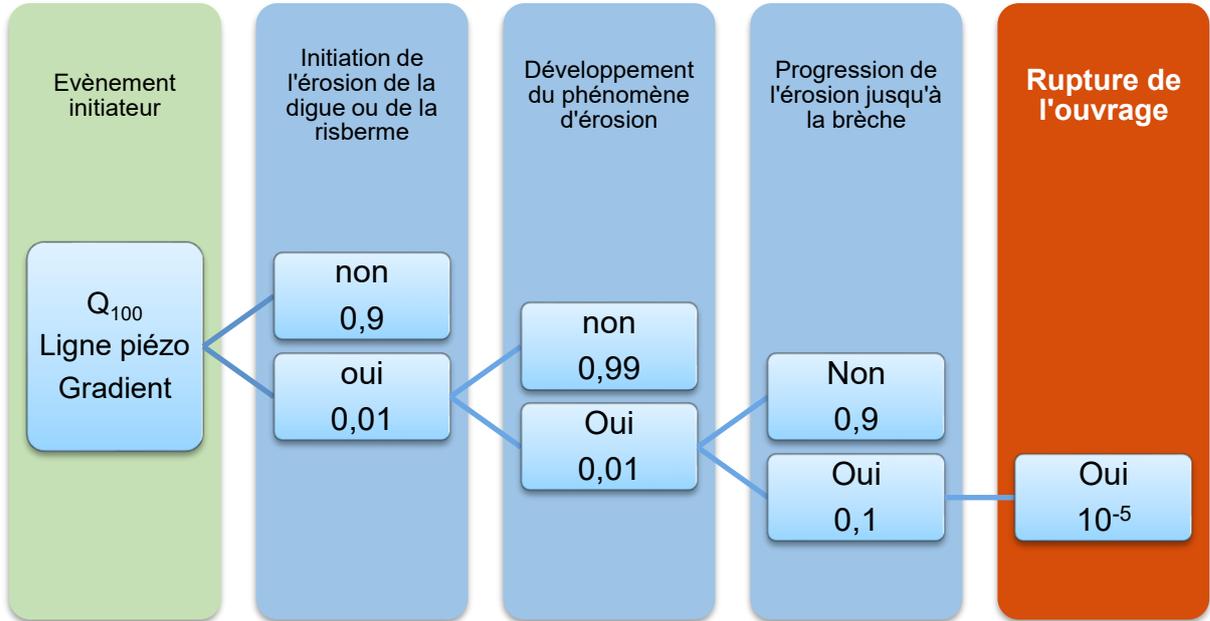


Figure 160 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T8

Tronçon T9

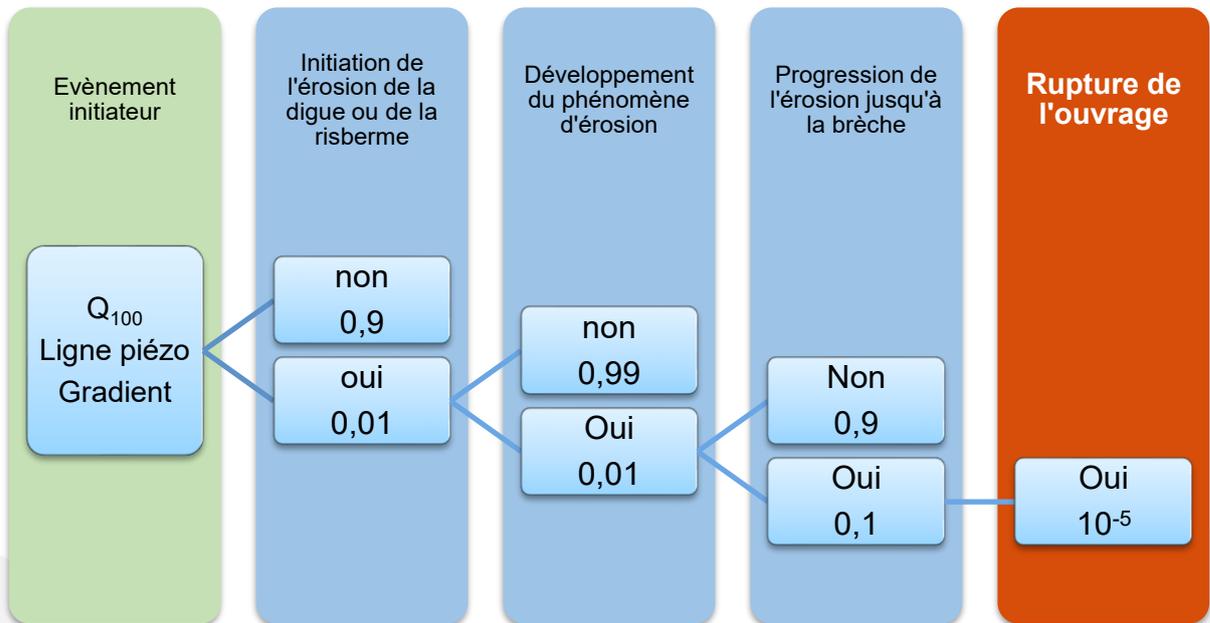


Figure 161 - Arbre de défaillance associé au mécanisme de rupture par érosion externe - Tronçon T9

7.3.2.7 Synthèse des probabilités de rupture et définition du niveau de protection

7.3.2.7.1 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 rideau de palplanche	Rupture par érosion de conduit	Rupture par érosion régressive	Rupture par érosion externe
T1	0 %	1 %	-	0 %	-	0,01
T2	0 %	-	0,3 %	0,01 %	-	0,01
T3	0 %	-	0,3 %	0,01 %	-	0,01
T4	0 %	0,7 %	-	1 %	0,9 %	0,01
T5	0 %	2,2 %	-	1 %	0,9 %	0,01
T6	0 %	-	5 %	0,01 %	-	0,001
T7	0 %	2,3 %	-	5 %	-	0,01
T8	0 %	1,1 %	-	5 %	-	0,001
T9	0 %	2,8 %	-	5 %	-	0,001

Tableau 52 - Synthèse des probabilités de rupture des ouvrages pour la crue centennale Q_{100}

A l'état projet, la digue en rive gauche du Borne présente les garanties structurelles suffisantes permettant d'assurer un niveau de protection égal à la crue centennale.

7.3.2.7.2 Niveau de sureté

Le tableau ci-dessous synthétise pour chacun des tronçons, en l'état actuel des connaissances, 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
T1	$Z_{Q100}+1m$		$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$
T2	$Z_{Q100}+1m$		$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$
T3	$Z_{Q100}+1m$		$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$
T4	$Z_{Q100}+1m$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$
T5	$Z_{Q100}+1m$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$
T6	$Z_{Q100}+1m$		$>Z_{Q100}$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$
T7	$Z_{Q100}+1m$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$
T8	$Z_{Q100}+1m$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$
T9	$Z_{Q100}+1m$	$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$		$>Z_{Q100}$

**Le niveau de sureté assuré par le système d'endiguement en rive gauche du Borne, à l'état projet, est justifié pour une crue de temps de retour 100 ans.
Le niveau de protection retenu par le MOA est la crue de temps de retour 100 ans (Q100).**

7.3.2.7.3 Niveau de danger

Vis-à-vis du risque surverse, on a démontré plus haut qu'une revanche de 50 cm (ZQ100 + 50 cm) correspondant au respect de la revanche recommandée permettait d'assurer un risque de moins de 50%.

Vis-à-vis du risque de glissement, les calculs ont démontré que pour une ZQ300 = ZQ100 + 30 cm environ, on garde un risque de rupture inférieur à 50%.

Pour les autres phénomènes l'évolution des gradients hydrauliques entre ZQ100 et ZQ100+30cm (ZQ300) est faible, un risque de rupture de 50% correspond aussi à un évènement hydraulique supérieur à Q300.

On en déduit 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
T1	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T2	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T3	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T4	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T5	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T6	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T7	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T8	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}
T9	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}	-	Z _{Q100+50cm} >Z _{Q300}

Tableau 53 - Estimation du niveau de danger de chacun des tronçons

En concertation avec le gestionnaire du système d'endiguement, il est considéré un niveau de danger (niveau de gestion) correspondant à une crue tri centennale (Q300). Ce niveau est sécuritaire pour la protection des biens et des personnes présents dans la zone protégée.

7.4 Conclusions

7.4.1 Profils types et dispositions constructives

L'ensemble des profils types présentés et dimensionnés dans les paragraphes précédents sont réalisables et valables moyennant :

- L'emploi de matériaux adaptés (voir ci-après) ;
- Une mise en œuvre soignée et dans les règles de l'art.

Du fait du peu d'espace disponible, la transition par couches filtres entre sols de nature granulométrique fortement différente ne pourra être réalisée. Ainsi, il est prévu de mettre en œuvre un géotextile anti contaminant et filtrant à ces interfaces, notamment les interfaces enrochements/remblai et enrochements/TN.

7.4.2 Matériaux

Remblai :

Le matériau utilisé pour les remblais (nouvelles digues et merlon) devra présenter les caractéristiques physiques minimales suivantes :

- Type sables limoneux ;
- Granulométrie étendue respectant les critères de filtres (interne et aux contacts) et de non tenue des conduits vis-à-vis des problématiques d'érosion interne ;
- $c' = 0$ kPa ;
- $f = 30^\circ$;
- $\gamma = 20$ kN/m³ ;
- $k = 10^{-4}$ m/s.

Enrochements :

Les enrochements devront présenter les caractéristiques physiques minimales suivantes :

- Blocométrie 300/1000 kg
- $c' = 0$ kPa ;
- $f = 45^\circ$;
- $\gamma = 26$ kN/m³ ;
- **non gélif, non friable**, non cassant, inaltérable à l'air ni à l'eau,
- Résistance à la compression sur cubes d'arêtes 5 cm supérieure à 50 MPa.

Géogrilles :

A déterminer lors de la phase PRO et des études d'exécution des ouvrages.

A noter toutefois qu'une entreprise spécialisée a été consultée afin d'obtenir un ordre de grandeur du prix de fourniture et pose et celle-ci n'a pas émis de réserves quant à la faisabilité des confortements proposés avec les éléments techniques transmis (hauteur, pente, etc.).

Géotextile :

Les géotextiles employés devront permettre de remplacer les couches filtres entre des sols de granulométrie très différente. Ils auront un objectif de séparation des couches et de filtration.

Béton :

Les bétons seront de plusieurs types en fonction des ouvrages à réaliser. Ceci sera défini au stade PRO et dans les clauses contractuelles du futur marché.

Palplanches :

Les palplanches ont été dimensionnées dans la G2 PRO fournie en annexe.

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 :

- Entretien de la végétation par fauchage et neutralisation des espèces ligneuses envahissant les talus et les crêtes d'ouvrages projetés (épaulements et digues en terre en particulier). 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. ETUDE DES RISQUES DE VENUES D'EAU DANS ET EN DEHORS DE LA ZONE PROTEGEE

8.1 Modélisation hydraulique

Les éléments techniques relatifs à la modélisation hydraulique sont détaillés dans la partie 4.3.

Rappel : la description du modèle hydraulique qui a servi à l'étude des venues d'eau est disponible en annexes de cette présente étude.

8.2 Famille de scénarios

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, l'objectif du chapitre 8 d'une étude de dangers est d'estimer et d'évaluer le risque lié à l'inondation.

Pour se faire, quatre scénarios sont définis (paragraphes extraits de l'arrêté du 30 septembre 2019) :

- **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 %.

8.3 Scénarios de défaillance structurelle retenus

L'analyse des modes de défaillances permet d'identifier les scénarios de défaillance structurelle émergents, et retenus pour l'analyse des conséquences (modélisation hydraulique).

Cette analyse fait ressortir 2 accidents potentiels :

- Rupture par surverse pour des crues supérieures au débit de débordement de l'ouvrage.

Cet accident étant lié au phénomène suivant :

- Engrèvement du lit et digues non conçues admettre la surverse.

- Rupture par brèche pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage.

Cet accident étant lié aux phénomènes suivants :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



- Érosion externe ;
- Affouillement ;
- Erosion interne.

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, le scénario de défaillance structurelle devra refléter 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 %.

L'occurrence de la crue modélisée pour le scénario de défaillance structurelle est une Q300. Cette occurrence de crue permet de donner un plan de gestion réaliste et porteur d'enseignement au gestionnaire.

Un scénario de défaillance structurelle est représenté par une ouverture de brèche(s) dans le corps de la digue entre le côté eau et le côté zone protégée.

La modélisation d'une rupture est donc définie par plusieurs paramètres :

- Une probabilité de rupture ;
- Un nombre de brèches ;
- Une largeur de brèches ;
- Un instant de rupture ;
- Une cote finale de la brèche ;
- Une durée de formation de la brèche.

Le nombre de brèches est difficile à estimer. Cependant, les informations sur le contexte physique et l'historique peuvent nous renseigner sur les scénarios raisonnables.

Sur le Borne, un scénario de défaillance structurelle de la digue avec deux brèches nous paraît raisonnable. La carte ci-dessous permet de localiser les 2 sous-scénarios S3 de brèches affectant le système d'endiguement dans son ensemble :

- ✓ S3-1 : brèche au PM 0.95 – 0.85 sur la digue de Toisinges
- ✓ S3-2 : brèche au PM 0.52 – 0.42 sur la digue de la STEP.

La brèche du S3.1 est située, à la transition entre les palplanches et la digue en remblais, en amont du système d'endiguement permettant de « maximiser » l'enveloppe inondation dans la zone protégée. La brèche S3.2 permet de compléter l'analyse hydraulique sur la digue de la STEP.

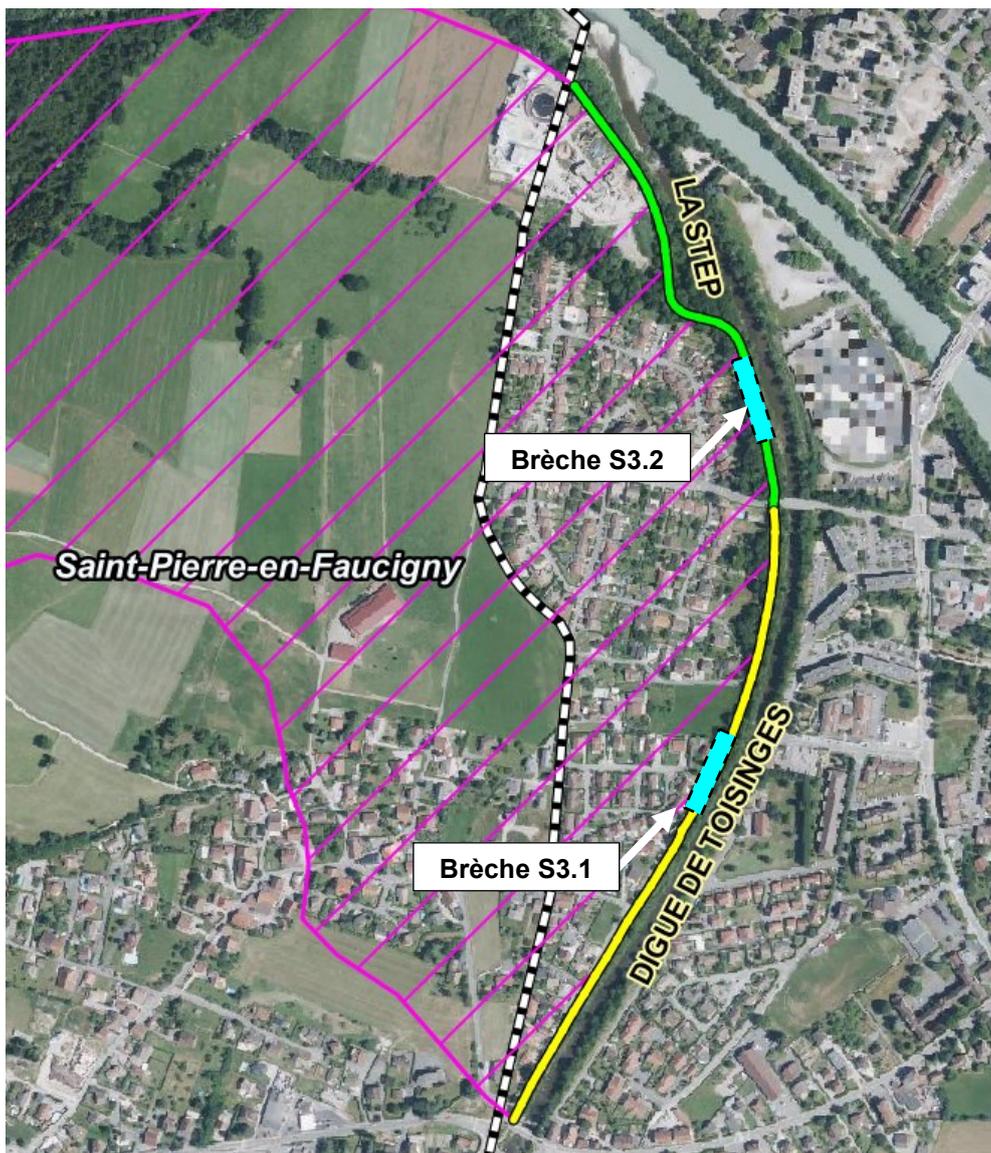


Figure 162 : Localisation des brèches modélisées pour le scénario de défaillance structurale (en situation projet)

Les phénomènes de rupture des endiguements sont différents suivant qu'il s'agit d'une érosion interne ou externe, d'un glissement ou d'une surverse. Par mesure d'homogénéité, la modélisation des brèches étudiée dans le retour d'expérience sera reprise (cf. Rubrique 6). La modélisation est basée sur les hypothèses suivantes :

- Amorçage de la brèche :
 - lorsque le débit de pointe atteint le point considéré pour les ruptures par brèches,
 - lorsque le début de la submersion apparaît pour les ruptures par surverse ;
- Abaissement de la crête jusqu'à l'atteinte du terrain naturel aval ;
- Largeur de la brèche : de 100 m ;
- Temps d'effacement complet : 1h. Ces hypothèses rentrent dans l'ordre de grandeur des brèches communément modélisées pour d'autres EDD, à savoir entre 100 et 200 mm/min.

Ces hypothèses permettent de représenter une certaine dynamique de rupture, sachant que d'autres dynamiques de ruptures peuvent être susceptibles de se produire.

La localisation des brèches répond à l'objectif de maximiser les conséquences en jouant sur les deux critères suivants :

- Hauteur maximale de la digue au-dessus du terrain naturel (TN). Cette configuration est susceptible de maximiser le débit déversé ;
- Zone habitée en aval.

8.4 Choix des scénarios à modéliser et cartographie

8.4.1 Scénarios étudiés et retenus

Les scénarios étudiés dans le cadre de cette étude de dangers sont les suivants :

➤ **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). On admet que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus.

➤ **Scénario 2 : défaillance fonctionnelle**

Le scénario 2 prévu dans l'arrêté du 30 septembre 2019 correspond à une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement quand le niveau des écoulements correspond au niveau de protection. Cette défaillance fonctionnelle est liée à une défaillance d'un dispositif de régulation des écoulements hydrauliques, sans être accompagné par une défaillance structurelle des ouvrages. Dans le cas du système d'endiguement Arve-RG-STPIE-24.17, aucun dispositif de régulation des écoulements hydrauliques n'étant présent (ni de réseau traversant les ouvrages de protection), ce scénario n'a pas lieu d'être. Il n'est par conséquent pas modélisé de scénario 2 dans cette étude.

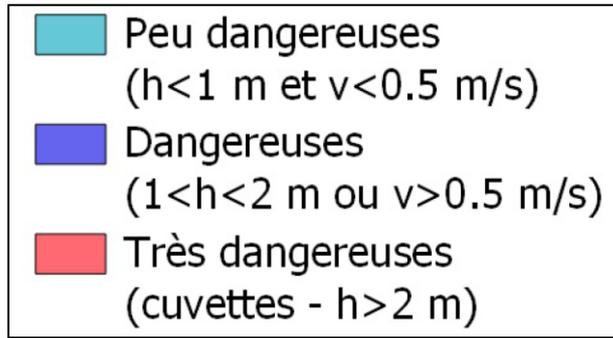
➤ **Scénario 3 : défaillance structurelle**

Ce scénario correspond à une défaillance structurelle du système d'endiguement. Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019, le niveau de l'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture supérieure à 50 %. Dans notre cas, la défaillance structurelle est représentée par l'ouverture de deux brèches dans le corps des digues du système, sur une occurrence de crue tricentenaire (Q300). Comme susmentionné, ce scénario est décomposé en deux sous-scénarios : S3.1 et S3.2.

8.4.2 Cartographie

Une cartographie des zones mises en eau a été réalisée pour les deux scénarios modélisés et listés ci-dessus. 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 :

- Les zones de venues d'eau non dangereuses ou peu dangereuses : pour lesquelles $V < 0.5$ m/s et $H < 1$ m
- Les zones de venues d'eau dangereuses : $V \geq 0.5$ m/s ou $H \geq 1$ m
- Les zones de venues d'eau très dangereuses, correspondant à des points bas (effet cuvette $H > 2$ m) ou des zones de dissipation d'énergie importante sont également répertoriées.



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).

8.5 Scénario 1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'étude de dangers, le scénario 1 représente le fonctionnement nominal du système d'endiguement dans le cas du passage d'une crue correspondant au niveau de protection du système (Q100). On admettra que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus.

Sur la carte des venues d'eau ci-dessous, on constate que la crue centennale ne déborde pas dans la zone protégée par le système d'endiguement en situation de travaux achevés. Les digues de Toisinges et de la STEP assurent une protection centennale de la zone protégée.

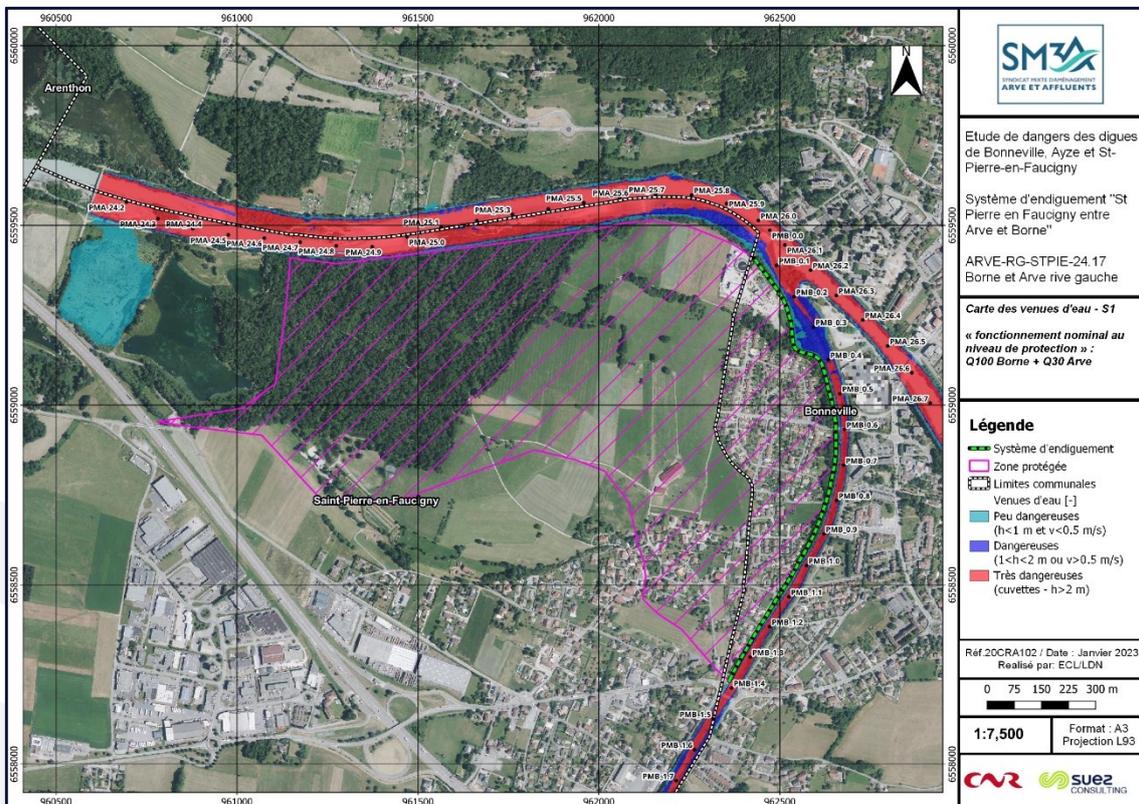


Figure 163 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

8.6 Scénario 3 : Défaillance structurelle du système d'endiguement

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'étude de dangers, 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 de l'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture supérieur à 50 %.

Dans le cas du système d'endiguement de Saint-Pierre en Faucigny entre Arve et Borne, la défaillance structurelle est représentée par l'ouverture de deux brèches dans le corps de la digue, sur une occurrence de crue tricentenaire (Q300).

Deux sous-scénarios sont modélisés (S3.1 et S3.2). Les caractéristiques des brèches sont données dans le chapitre 8.

Sur les deux sous-scénarios, les cartographies des venues d'eau montrent qu'une partie de la zone protégée est inondée.

A la suite des cartographies (valeurs maximales des inondations), la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps est donnée sous forme de figures successives des animations de la modélisation (à partir du moment du début de l'ouverture des brèches).

8.6.1 Scénario 3.1 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne

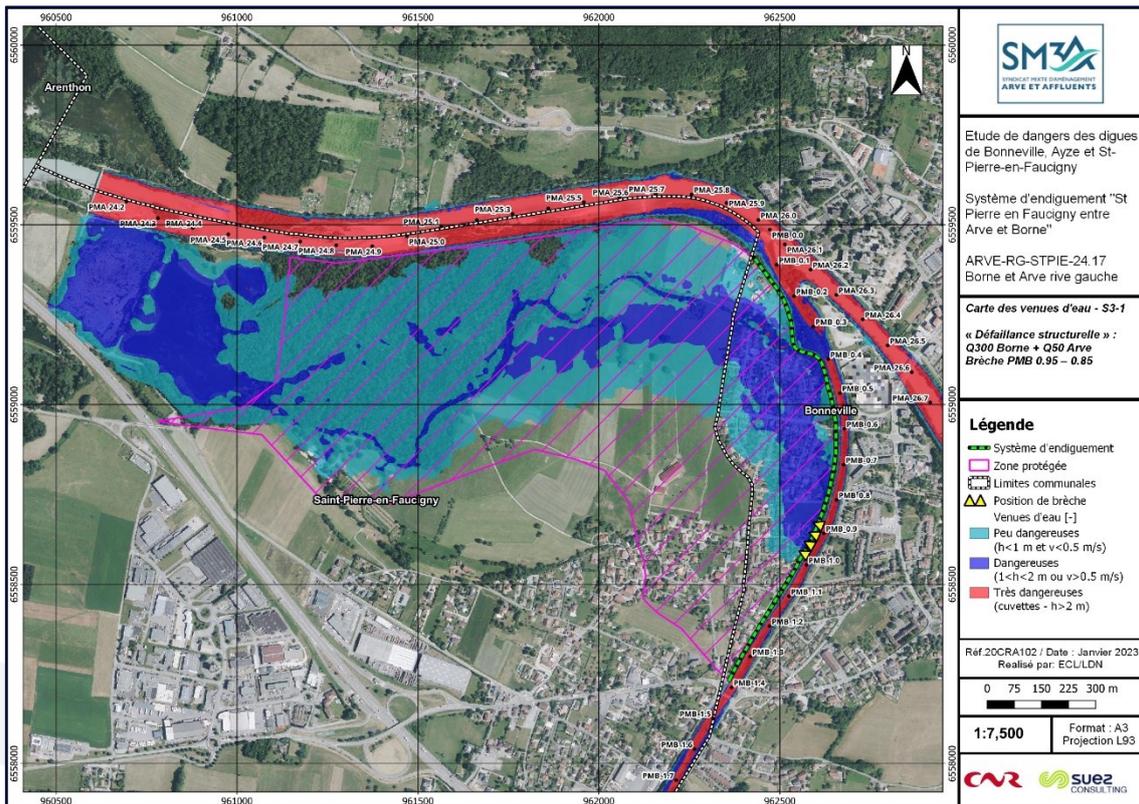


Figure 164 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

Ci-dessous une description et une série de cartographies de la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps (l'onde de submersion est représentée sous forme de hauteurs d'eau) :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



- ✓ Environ 1 heures après l'ouverture de la brèche dans la digue de Toisinges, la quasi-totalité du quartier de Tucinge, située en aval de la brèche, est inondée. La moitié de la STEP de Bonneville est inondée.
- ✓ Environ 2 heures après l'ouverture, l'inondation se propage en aval et inonde la forêt communale de Bonneville. Les étangs situés en amont de la passerelle du SM3A sont également submergés. A noter que ces derniers secteurs ne présentent pas d'enjeux particuliers. Enfin, le site du SM3A est inondé.
- ✓ Environ 3 heures après l'ouverture de la brèche, l'enveloppe inondée est sensiblement la même que à deux heures de l'ouverture. Néanmoins, les hauteurs d'eau augmentent au niveau des étangs.

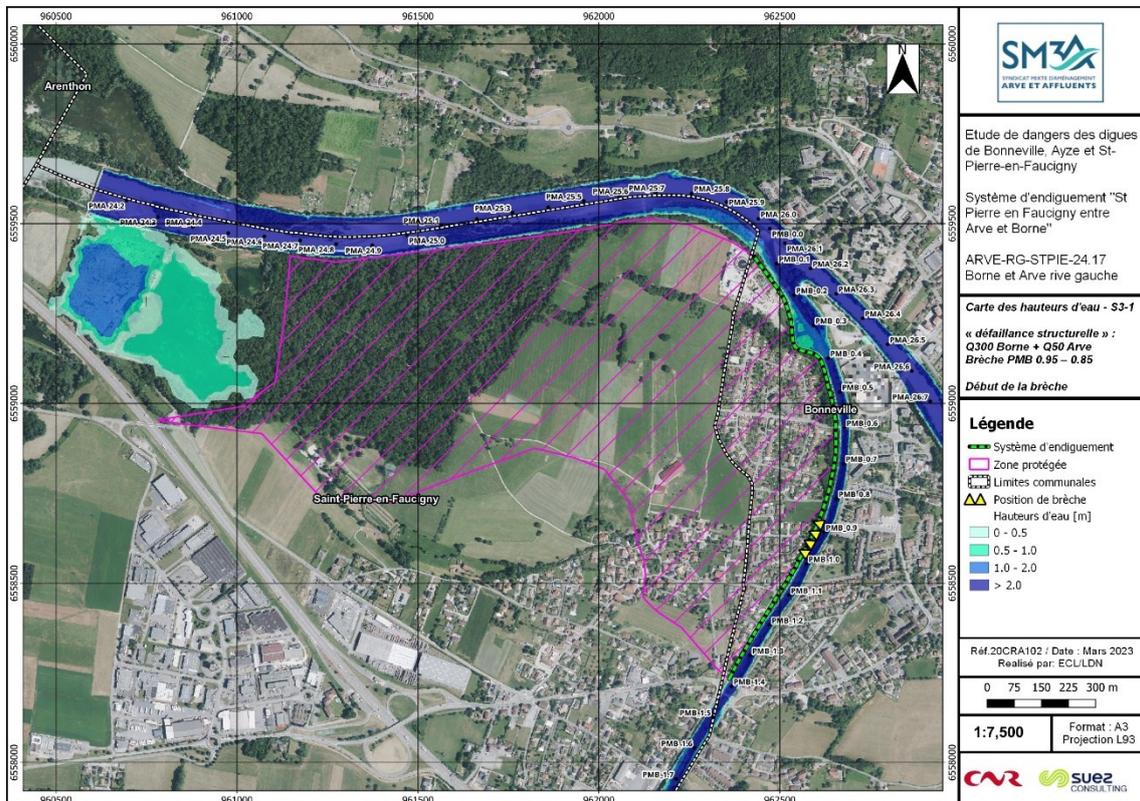


Figure 165 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

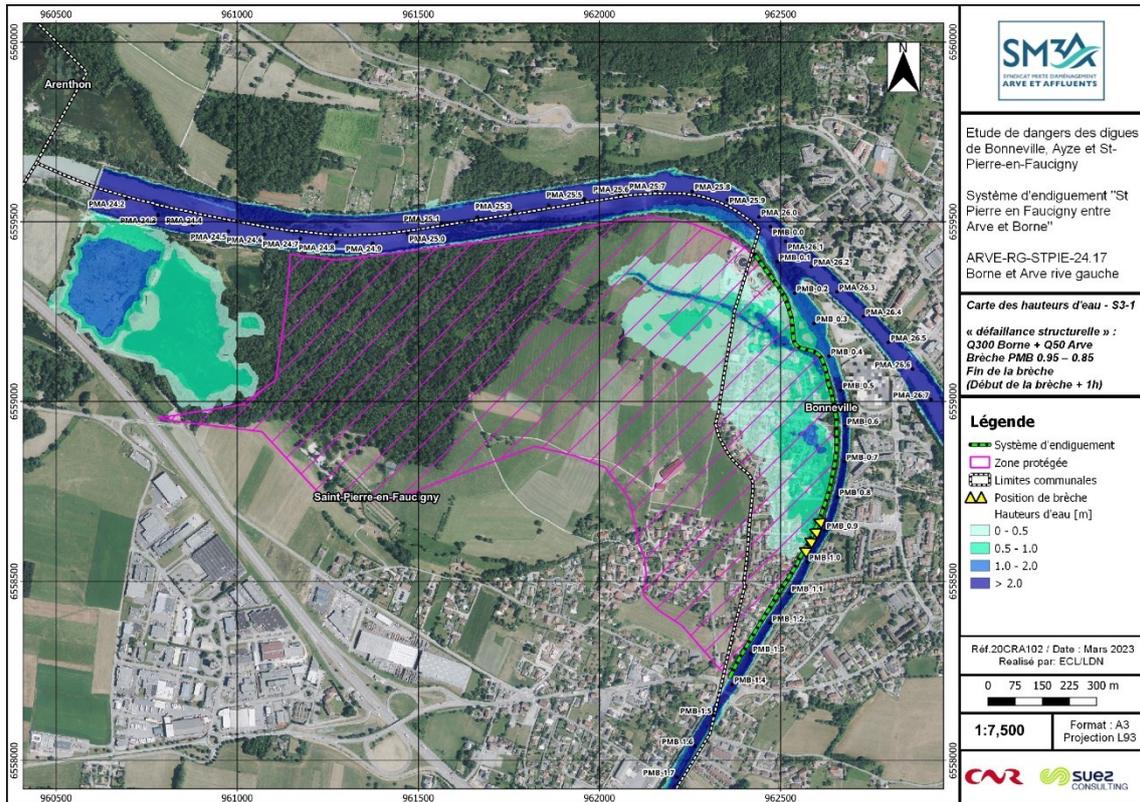


Figure 166 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 1h00

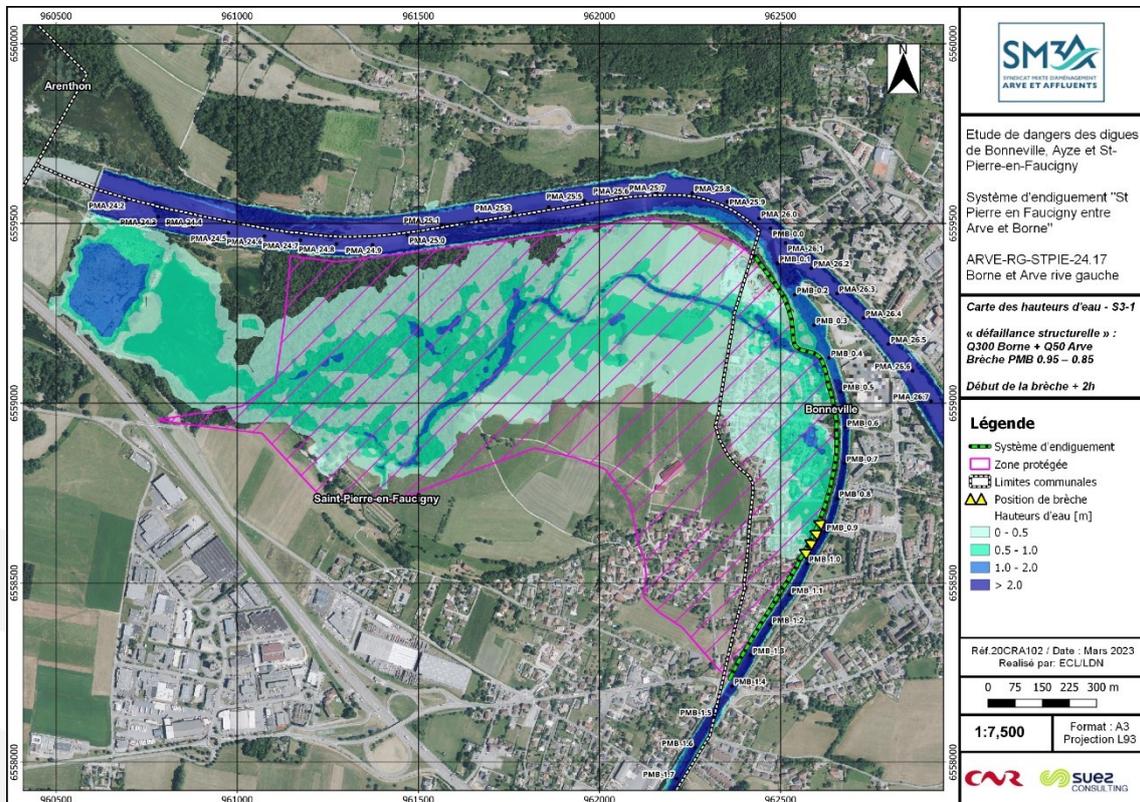


Figure 167 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 2h00

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

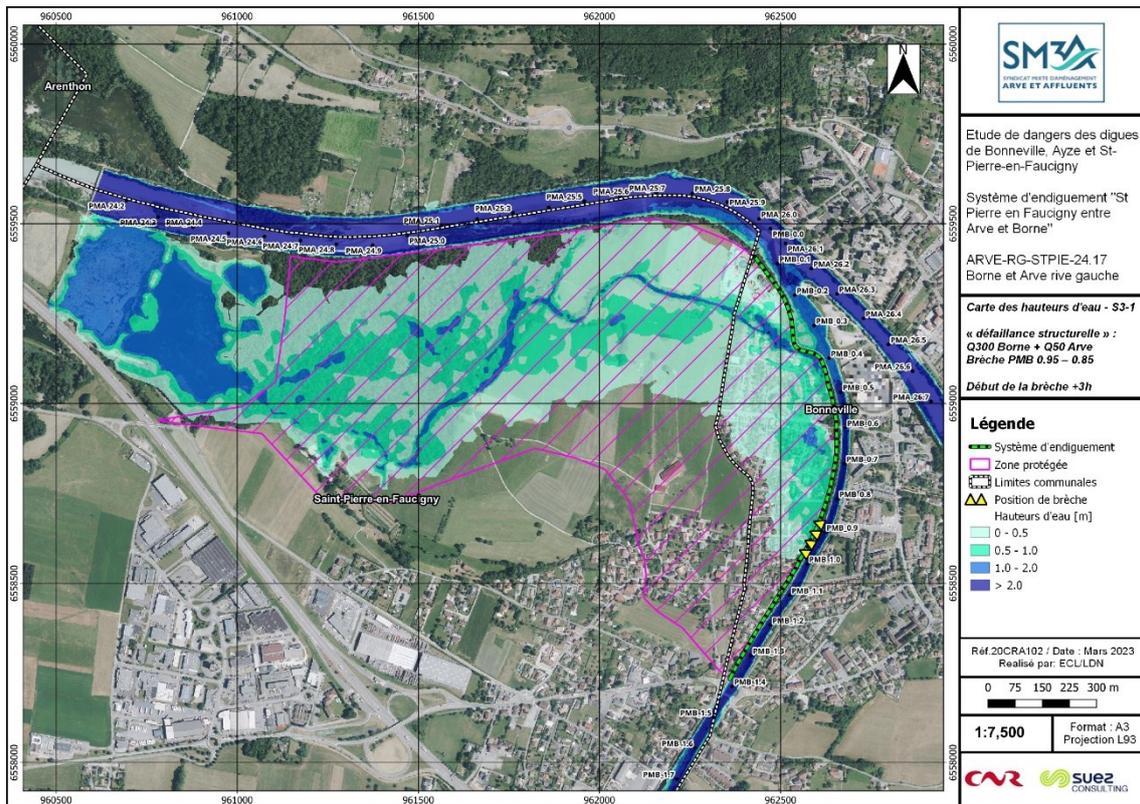


Figure 168 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 3h00

8.6.2 Scénario 3.2 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne

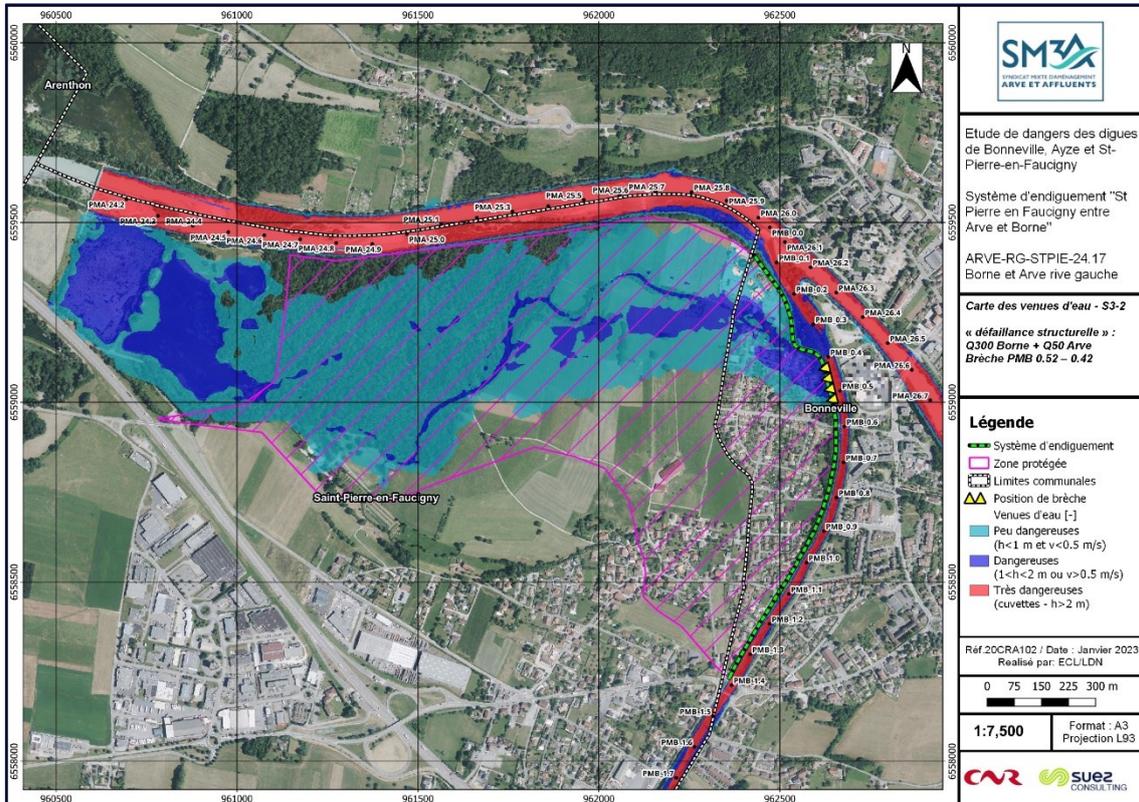


Figure 169 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

Ci-dessous une description et une série de cartographies de la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps (l'onde de submersion est représentée sous forme de hauteurs d'eau) :

- ✓ Environ 1 heures après l'ouverture de la brèche dans la digue de la STEP, une partie du quartier de Tucinge, située en aval du pont de Toisinges, est inondée. La moitié de la STEP de Bonneville est inondée.
- ✓ Environ 2 heures après l'ouverture de la brèche, l'inondation se propage en aval et inonde la forêt communale de Bonneville. Les étangs situés en amont de la passerelle du SM3A sont également submergés. A noter que ces derniers secteurs ne présentent pas d'enjeux particuliers. Enfin, le site du SM3A est inondé.
- ✓ Environ 3 heures après l'ouverture de la brèche, l'enveloppe inondée est sensiblement la même que à deux heures de l'ouverture. Néanmoins, les hauteurs d'eau augmentent au niveau des étangs.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

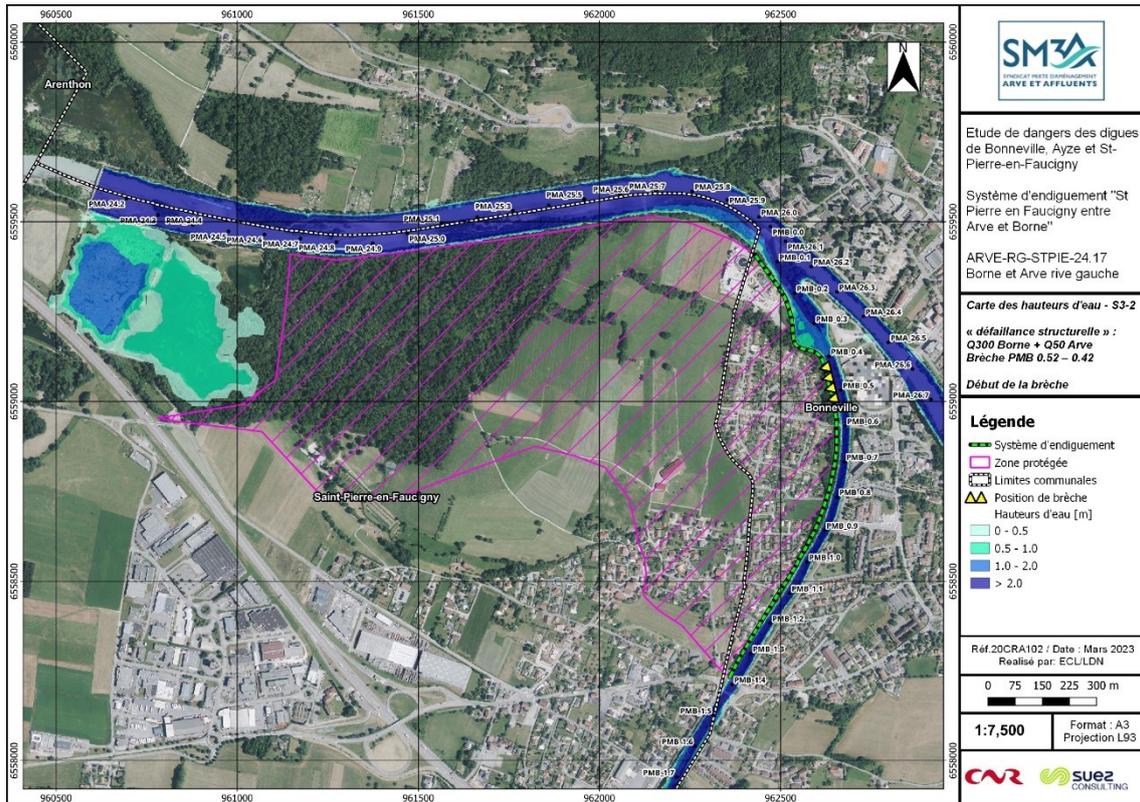


Figure 170 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche

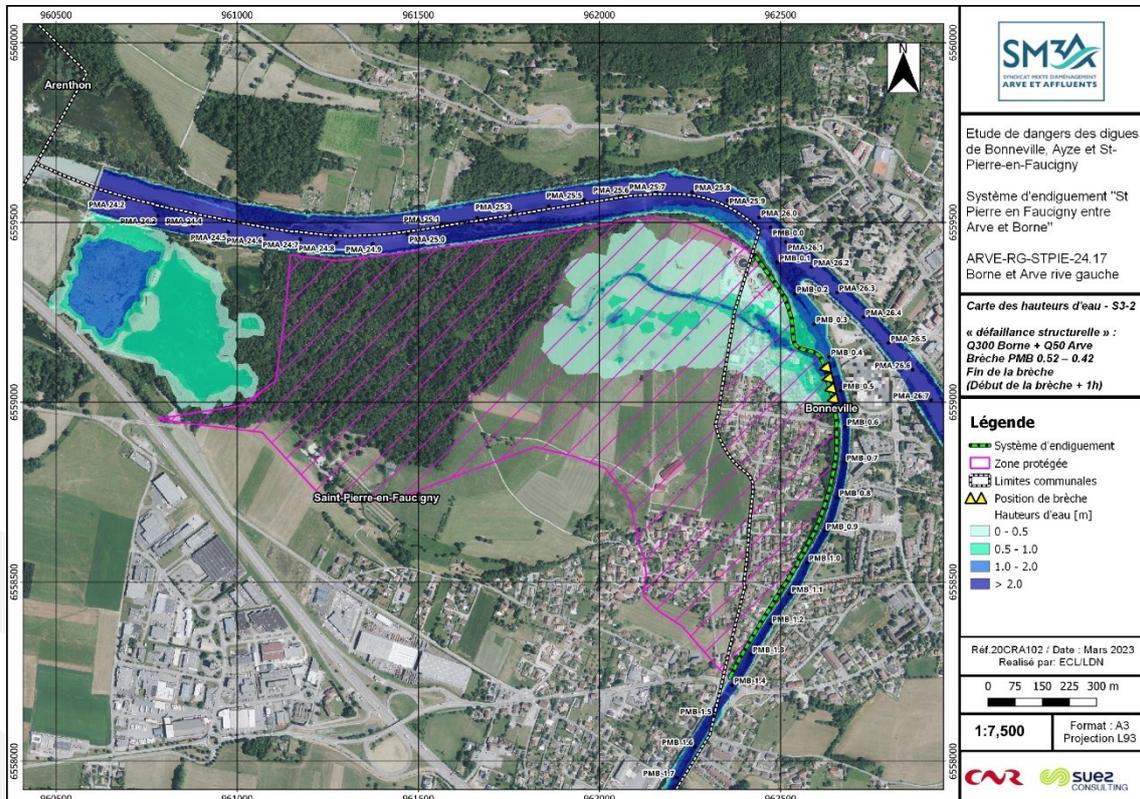
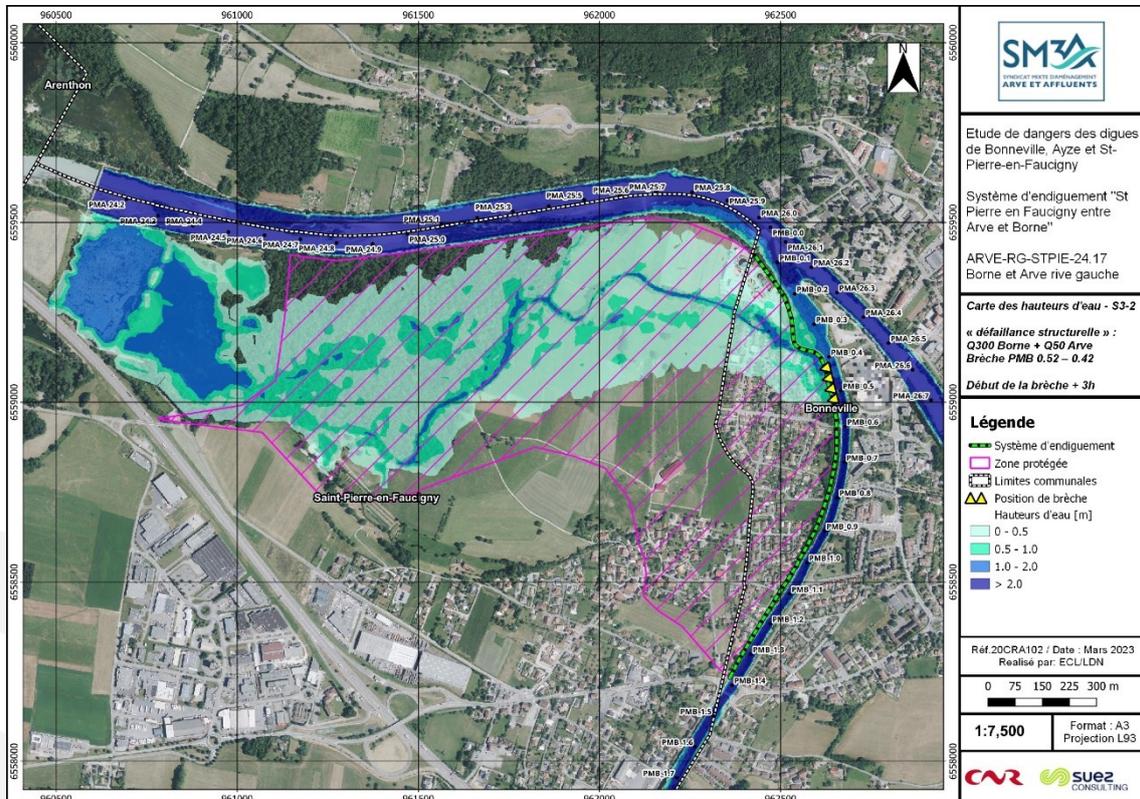
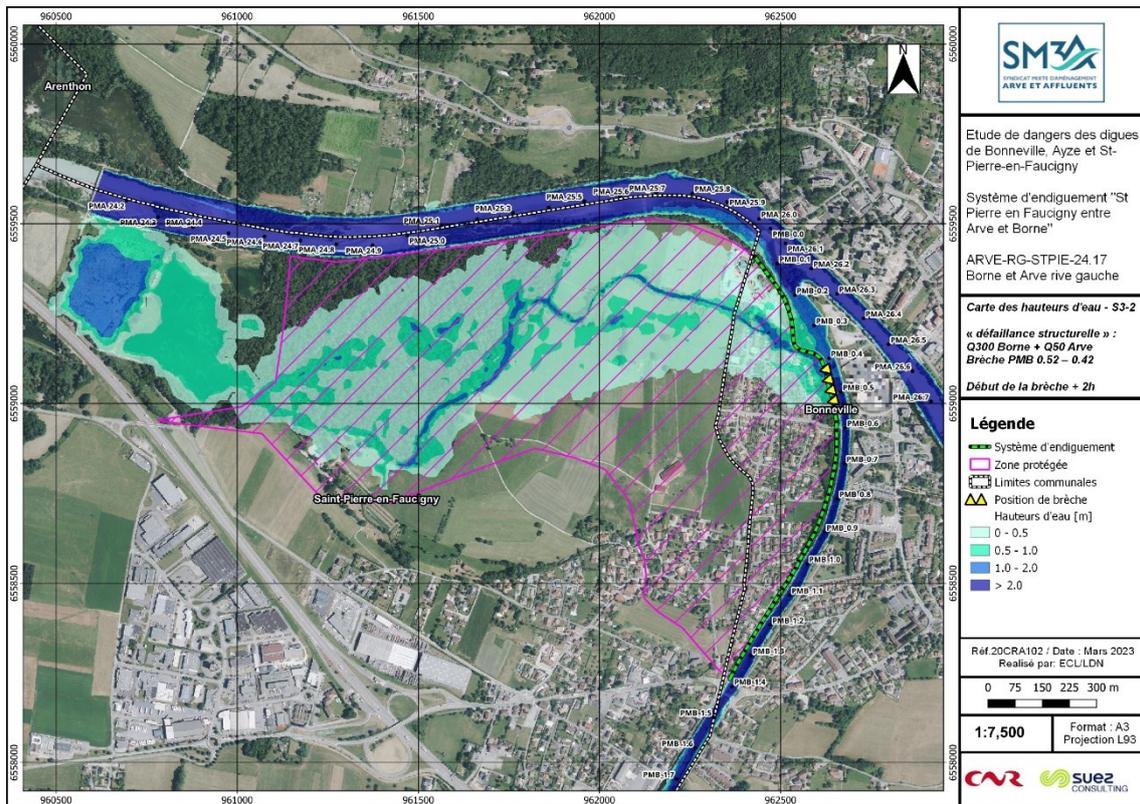


Figure 171 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 1h00

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



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 seront mises en place en phase projet (à noter qu'une des deux échelles est déjà présente au niveau du pont Royal).

Le SM3A, gestionnaire du système d'endiguement, a édité à l'échelle du bassin versant de l'Arve un document intitulé : « Consignes générales de surveillance et d'exploitation - Ouvrages classés ou à classer constitutifs de systèmes d'endiguement », novembre 2017.

Ce document, qui a été transmis au Préfet, précise l'organisation du gestionnaire pour assurer l'exploitation, l'entretien et la surveillance des ouvrages, conformément à l'Article R.214.122 I-2 du Code de l'Environnement. Cette organisation est définie à l'échelle du bassin versant de l'Arve, de façon globale, et non individuelle à l'échelle d'un ouvrage ou d'un système d'endiguement.

Des consignes spécifiques au Système d'Endiguement de la présente étude 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 du Borne rive gauche.

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 », est en 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

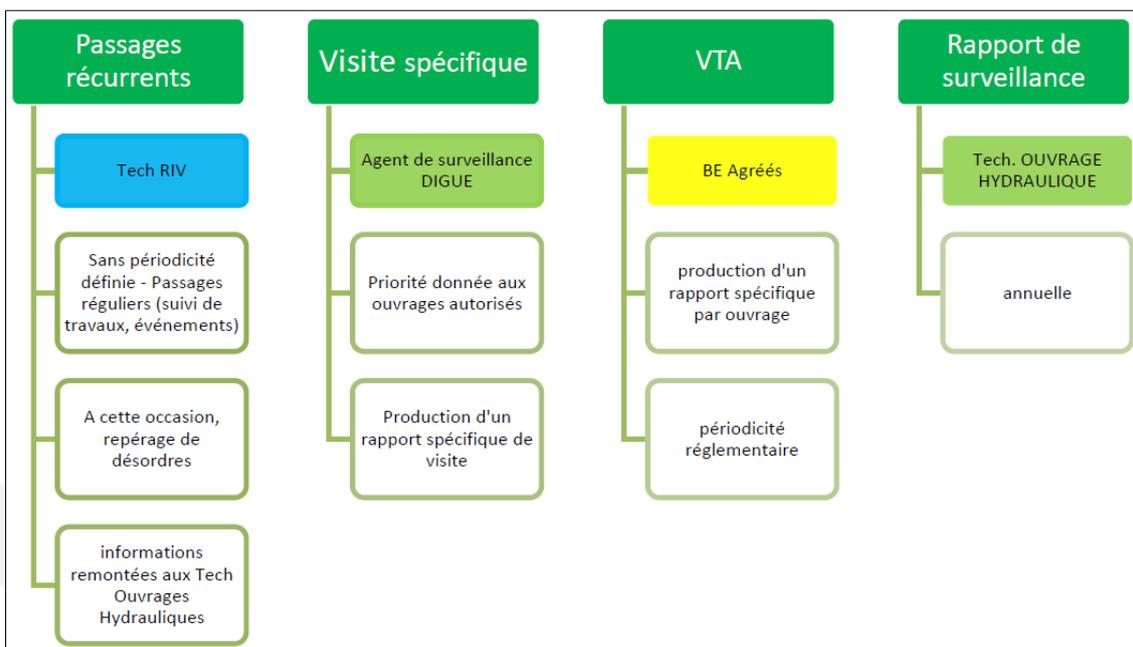
Un certain nombre de véhicules sont disponibles pour réaliser les visites et autres interventions sur le terrain. Le détail de ces véhicules et du matériel nécessaire pour le suivi sur le terrain sont précisés dans la consigne générale de surveillance (réf. [DA12]).

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 :



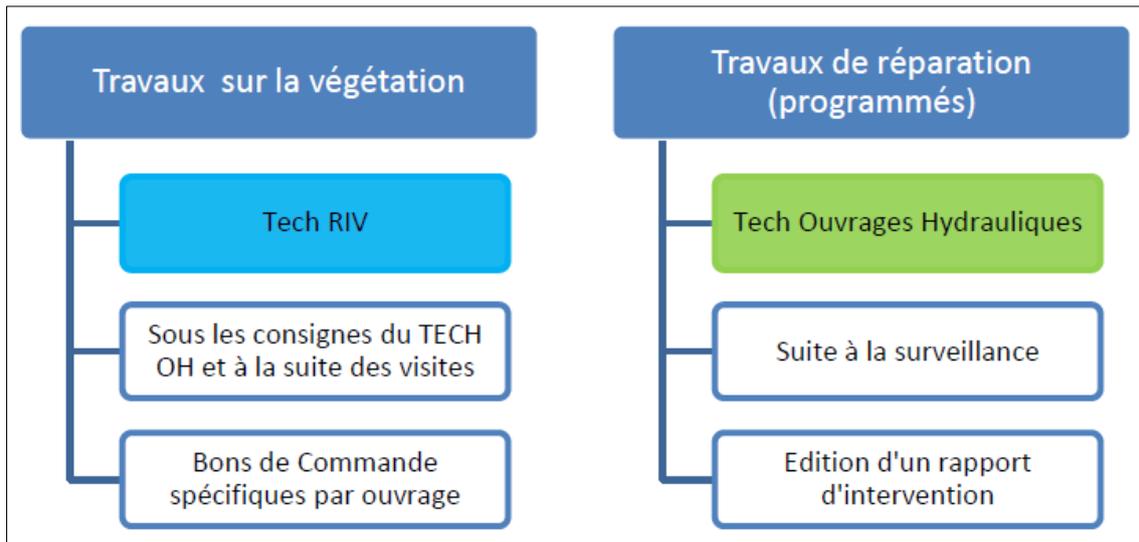
Pour faciliter les échanges entre Pôle « prévention des inondations » et « entretien et surveillance des cours d'eau », une réunion annuelle est organisée en février ou mars. A cette occasion, sont données les consignes d'entretien de la végétation sur les ouvrages classés. De même, des réunions bimensuelles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

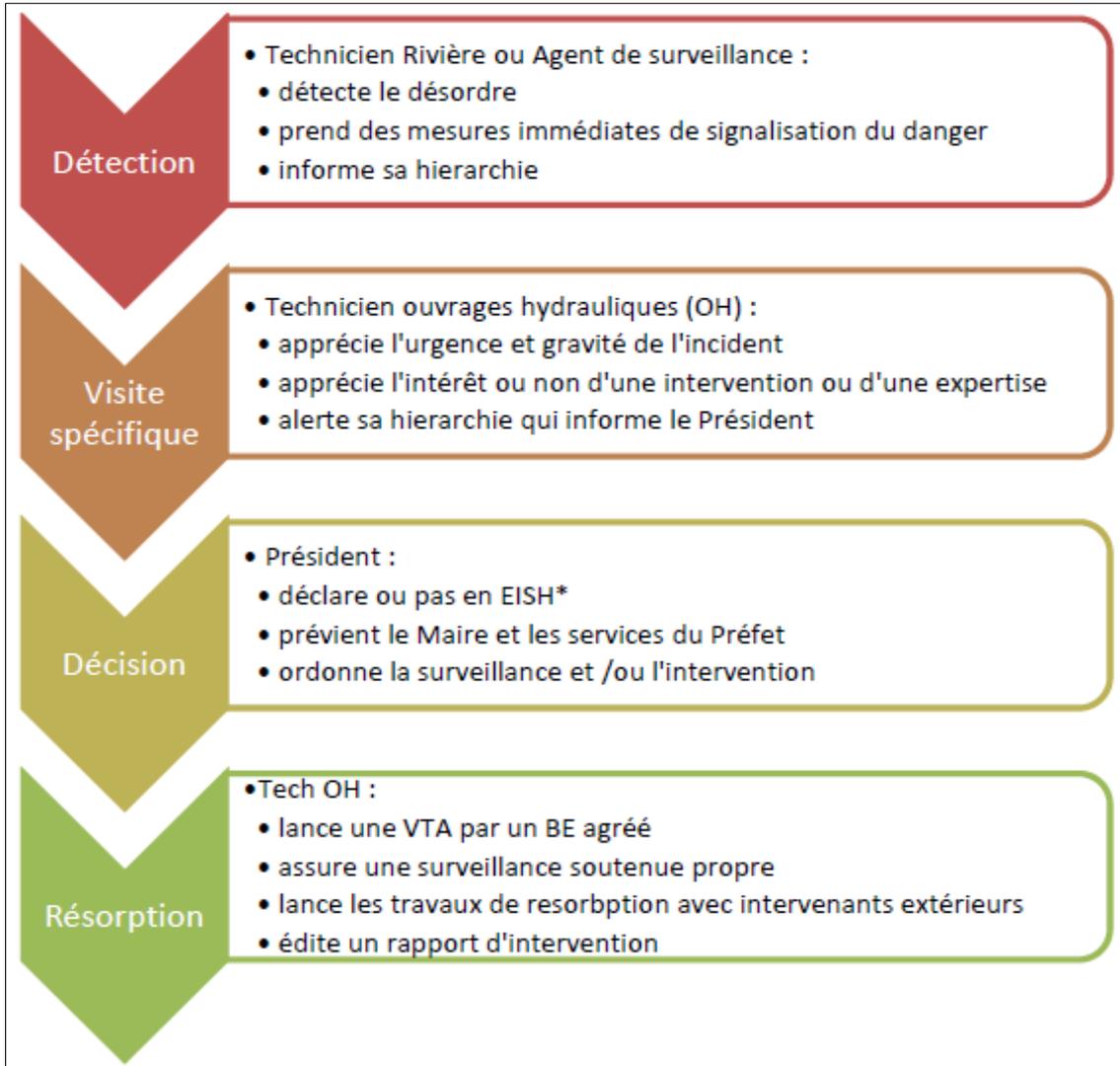
9.1.3 Organisation des interventions programmées

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, bathymétrie, 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 « Digues et petits barrages ». Ces prestataires sont également mandatés lors d'expertise exceptionnelle sur des incidents pouvant compromettre la sécurité d'un ouvrage ;
- Pose et fourniture d'échelles limnigraphiques et bornes de repérage spécifiques aux ouvrages classés ;
- Travaux d'entretien des boisements en bord de cours d'eau ou sur les ouvrages ;

- Travaux de curage des cours d'eau. Marché alloti géographiquement et confié à plusieurs entreprises de travaux publics. Ce marché est utilisable pour des interventions d'urgence ;

Les moyens humains et matériels et l'organisation générale du SM3A est en adéquation avec l'objectif de protection.

9.2 Consignes de surveillance et d'exploitation des ouvrages hors période de crise

9.2.1 Consignes générales de surveillance

Le SM3A a mis en place une organisation générale de surveillance qui permet une inspection régulière des ouvrages de protection hydrauliques avec une intensité de visite différenciée en fonction du classement des systèmes d'endiguements.

Le tableau ci-dessous décrit les différentes visites sur les digues en fonction du classement des systèmes d'endiguement. Il est à noter que la fréquence des visites peut également être adaptée en fonction de l'état des ouvrages ou tout autre phénomène appelant une surveillance renforcée de l'ouvrage.

	Type	Digue de classe A	Digue de classe B	Digue de classe C
Visites de surveillance de l'état des ouvrages	Passages récurrents	En fonction des passages de surveillance générale assurés par les techniciens RIVIERE sur les cours d'eau		
	Visite spécifique	Au moins 1 fois par an par l'agent de surveillance DIGUE avec production d'un PV		
	Visites Techniques Approfondies (VTA)	Visite réalisée par un prestataire extérieur avec production d'un rapport tous les 3 ans	Visite réalisée par un prestataire extérieur avec production d'un rapport tous les 5 ans	Visite réalisée par un prestataire extérieur avec production d'un rapport tous les 6 ans

9.2.1.1 Passages récurrents

Il s'agit de passages réguliers réalisés par les techniciens à l'occasion de leurs différentes tournées sur le terrain. Le technicien s'assure de l'absence de désordre majeur sur les ouvrages (vue macroscopique) mais également apprécie l'environnement de l'ouvrage (évolution morphologique du lit : déplacement des bancs, 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 limnimétriques permettront de suivre les niveaux du fond de lit lors des reconnaissances terrain par les techniciens.

Il est important de coupler le plan de gestion des matériaux solides au plan de gestion de la végétation (voir ci-dessous). Cela concerne par exemple les bancs alluviaux qu'il faut maintenir en situation mobile (limiter la végétation, scarifier...).

9.2.2.2 Plans de gestion des boisements de berge

Le plan de gestion des boisements de berge et du bois mort concourt à restaurer le bon état des berges par des travaux simples sur les boisements, afin de réguler les risques hydrauliques (inondations, érosions) tout en améliorant les fonctions paysagères et écologiques du milieu.

Plusieurs types d'intervention sont possibles selon les situations : abattage d'arbres instables, élagage des branches gênantes, débroussaillage, dégagement d'embâcles dangereux, recépage, bouturage, etc.

La méthode utilisée pour définir les plans de gestion des boisements de berge et du bois mort s'appuie sur les principes suivants :

- Adapter le niveau d'entretien aux enjeux concernés, que ces derniers soient situés sur le tronçon lui-même (ex : fonctionnement hydro morphologique, incisions) sur un secteur situé en aval (ex : risque d'obstruction d'un ouvrage par des corps flottants) ou plus globalement (amélioration du fonctionnement biologique par une gestion de boisement adaptée, préservation de milieux remarquables) ;
- Prendre en compte de manière équilibrée tous les éléments qui concourent à l'élaboration d'un plan de gestion à l'échelle de la rivière :
 - Risque hydraulique lié à l'état de la végétation et à l'encombrement du lit ou des ponts par du bois mort ;
 - Impact des incisions sur les infrastructures et habitations proches ;
 - Prise en compte du patrimoine faunistique et floristique par la préservation ou la mise en valeur du milieu naturel et des sites remarquables.

9.2.2.3 Travaux de gestion de la végétation sur le système d'endiguement

La gestion de végétation se fait par travaux d'entretien, mécaniques ou manuels, et par abattage d'arbres.

En présence de végétation boisée à différents stades de développement, une gestion planifiée peut être envisagée. En effet, une gestion au coup « par coup » peut s'avérer couteuse et peu efficace. Un plan de gestion de la végétation sera mis en place. Il permettra une gestion raisonnée et simplifiée en termes de temps, d'objectifs et de dépenses. Cet outil est appuyé sur des prescriptions sylvicoles en adéquation avec la sécurisation des digues.

Le plan de gestion de la végétation définit les objectifs et le programme de travaux pour une durée de 10 à 15 ans. Il assure des fonctions de communication, de négociation, un appui

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



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 54 : 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 § 9.5.2.3.

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 :

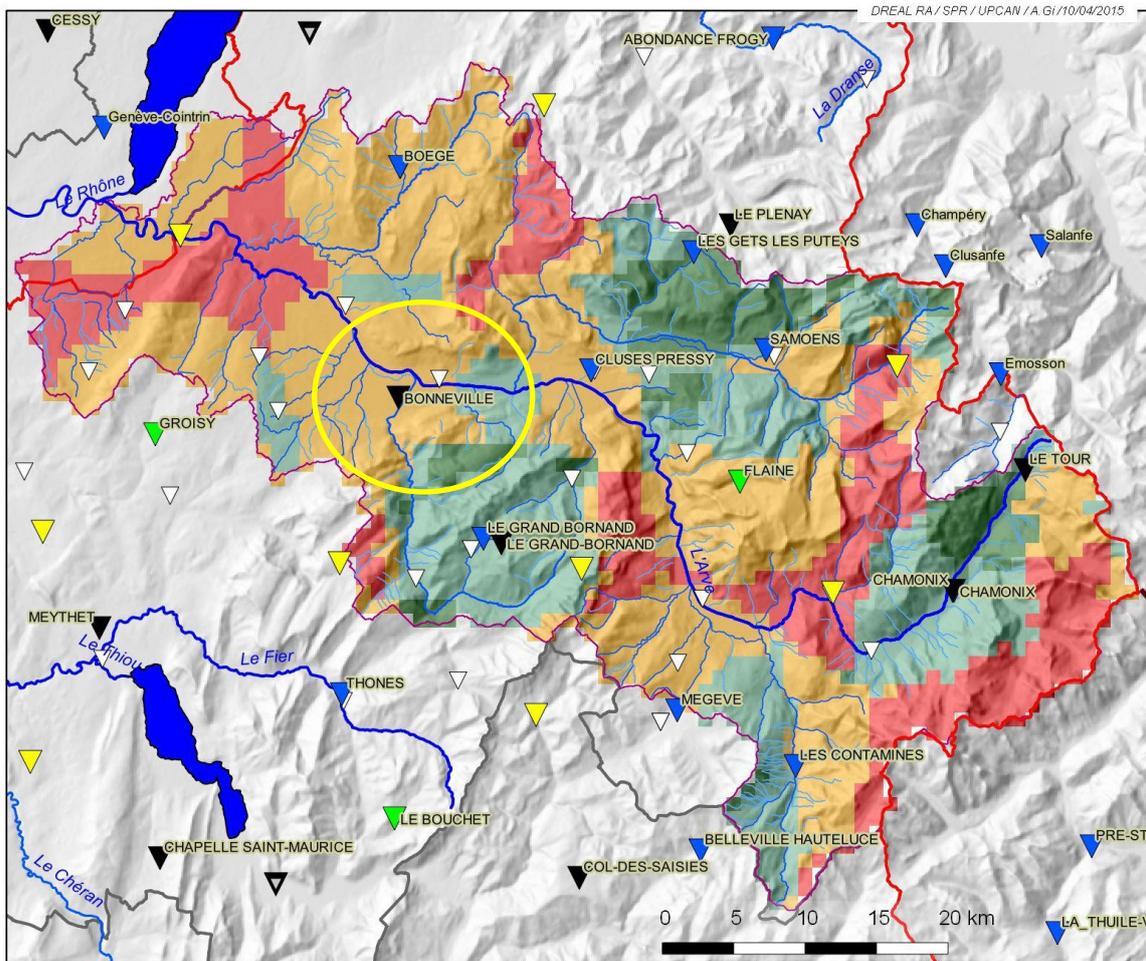
- Un régime d'écoulement des cours d'eau fortement influencé par l'accumulation des précipitations sous forme de neige durant l'hiver, période de basses eaux, et par la fonte de cette neige au printemps, voire même de la glace en été, période de hautes eaux.
- Une possibilité de fortes précipitations 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.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



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

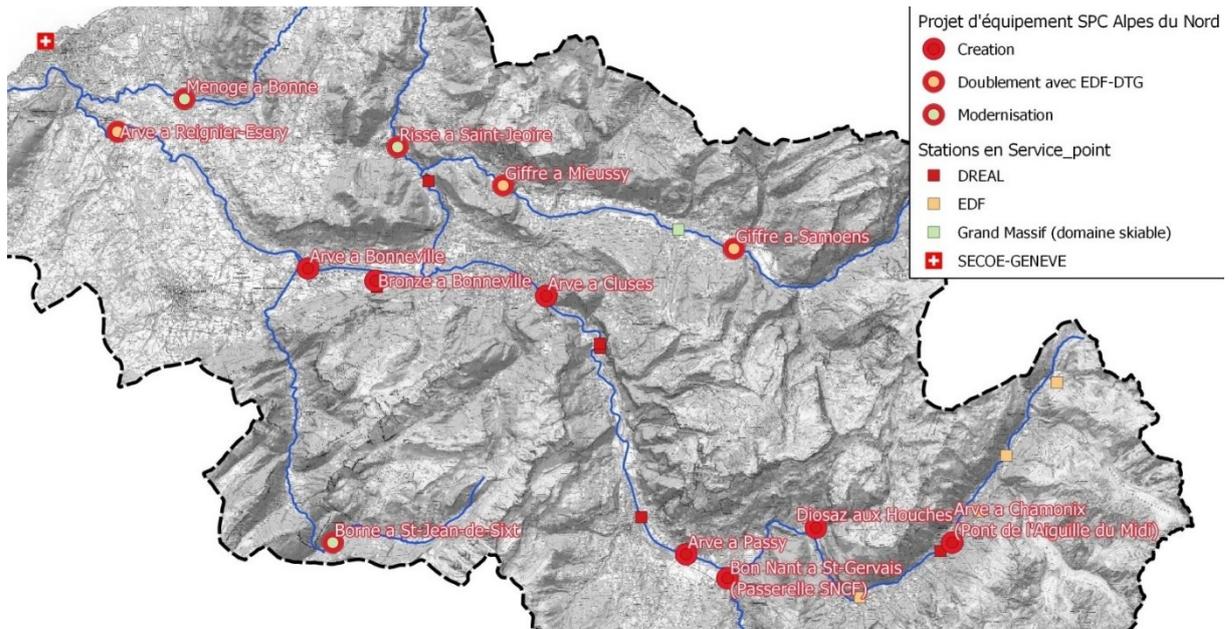
Carte extraite du rapport du Service de prévention des crues (SPC) Alpes du Nord

Le réseau de stations hydrométriques sur le bassin de l'Arve s'est étoffé au cours des dernières années, et compte actuellement 30 stations :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

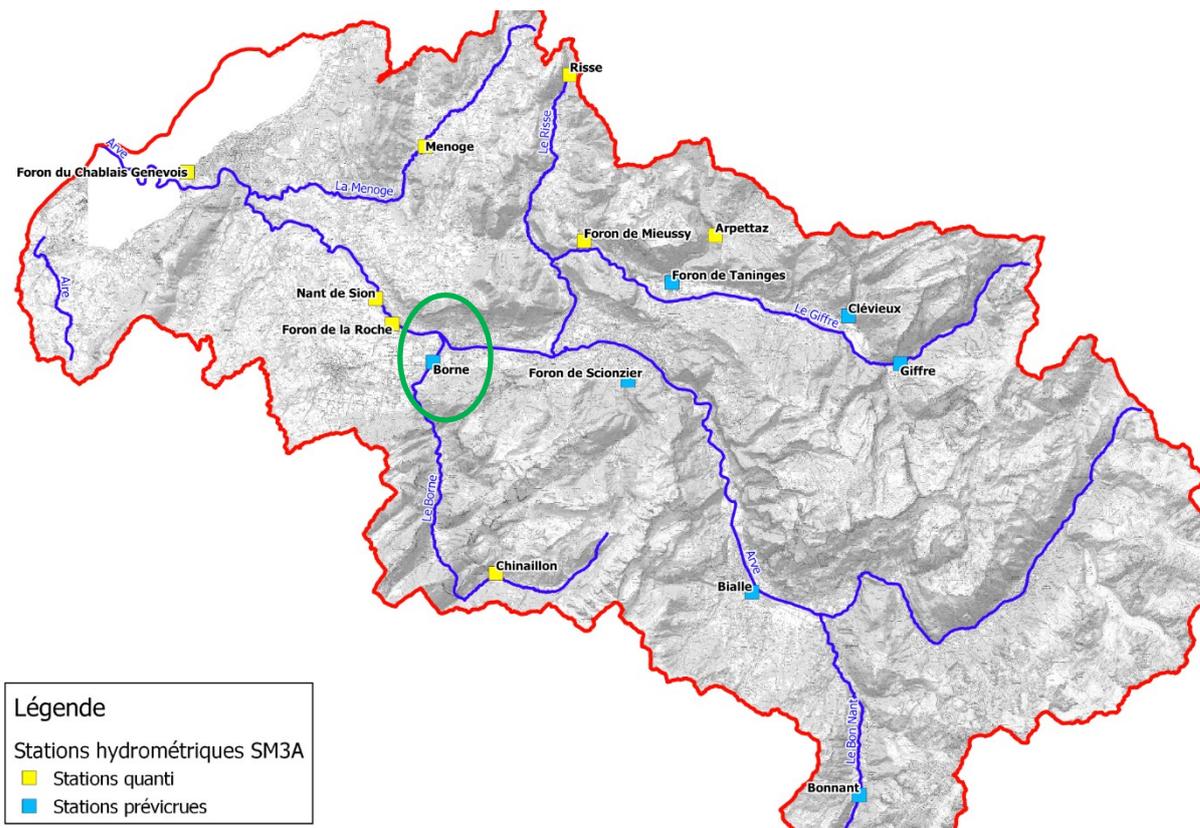
- 11 stations DREAL (pas de temps de 10-12 min)
- 2 stations EDF (pas de temps de 1 heure)
- 2 stations Canton de Genève (pas de temps de 25 min)
- 15 stations SM3A, dont 7 à vocation d'alerte en crue et 8 pour la quantification de la ressource en eau (mesure de hauteur avec courbes de tarages provisoires, pas de temps de 5 min en crue)

Le programme de renforcement du réseau DREAL-SPC depuis 2018 est encore en cours, avec notamment la station de Cluses en projet.



Renforcement du réseau hydrométrique par le Service de prévention des crues (SPC) Alpes du Nord

De manière à compléter le réseau existant ou en cours de renforcement par la DREAL sur les affluents et les têtes de bassin versant non couvertes, le SM3A a installé 15 stations entre 2018 et 2021 dont 7 stations ont un objectif de prévision des crues et d'alerte.



Réseau de stations limnimétriques installées par le SM3A entre 2018 et 2021 avec pour objectif l'alerte en crue (stations « 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 :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

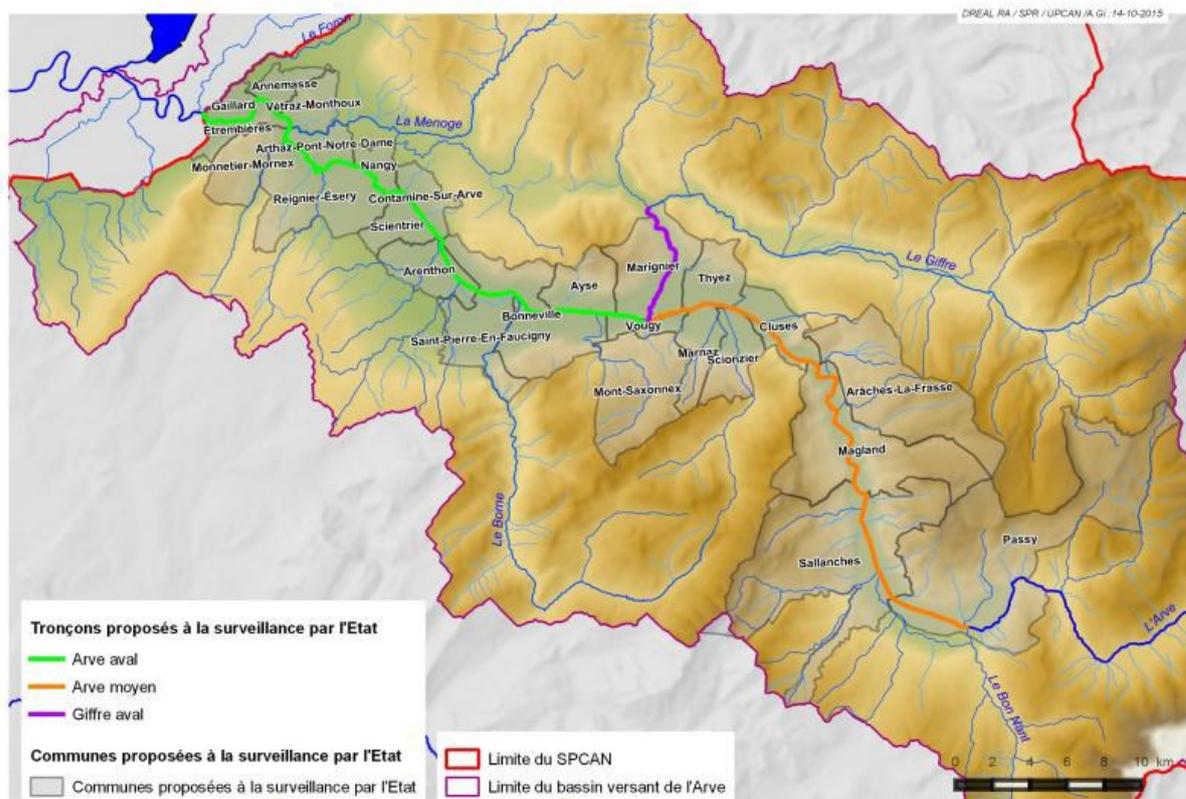
- l'envoi d'un SMS : 1 série de 4 numéros de téléphone. Appel en cascade : le premier ne validant pas la réception du SMS, le second numéro est contacté jusqu'à l'obtention d'une réponse par retour de code.
- l'envoi de Mails sur plusieurs adresses (3 adresses spécifiques + mail général SM3A)

9.4.2.2 Vigicrues

Le dispositif Vigicrues porté par le SPC Alpes du Nord est opérationnel sur l'Arve en aval de Passy (Arve médian et Arve aval) et sur le Giffre en aval de sa confluence avec le Risse (Giffre aval) depuis mars 2020.

Il est complété par un renforcement des suivis météorologique (rénovation et implantation de nouveaux radars et pluviomètres en Suisse et en France, action inscrite au contrat de Plan Etat-Région 2015-2020), et hydrométrique (création et modernisations de stations de mesure,) et d'une modélisation intégrant la partie glaciaire du bassin versant de l'Arve.

Le réseau de stations hydrométriques DREAL-SPC sur le bassin versant de l'Arve s'est étoffé au cours des dernières années. En effet, il compte aujourd'hui 12 stations dont 7 installées avant 2018 (Arve à Chamonix et Sallanches, Giffre à Marignier, Risse à St Jeoire, Bronze à Bonneville, Menoge à Bonne, Borne à St Jean de Sixt) et 5 installées depuis 2018 dans le cadre du renforcement du réseau (Arve à Passy, Bonneville et Reignier, Diosaz à Servoz, Giffre à Samoëns).



Tronçons intégrés au dispositif Vigicrue depuis 2020

Les tronçons Vigicrue actuellement opérationnels sont : Arve aval, Arve médian et Giffre aval. Les sous-bassins versant situés en amont de ces tronçons Vigicrue ne sont pas intégrés au dispositif du fait de leur temps de réponse trop faible (inférieur pour le cas de l'Arve à 6 heures). Sur ces tronçons, d'autres dispositifs portés par le SM3A prennent le relais.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



📧
 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.

Carte statique
Carte dynamique

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	📡

Interface cartographique disponible sur le site de Vigicrue avec les tronçons disponibles sur le bassin de l'Arve (<https://www.vigicrues.gouv.fr>)

Pour chaque tronçon, des seuils de débits ont été définis au droit de stations de référence, déclenchant le passage au niveau de vigilance supérieur.

rivière	ARVE MÉDIAN				
ARVE	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 ^{er} mai 2015	2m68	222 m³/s		
	17 juil 2011	2m51	201 m³/s	2m40 à 2m60	190 à 210 m³/s

Exemple de seuils retenus pour les changements de couleur de Vigilance Crues (tronçon Arve médian)

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.

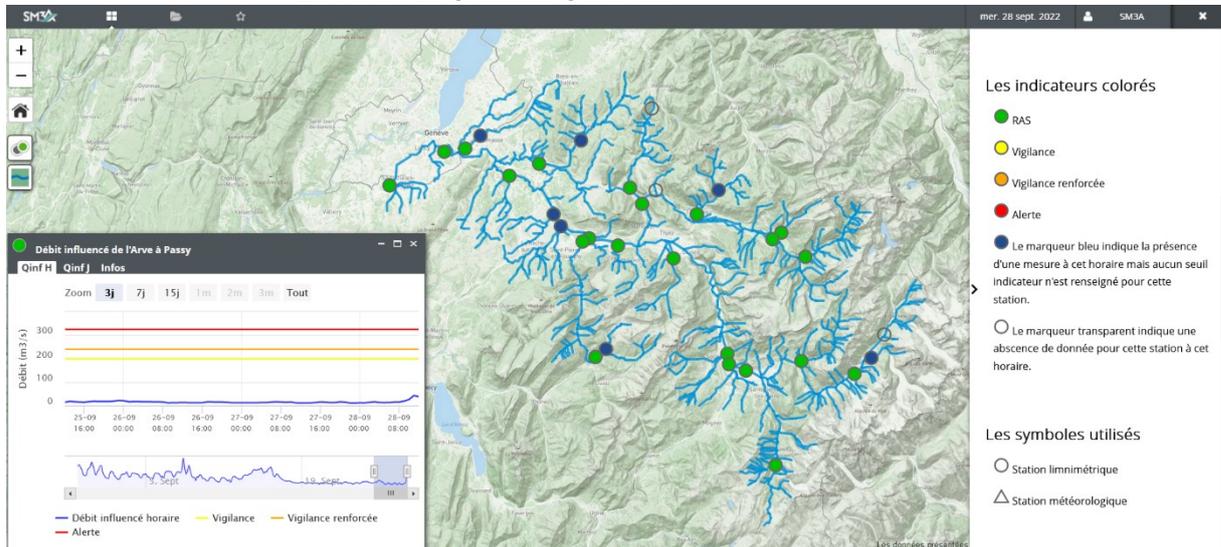
Le superviseur aujourd'hui opérationnel permet de visualiser l'ensemble des mesures de débit existantes sur le bassin versant, ainsi que les stations pluviométriques EDF. En plus des 11 stations hydrométriques DREAL_SPC, les données de 2 stations EDF et de 2 stations du canton de Genève sont également 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)).

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



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.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

Bulletin émis le
mercredi 28 septembre 2022 à 12:17
Prochain bulletin le
jeudi 29 septembre 2022

Bulletin quotidien
SM3A

SITUATION ET ÉVOLUTION MÉTÉOROLOGIQUE

La vaste système dépressionnaire centré dorénavant sur le Bénélux 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. Le cumuls seront plus sobres sur les bassins les plus au sud (Orac ainsi que le Vercors) avec entre 20 et 30 mm. La haute Maurienne sera un peu oubliée. Hydraulicité en forte hausse dès cet après-midi.

DEMAIN : ...retour progressif du sec...
Jeudi: Les précipitations de la nuit se dispersent progressivement dans la matinée et concernent les secteurs les plus au Nord et les Alpes Suisses. De belle pointes de crues sont attendues au petit matin. La couche neigeuse devient conséquente en haute-montagne (au dessus de 2500m environ) au terme de ces derniers jours de septembre bien humides.

TENDANCE ULTIME : ...Embellie brièvement interrompue par un petit passage pluvieux samedi...
Vendredi: belle embellie sous un ciel partagé. Hydraulicité 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 les prochains bulletins). Par contre, la suite s'accorde sur un retour durable de conditions sèches.

Mentions spécifiques :

Probabilité de dépassement des seuils :

Fable risque	Risque	FORT RISQUE	
0%	10%	50%	100%

0% : uniquement pour suivis particuliers

PRÉVISION DES PLUIES ET DES DÉBITS

Régions	Précipitations probables (mm)		Prévision des débits moyens journaliers (m ³ /s)			
	1 8h	J+1 8h	Q obs	Q prévu	J	J+1
Arve	40-70	5-15	32	42	70	
Fier	30-50	5-15	20	40	32	
Tarentaise-Vanoise	20-40	2-5	5.1	11	12	
Giffre à Samoëns [Pont du Giffre] (195 km ²)			8.4	13	22	
Arve à Passy (514 km ²)			13	25	40	
Borne à Saint Jean de Sixt (85 km ²)			0.6	3.5	4.5	
Foron du Chablais à Gaillard (38 km ²)			0.0	1.2	1.0	

☂ : localement plus, * : estimé, ** : station défaillante, italiques : suivi particulier

ALTITUDE DE L'ISOTHERME 0°C (m)

	Aujourd'hui		Demain	
	12h	24h	12h	24h
ALPES DU NORD (Chamonix)	2400	2100	2100	2000

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

Sur le même principe que celui de Vigicrue, le SM3A a défini des seuils de débits associés à des niveaux de Vigilance, avec des couleurs (jaune, orange et rouge). En cas de prévision de dépassement de ces seuils, EDF appelle directement le téléphone d'astreinte du SM3A. Par ailleurs, le superviseur web SM3A permet de visualiser les points de mesure pour lesquels des seuils de vigilance sont dépassés (changement de couleur).

9.4.2.4 Dispositif transitoire Arve médian – Arve aval – Giffre aval

Suite aux événements de mai 2015, la Préfecture de Haute-Savoie a souhaité mettre en place un dispositif transitoire d'annonce des crues, qui s'appuie sur les stations de surveillance de la DREAL, supports de dispositif Vigicrues :

Tronçon	Limite amont	Limite aval	Stations de référence
Arve Médian	Passy confluence Arve - Bon Nant	Marignier : confluence Giffre-Risse	Sallanches (DREAL)
Giffre aval	Marignier : confluence Giffre-Risse	Marignier : confluence Giffre- Arve	Marignier (DREAL)
Arve aval	Marignier : confluence Giffre- Arve	Gaillard : Arve à la frontière Suisse	Arthaz-Pont-Notre-Dame (EDF)

Figure 174 : Station de référence par tronçon de l'Arve

Deux niveaux d'alertes sont définis sur ces trois stations :

- **La surveillance renforcée** est assurée par le SPC Alpes du Nord qui s'appuie sur les prévisions quantitatives (cumul de précipitations en 24 h) pour les trois jours à venir (J à J+2) sur des zones hydrométéorologiques homogènes.
Lorsque le cumul de pluie prévisionnel dépasse 40 mm sur 24h, le prévisionniste complète son analyse, notamment avec la limite pluie-neige, ainsi qu'avec les niveaux d'eau mesurés.
Il peut décider de passer en surveillance renforcée, et envoie par mail à la Préfecture des éléments d'informations, avec copie à la DDT et au SM3A.
- **L'alerte** est assurée par le SPC Alpes du Nord et s'appuie sur les éléments suivants, correspondant à une crue quinquennale :
 - Arve à Sallanches : Alerte à 200 m³/s (h = 2.5 m) ;
 - Giffre à Marignier : Alerte à 200 m³/s (h = 2.60m) ;
 - Arve à Arthaz : Alerte à 530 m³/s.

Si un des niveaux est atteint, le SPC alerte le cadre d'astreinte du SIDPC. Le Préfet, sous-Préfet ou SIDPC décide de déclencher l'alerte « crue de l'Arve » et diffuse un message pré-formaté vers la DDT, le SM3A et les communes concernées.

En complément, le SM3A a missionné EDF en 2021 en tant que prestataire extérieur pour une mission de prévision des débits de crue sur les têtes de bassin et principaux affluents (Arve amont, Giffre amont, Borne et Foron du Chablais Genevois). Il l'assiste également dans la prévision des évolutions de la situation hydrométéorologique (production d'un bulletin dédié 3 fois par semaine).

9.4.3 Stations hydrométriques

L'Arve possède cinq stations hydrométriques de mesures, le Borne en possède trois dont deux avec des résultats exploitables. Elles sont référencées dans le Tableau 16.

Tableau 55 : Stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Arve – Banque HYDRO

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

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

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

9.4.4 Astreinte

Depuis octobre 2018, le SM3A a mis en place des astreintes de sécurité ou de direction, mobilisables en cas de dangers sur les personnes et les biens liés aux intempéries et à leurs incidences sur les cours d'eau du territoire. Elles peuvent être déclenchées durant toute l'année, hors temps de travail et concernent les agents techniques du SM3A.

Les agents concernés sont en premier lieu les techniciens et adjoints techniques et en second lieu les ingénieurs en fonction des nécessités. Les agents en astreinte ont à leur disposition un véhicule professionnel du SM3A, doté d'une caisse de crise et d'un téléphone professionnel.

Concernant les astreintes de direction (personnel d'encadrement pouvant être joint directement par l'autorité territoriale en dehors des heures d'activité normale du service afin de prendre les mesures et les dispositions nécessaires), les agents pouvant être concernés sont : le responsable des opérations de crises et les membres de l'équipe de direction ou responsables de pôle.

Les agents concernés sont susceptibles d'intervenir sur l'ensemble du territoire, sur tous types de cours d'eau et d'ouvrages en fonction des nécessités, et ne sont donc pas exclusivement dédiés à la surveillance de systèmes d'endiguement.

9.5 Consignes de surveillance des ouvrages en période de crise

9.5.1 Chaîne de responsabilité et rôle des acteurs en gestion de crise

9.5.1.1 Chaîne de responsabilité

La répartition des rôles et des responsabilités dans la gestion de crise est multiple et s'applique à plusieurs niveaux :

- ✓ L'Etat responsable d'organiser la surveillance et la prévision des crues, grâce notamment au service Vigicrues ;
- ✓ Le Préfet responsable de la protection civile ;
- ✓ Le Maire responsable de l'établissement du Plan Communal de Sauvegarde (PCS), décideur sur la mise en place une Réserve Communale de Sécurité Civile (RCSC), et Directeur des Opérations de Secours ; Il exerce également un pouvoir de police s'agissant de l'information préventive, la surveillance, l'alerte et la mise en sécurité des personnes.
- ✓ Les gestionnaires d'ouvrages classés Système d'Endiguement responsables de la conduite des études (EDD, VTA...), de la surveillance et des travaux d'entretien ;
- ✓ Les citoyens qui doivent adopter des comportements et des réflexes adaptés.

La responsabilité du SM3A découle de l'exercice de la compétence transférée en matière de Prévention des Inondations (GEMAPI) et plus spécifiquement sur la gestion des ouvrages classés Système d'Endiguement en période de crise.

Le SM3A se doit de :

- Assurer une surveillance adéquate des ouvrages en déployant les moyens humains suffisants ;
- Etablir une véritable chaîne d'information pour alerter les décideurs compétents en matière de sécurité publique ;
- Etre capable d'agir en urgence sur ces ouvrages pour une remise en état ou résorption des désordres si et seulement si, les travaux engagés n'aggravent pas le risque ;
- Assurer la sécurité de ses équipes sur le terrain ;
- Assurer les réparations nécessaires en post-crise.

Les opérations de secours sont coordonnées sous une direction unique, assurée par les maires ou le préfet, autorités de police générale, investis de pouvoirs étendus en cas de situation d'urgence.

9.5.1.2 Liens avec certains acteurs spécifiques de la gestion de crise

Le service interministériel de défense et de protection civile (SIDPC) est le coordinateur principal des structures et acteurs mobilisables (dont le SM3A) sur le département durant les événements climatiques nécessitant une surveillance particulière sur les ouvrages. Il intervient pour coordonner les moyens nécessaires à la gestion de crise, en particulier dans le cadre du plan ORSEC. Le SIDPC assure la coordination entre SM3A et SDIS si besoin.

Les services communaux et intercommunaux sont des interlocuteurs de terrain identifiés dans les PCS, en contact permanent avec leur territoire. Ils assurent une surveillance de l'état des cours d'eau et des points particuliers à surveiller et constituent ainsi un maillon essentiel de la chaîne de surveillance sur le terrain.

Les services du CD74 gestionnaire du domaine routier avertissent aussi régulièrement que possible le SIDPC et le SM3A lorsque l'événement est consécutif à un dysfonctionnement d'un cours d'eau.

Le SM3A est identifié dans le plan ORSEC de la Haute-Savoie (version 2016) pour les missions suivantes :

- Gestion des cours d'eau sur les secteurs de compétences Arve, Giffre & Risse, Borne, Menoge, haute Vallée de l'Arve : Entretien des lits, des berges, des boisements de berges et de certains ouvrages hydrauliques (DIG ou procédure d'urgence)
- Surveillance des digues SM3A
- Travaux en rivière sur cours d'eau cités et affluents
- Gestion des matériaux solides sur Arve et certains affluents de la Haute Vallée
- Interventions sur la prévention des crues et le post crue

Une fiche contact du plan Orsec identifie des contacts par ordre de préférence (4 contacts).

9.5.2 Détails et processus de décision du dispositif de surveillance et d'intervention du SM3A pendant la crise

Le dispositif existant s'appuie sur des procédures en cascade :

- Une veille quotidienne ;
- Une surveillance soutenue ;
- Une direction des opérations ;
- Une surveillance terrain ;
- Un dispositif d'intervention en gestion de crise ;
- Un dispositif d'intervention post-crise ;
- Un dispositif de sortie de crise (dresser un bilan).

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 § 9.3 :

- Vigicrues par le SPC alpes du nord ;
- Service de prévision météorologique et hydraulique en temps réel (abonnement « Hydrique »).

Outre ces dispositifs, la veille quotidienne s'appuie également sur les réseaux de mesure pluviométrique et hydrométrique et sur différents sites internet notamment Suisse.

Le SM3A, par retour d'expérience sur les crues passées, a défini des seuils de mise en vigilance par cours d'eau pour différents types ou combinaison de paramètres (prévision de pluviométrie, prévision d'évolution de l'isotherme °C, hauteurs d'eau mesurées...).

9.5.2.2 Surveillance soutenue des évolutions météorologiques et hydrologiques

Quand nécessaire, la Direction active une surveillance plus soutenue de l'évolution météorologique et des niveaux hydrologiques des cours d'eau. Cette surveillance est assurée par le pôle prévention des inondations avec l'appui du responsable du pôle opérationnel. Cette surveillance s'appuie sur les mêmes outils que la veille quotidienne. Elle complète également son analyse en faisant appel aux services d'un prévisionniste.

A ce stade, la Direction et les responsables de pôles établissent la liste des ressources humaines pouvant être disponibles, leur affecte les véhicules opérationnels, et informe les agents concernés et le Président d'un éventuel événement.

9.5.2.3 Direction des opérations et communication entre les intervenants

En fonction de l'évolution défavorable des conditions météorologiques, la direction (DGS et DGST), sous l'autorité du Président du SM3A, assure la direction des opérations (DO).

En fonction des délais impartis pour mettre en œuvre les moyens du SM3A, la DO est soit restreinte, soit élargie. La DO élargie est composée :

- Du Président du SM3A, responsable de la DO. Il est en relation avec les élus et le préfet. En fonction de la liste des agents disponibles établis précédemment par la Direction, le Président peut suspendre les congés du personnel concerné, il met en situation « gestion de crise » l'ensemble des agents concernés : plage horaire travaillée allongée ;
- De la direction DGS, qui coordonne les moyens et le déploiement des équipes sur le terrain. Elle est également en relation avec le SDIS, SPC, le canton de Genève et tous autres services de secours. Elle assure la remontée d'information auprès du SIDPC (points de situation réguliers) et est le seul interlocuteur direct. La direction assure le suivi de l'évolution météorologique et hydrologique et tient la main courante des événements ;
- Du DGST, responsable du pôle « prévention des inondations », assurant le rôle de cadre technique des agents de terrain. Il réceptionnera leurs appels et apporte l'expertise technique des interventions à distance et arbitre avec la Direction et le Président si besoin les choix retenus d'intervention. Il met en astreinte et coordonne également les entreprises pour les interventions. Il veille à la sécurité des agents sur le terrain. Le responsable du pôle peut occasionnellement assurer un renfort sur le terrain sur des événements de grande ampleur ;
- De la direction DGA pour suppléer au DGS ou DGST en cas d'absence ;
- En fonction de l'ampleur, un appui technique peut être assuré soit par le responsable du pôle opérationnel ou par le référent du service « système d'endiguement » qui assureront un soutien logistique au cadre technique (surveillance de l'évolution des conditions climatiques et hydrologiques, tenue d'une main courante...) et pourront renforcer les équipes sur le terrain.

Il est à noter qu'actuellement, les postes de DGS et de DGST sont confondus car ils sont assurés par la même personne. Cette dernière est responsable du pôle « prévention des inondations ».

La DO est située physiquement dans les locaux du SM3A à Saint Pierre en Faucigny disposant de l'ensemble des éléments papiers et informatiques pour appliquer les consignes du présent document. Les dossiers d'ouvrage y sont stockés.

9.5.2.4 Surveillance terrain

Une fois la DO en place, elle active la surveillance sur le terrain en déployant les moyens humains.

Les agents de terrain surveillent les points de vigilance spécifiques de leur territoire et retransmettent l'évolution sur le terrain au cadre technique en cas de DO élargie ou à la Direction en cas de DO restreinte.

En cas de désordres observés, l'agent évalue :

- l'importance du désordre ;
- son évolution ;
- la nécessité de suivre à un pas de temps donné ce désordre

Les agents de terrain peuvent participer à des Postes de commandements sous la responsabilité des Maires ou du Préfet. Dans ce cas de figure, toute décision d'intervention du SM3A sera au préalable validée par la DO.

Les agents de terrain mis en situation de « gestion de crise » n'assureront que très ponctuellement une surveillance nocturne. Pour des situations d'envergure (interventions nocturne, forte pluviométrie...) et sur décision de la DO, les agents techniques peuvent être accompagnés en binôme dans les véhicules par des collaborateurs du SM3A, afin de réduire les risques inhérents aux travailleurs isolés et faciliter les transmissions de données.

9.5.2.5 Ressuyage de la zone protégée

La commune de St-Pierre-en-Faucigny dispose de réseaux d'eaux pluviales et unitaires denses et bien réparties sur la zone protégée. Ces derniers se déversent dans l'Arve.

Par ailleurs, ces réseaux d'eaux pluviales existants serviront pour le ressuyage de la zone protégée.

9.5.2.6 Travaux d'urgence

Le SM3A fera état de l'article R214-44 du code de l'environnement pour engager des travaux d'urgence. Il peut s'agir d'empêcher la formation d'une brèche dans les ouvrages classés Système d'Endiguement.

Le préfet de la Haute Savoie, ainsi que la SIDPC seront avertis par la direction des opérations DO au préalable.

Le SM3A dispose en interne de moyens d'ingénierie qui permettront de suivre les opérations d'urgence.

9.5.2.7 Modalité de mise en œuvre des fins d'alerte

Sur la base des informations délivrées par le SPC, le SIDPC ou le constat du SM3A sur le terrain, la direction des opérations organise la fin des interventions ou de la surveillance.

Elle peut :

- Soit passer en fin d'alerte par secteur concerné dans la mesure où la durée de la décrue s'annonce sur certains cours d'eau ;
- Soit lever l'alerte généralisée dans la mesure où elle estime définitif le retour à la normale, sans risque d'une reprise du phénomène.

La fin de l'alerte conduit à :

- Notifier la levée de l'alerte aux entreprises ;

- Engager la mise en œuvre des consignes post-crue ;
- Avertir le service de la préfecture.

Attention, une fin d'alerte peut se caractériser par une surveillance maintenue pendant quelques jours afin de confirmer l'absence de désordre à la décrue.

9.5.2.8 Rapport de crue

Une note de synthèse sur le déroulement de la crue sera réalisée en interne par le SM3A et transmis conformément à la réglementation en vigueur dans les meilleurs délais au service de contrôle pour toute crue supérieure à la décennale, dès le tronçon concerné.

9.5.3 Visites post-crue

9.5.3.1 Objet

La préparation, l'organisation et la conduite de l'inspection visuelle post-crue de la digue relèvent du service gestionnaire des ouvrages. Cette visite doit se faire dans les meilleurs délais après la crue.

En cas de crue majeure couvrant un nombre important de digue, le SM3A pourra faire appel à un bureau d'études pour réaliser ces visites.

Avant l'inspection post-crue, tous les documents topographiques, les comptes rendus des précédentes visites et les clichés doivent être réunis.

Les constats effectués lors de ces inspections visuelles se font sur une fiche semblable à celle utilisée lors des visites annuelles (en annexe XV). Un dossier photographique des désordres est nécessaire avec sa légende et sa localisation ainsi que des photos d'ensemble.

On notera que d'autres phénomènes peuvent nécessiter le déclenchement des visites post-crue :

- Les accidents nautiques (choc d'embarcation sur les perrés, échouage, etc.) ;
- Les engravements important du lit mineur ;
- **Les séismes de magnitude supérieure à 5 sur l'échelle de Richter dans un rayon de moins de 100km.**

Ces visites post-crue permettent également de faire l'inventaire de l'ensemble des dégâts sur le territoire et de prioriser les interventions post-crue.

9.5.3.2 Déroulement

Relevé de la laisse de crue :

Pour chaque tronçon de rivière concerné par la crue, il sera procédé à un relevé des laisses de crue par un géomètre dans les 24h à 48h suivants la crue. Ces levés nécessitent un niveau de précision optimum.

Le niveau sera au minimum relevé au droit de tout ouvrage singulier (ponts, échelles,...). Il sera important de faire le distinguo entre le niveau de charge et le niveau d'écoulement.

Le niveau sera – à minima – relevé systématiquement aux échelles en place, de façon à permettre une comparaison avec les relevés des années précédentes. Dans le cas où le secteur concerné ne comporte pas d'échelle, le niveau sera relevé sur des points de repères fixes (ponts, singularité hydraulique, ...).

Visite des digues :

Une fois l'alerte levée, certaines personnes seront affectées à la surveillance des digues sensibles à la décrue en particulier celles qui sont identifiées comme sensibles à la décompression des matériaux.

Les désordres apparents seront relevés à l'aide d'une fiche de relevé de type VTA dans la mesure du possible : brèche, embâcle, érosion du talus ou pied de digues, indice de fuite, glissement du talus, ...

Chaque désordre observé sera à minima localisé et pris en photo. En cas de désordre mettant en péril l'intégrité de la digue, le personnel de terrain ou le prestataire désigné contactera immédiatement le Poste de Commandement de la surveillance des Ouvrages du SM3A.

Cette surveillance pourra se faire sur plusieurs jours. La localisation des désordres sera faite en utilisant le système de repérage mis en place par le SM3A (bornes ou marquage au sol tous les 100 ou 200 mètres) et à l'aide d'un GPS ou à défaut d'une roulette ou d'un profil.

9.5.3.3 Compte-rendu des visites

La visite post-cruve 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-cruve ;
- 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-cruve servira de support pour les événements à venir et permettra de justifier des levés topographiques dans les secteurs où les désordres sont importants ou encore des reconnaissances complémentaires à la pelle mécanique.

Les désordres (tels que embâcle, érosion du talus ou pied de digue, indice de fuite, glissement du talus,...) relevés sur le terrain par le personnel du SM3A sont renseignés sous SIRS 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-cruve

L'intervention post-cruve 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.

Le PCS de Saint Pierre en Faucigny décrit de manière didactique les risques potentiels sur la commune. Le déclenchement du PCS intervient soit du propre chef du maire ou suite à une demande de la préfecture. Ces stades de déclenchements sont aussi à mettre en cohérence avec les stades définis dans la consigne de surveillance du SM3A. Les points de vigilances à surveiller sont aussi à discuter avec le SM3A.

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

Fermez les portes, les aérations

Coupez l'électricité et le gaz

Montez à pied dans les étages

Ecoutez la radio pour connaître les consignes à suivre

N'allez pas chercher vos enfants à l'école : l'école s'occupe d'eux

Ne téléphonez pas : libérez les lignes pour les secours

• Ne pas tenter de franchir un cours d'eau à pied comme avec un véhicule.

EN CAS D'INONDATION BRUTALE

Fuyez immédiatement

Gagnez un point en hauteur

N'allez pas chercher vos enfants à l'école : l'école s'occupe d'eux

Figure 176 : 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 (VTA, 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.

298 / 318

SUEZ CONSULTING

General

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. 9.3). Les modalités d'alerte sont bien définies.

9.8 Barrières de sécurités

Le chapitre suivant rappelle les mesures de réduction des risques nécessaires pour respecter la criticité des événements, les adaptations à envisager par le maître d'ouvrage pour pérenniser la sécurité de ses ouvrages et les mises en garde vis-à-vis du risque d'inondation.

9.8.1 Définition des barrières de sécurité

Le SM3A fera état de l'article R214-44 du code de l'environnement pour engager des travaux d'urgence.

Il peut s'agir d'empêcher la formation d'une brèche dans les ouvrages classés Système d'Endiguement.

Le SIDPC sera averti par la direction des opérations DO au préalable.

Lorsqu'une intervention d'urgence a été commandée, la Direction des opérations du SM3A fait le point avec l'entreprise sur l'avancement des travaux.

Après concertation avec l'entreprise mobilisée, s'il est constaté sur le lieu du désordre l'impossibilité de procéder à une intervention ou la nécessité de la différer, la DO en informe le Service Interministériel De Protection Civile (SIDPC) de la préfecture.

Les travaux d'urgence sont des mesures provisoires de confortement ou de déblaiement (mise en œuvre en dehors des contraintes usuelles des règles de l'art et des garanties après réalisation). Il peut s'agir de :

- Confortements de digues en urgence par enrochements ou par mise en œuvre de remblais contre le talus de digue ;
- Mise en œuvre de remblais aux abords des digues (cordon de matériaux, diguettes,) ;
- Renforcement et/ou création de pistes d'accès aux zones d'intervention ;
- Réalisation de rampes d'accès et de plateformes de chantier ;
- Travaux préparatoires sur les zones d'intervention (déboisement, dessouchage, décapage,) ;
- Mise en place de busage provisoire de chantier ;
- Curage et dégagement d'ouvrages.

Le SM3A dispose en interne de moyens d'ingénierie qui permettront de suivre les opérations d'urgence.

La liste des entreprises de travaux publics affectées aux interventions d'urgence en période de crue est disponible dans le répertoire opérationnel tenu à jour dans les locaux du SM3A.

En cas de nécessité d'intervention, l'équipe de surveillance se met en rapport avec la DO qui décide de solliciter (ou non) les entreprises. Selon la situation, le SM3A pourra dépêcher sur place un technicien compétent pour assurer la coordination des moyens mis en œuvre. Le

directeur des opérations peut aussi se rendre sur place pour prendre la décision (ou non) d'envoyer l'entreprise.

Dans tous les cas, les entreprises mobilisées peuvent également apprécier les risques encourus et faire valoir leur droit de retrait.

Les interventions seront enclenchées si et seulement si :

- **Elles n'engendrent pas de sur-risque pour la zone protégée (pas de surélévation de niveau de protection...)** ;
- **Elles n'engagent pas la sécurité des équipes de travaux (pas d'intervention dans le lit en crue...).**

9.8.2 Respect des barrières de sécurités identifiées

Les scénarios de dysfonctionnement des digues ont tous été jugés de criticité acceptable en état projet du fait de l'existence et de la mise en œuvre par le SM3A de barrières de sécurité, barrières qui permettent de décaler 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.

9.9 Recommandation de l'organisme agréé qui réalise l'étude de dangers (9 bis)

9.9.1 Alerte, surveillance et prévision des niveaux d'eau

Actuellement, il existe une échelle limnimétrique au droit du pont Royal. Celle-ci, très bien placée (début du système d'endiguement), sera utilisée comme un lieu de référence → échelle n°1.

Une nouvelle échelle limnimétrique est à créer lors des travaux de confortement et de reconstruction des digues du Borne en aval du système d'endiguement. Celle-ci prendra en compte la concomitance des crues du Borne et de l'Arve → échelle n°2.

Les échelles devront être entretenues, visibles pour les équipes du SM3A et accessibles aisément par voies de circulation.

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

La localisation des échelles limnimétriques liées au système d'endiguement « Saint Pierre en Faucigny entre Arve et Borne » est donné dans la carte suivante :

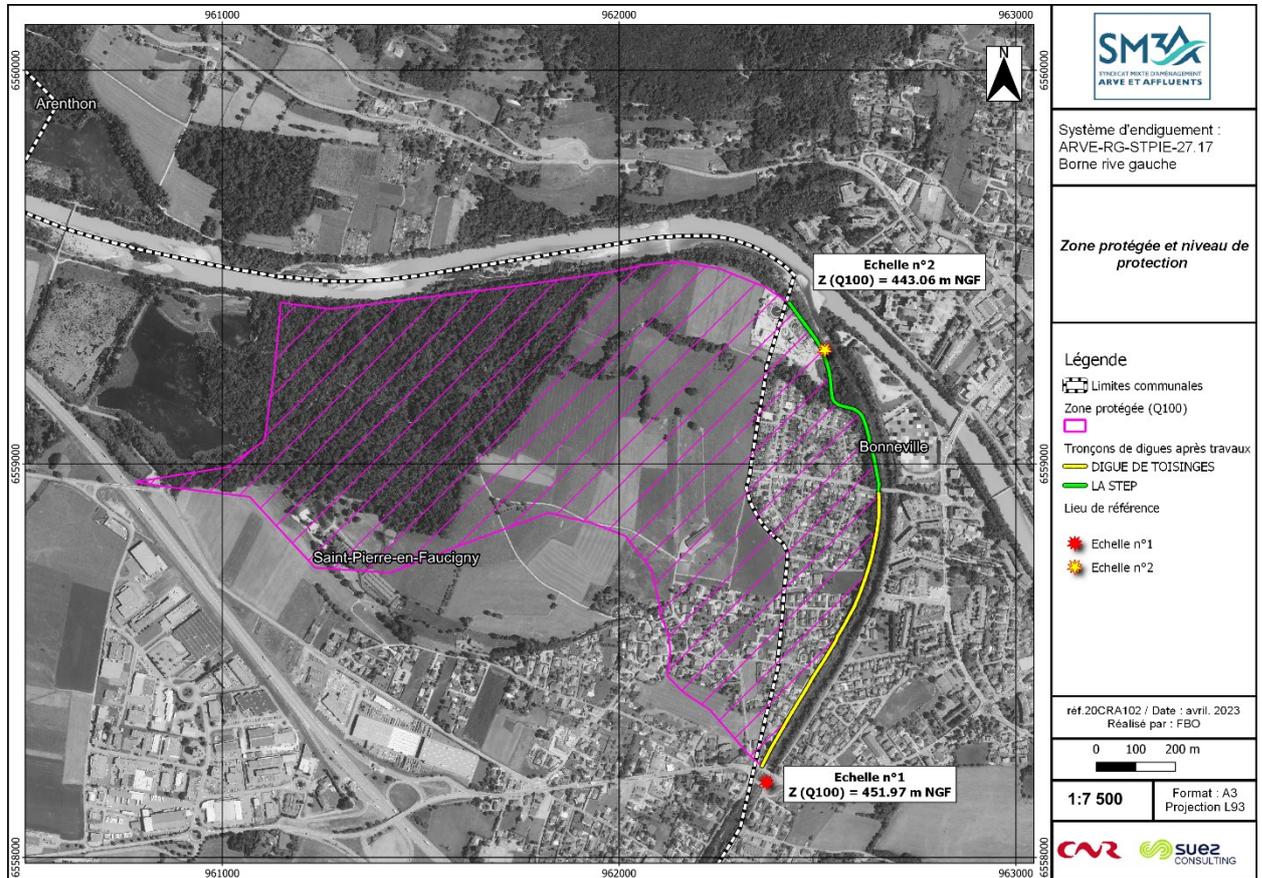


Figure 177 : Localisation des points de référence du système d'endiguement et cotes correspondant aux niveaux de protection

Sur le Borne, le temps écoulé entre le niveau pré-alerte (vert) et l'évacuation de la surveillance (rouge) est près de 7 h (en cas de crue centennale) :

- ✓ **Le stade Q10** correspond à une crue à partir desquels les ouvrages rentrent en charge → alerte verte
- ✓ **Le stade Q30** correspond à une mise en charge significative des ouvrages → alerte orange
- ✓ **Le stade Q100** correspond au niveau de protection du SE → alerte rouge

Pour rappel, la modélisation du niveau de protection centennial sur le Borne a été simulée en considérant une crue trentennale sur l'Arve (ce qui est sécuritaire).

Le tableau ci-après présente les cotes des niveaux d'alerte proposés :

Tableau 56 : Seuils de vigilance et d'alerte proposés

Station	Stade	Débit Borne [m³/s]	Cote échelle [m NGF]	Couleur
Echelle n°1 (Pont Royal)	Q10	113.5	451.47	Vert
	Q30	141.9	451.75	Orange
	Q100	178.4	451.97	Rouge

Station	Stade	Débit Borne [m³/s]	Cote échelle [m NGF]	Couleur
Echelle n°2 (Confluence)	Q10	113.5	442.64	Vert
	Q30	141.9	442.88	Orange
	Q100	178.4	443.06	Rouge

La description des différents états est donnée ci-dessous :

a) Niveau 1 d'intervention : alerte vert

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

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 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

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.

9.9.2 Surveillance vis-à-vis du séisme

Comme susmentionné, Bonneville est sur une zone de sismicité 4. D'après les recommandations du MEDDE, après la survenance d'un séisme ayant dépassé un certain seuil (cf. § 9.1 du MEDDE), on doit d'abord effectuer une visite d'inspection 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, le gestionnaire devra faire réaliser une Visite technique approfondie (pour le repérage de traces de glissement ou de liquéfaction des sols par exemple)).

Cet élément est à intégrer au document des consignes générales de surveillance et d'exploitation.

9.9.3 Gestion des ouvrages

À la suite des travaux, le futur système d'endiguement offrira un niveau de protection satisfaisant face aux inondations.

Les actions à entreprendre par la suite ont donc pour but de conserver ce niveau de protection au cours du temps. La surveillance et l'entretien des ouvrages du système d'endiguement permettent ainsi de conserver un niveau de sûreté constant dans le temps.

L'entretien du système d'endiguement repose sur les axes suivants :

- La pratique régulière de la surveillance visuelle, programmée et postérieure aux crues ;
- L'entretien des désordres structuraux (affouillements, dégradations locales, etc...) ;
- L'entretien des parties d'ouvrage en maçonnerie (muret d'endiguement) ;
- Le contrôle de la végétation sur la digue (respect du plan de gestion de la végétation) ;
- S'assurer de l'entretien et de la lisibilité des échelles limnimétriques ;
- Impliquer des acteurs extérieurs lors des exercices de crise (mise à jour des PCS) ;
- La lutte contre les dégâts des animaux fouisseurs.

9.9.4 Arrêté ministériel du 8 août 2022

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. Néanmoins, il est recommandé au SM3A de mettre à jour ce document suivant la même hiérarchisation fixée par cet arrêté ministériel.

A noter que les recommandations du présent chapitre 9.10 vont dans ce sens.

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 §9.9 pour une gestion de crise optimisée sur le système d'endiguement Arve-RG-STPIE-24.17.

Nous recommandons au SM3A de détailler dans cette note l'organisation à mettre en place en cas de crue dépassant le niveau de protection.

Il est à noter que le SM3A a réalisé ce type de fiche sur d'autres systèmes d'endiguement classés.

9.9.5 Conclusion

Depuis sa création en 1994 et sa montée en compétence depuis 2012 à l'échelle du bassin versant de l'Arve (aussi bien en matière d'ouvrages hydrauliques qu'en prévention d'inondation fluviale et torrentielle), le SM3A a pris de multiples dispositions en matière de retour d'expérience des événements passés (gestion de crues en particulier). Ces dispositions lui permettent d'évoluer et d'améliorer continuellement sa politique de gestion de crise, son organisation interne et les outils mis en place dans le cadre de l'exercice de la compétence GEMAPI. Par conséquent, son fonctionnement répond aujourd'hui à l'item 6 de l'arrête du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'Etude de Dangers.

Les outils mis en place dans le cadre de l'exercice de la compétence GEMAPI lui permettent d'intervenir sur l'ensemble du bassin versant de l'Arve. Chaque intervention et/ou outil déployé représente autant d'éléments constituant des barrières de sécurité dans la survenu de l'accident (crue). L'expérience du SM3A montre que les barrières de sécurité citées précédemment fonctionnent et permettent entre autres de réduire drastiquement les risques de rupture (rendu possible par la surveillance et les interventions quotidiennes, la gestion en crise et la remise en état post crise). Par ailleurs, les propositions existantes vis-à-vis de l'item 7 de l'arrête du 30 septembre 2019 fonctionnent pleinement.

10. CARTOGRAPHIE ET DESCRIPTION DES RESULTATS

10.1 Cartes administratives

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.



Figure 178 : Limites administratives du territoire relevant du SM3A

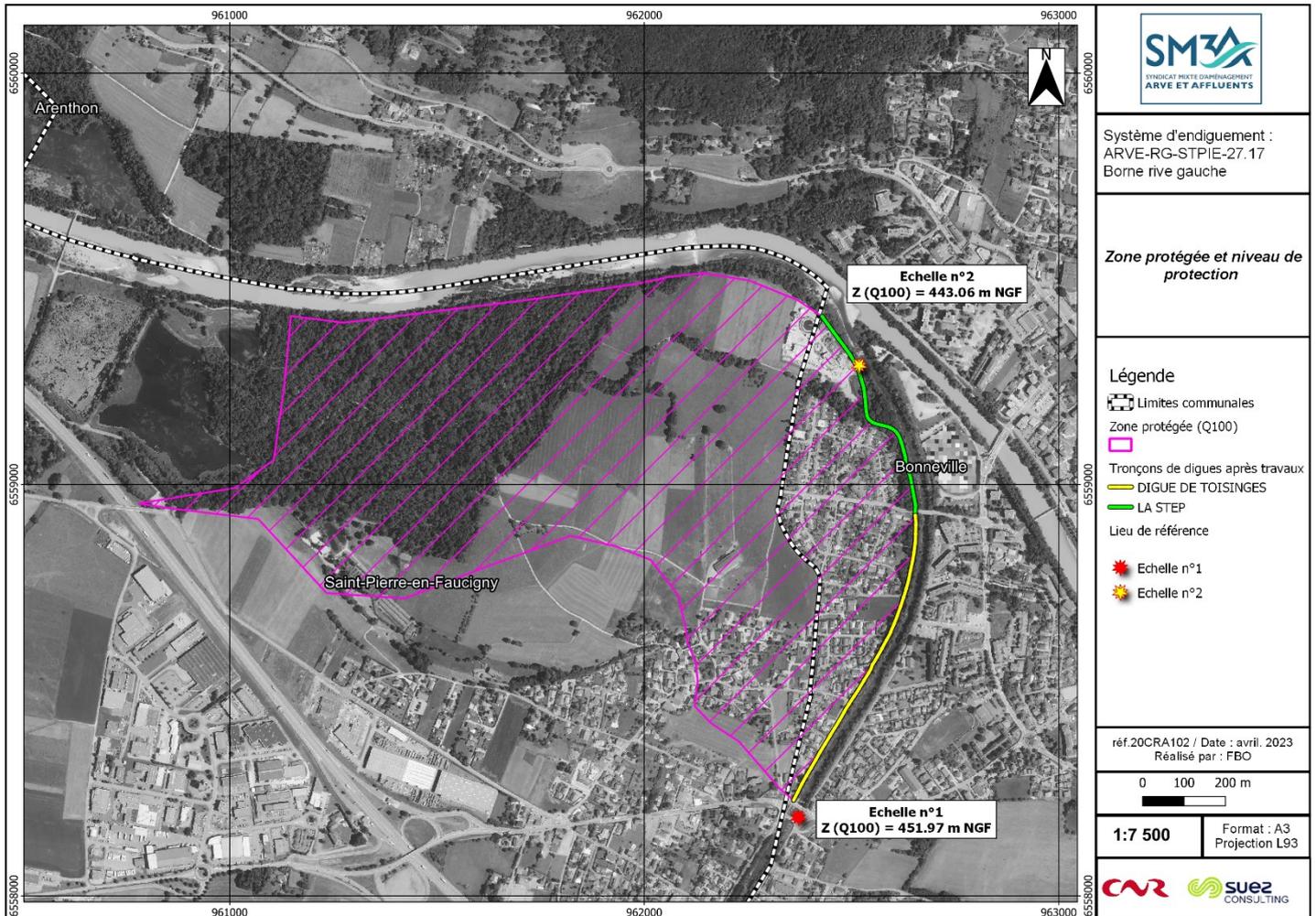


Figure 179 : Zone protégée par le système d'endiguement « Saint Pierre en Faucigny entre Arve et Borne »

10.1.1 Cartes des venues d'eau

Une cartographie des zones mises en eau a été réalisée pour les deux scénarios modélisés et listés ci-dessus. 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 :

- Les zones de venues d'eau non dangereuses ou peu dangereuses : pour lesquelles $V < 0.5$ m/s et $H < 1$ m
- Les zones de venues d'eau dangereuses : $V \geq 0.5$ m/s ou $H \geq 1$ m
- Les zones de venues d'eau très dangereuses, correspondant à des points bas (effet cuvette $H > 2$ m) ou des zones de dissipation d'énergie importante sont également répertoriées.

	Peu dangereuses ($h < 1$ m et $v < 0.5$ m/s)
	Dangereuses ($1 < h < 2$ m ou $v > 0.5$ m/s)
	Très dangereuses (cuvettes - $h > 2$ m)

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 du système d'endiguement

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'étude de dangers, le scénario 1 représente le fonctionnement nominal du système d'endiguement dans le cas du passage d'une crue correspondant au niveau de protection du système (Q100). On admettra que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus.

Sur la carte des venues d'eau ci-dessous, on constate que la crue centennale ne déborde pas dans la zone protégée par le système d'endiguement en situation de travaux achevés. Les digues de Toisinges et de la STEP assurent une protection centennale de la zone protégée.

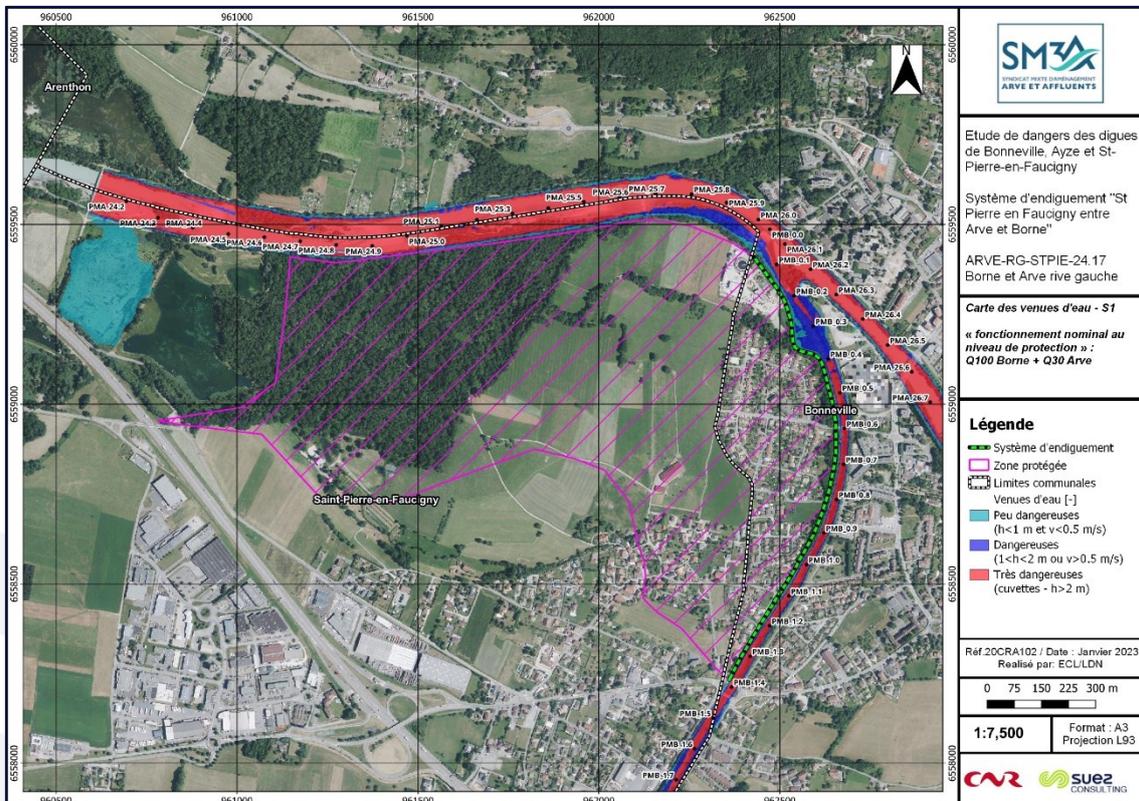


Figure 180 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

Ci-après les cartes des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement du S1 :

Etude de dangers des digues de Bonneville, AYZE et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

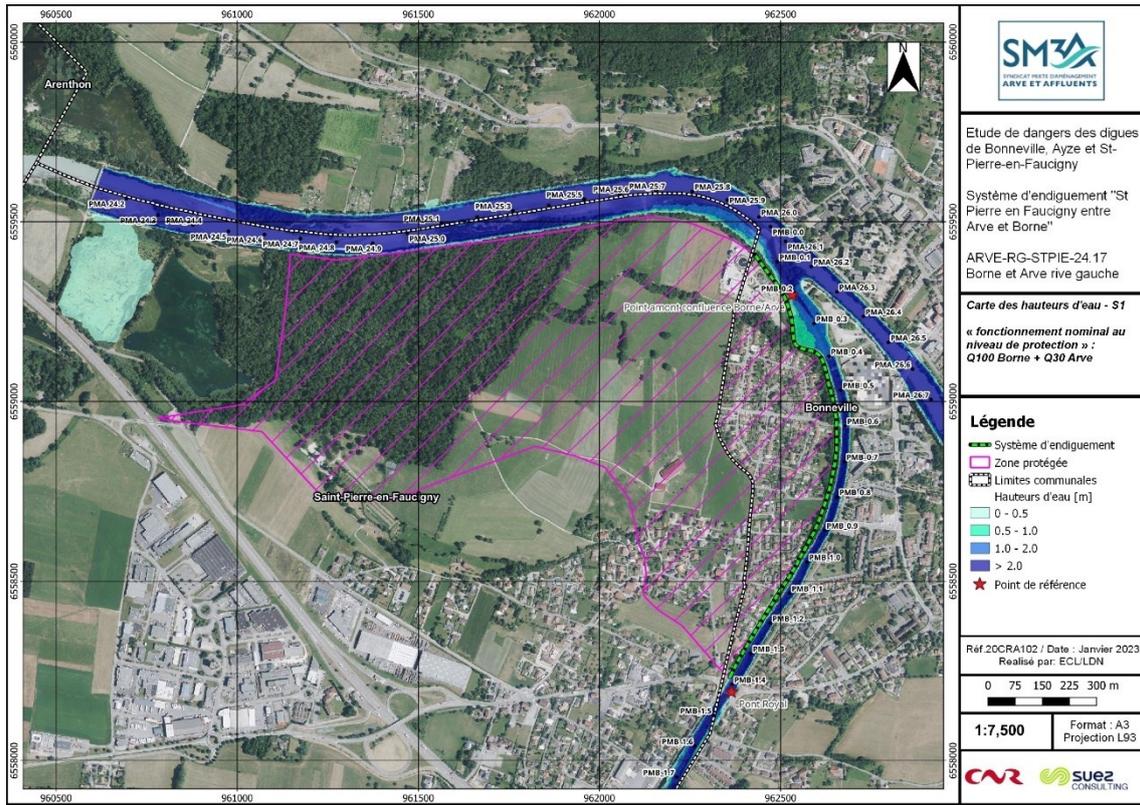


Figure 181 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des hauteurs d'eau)

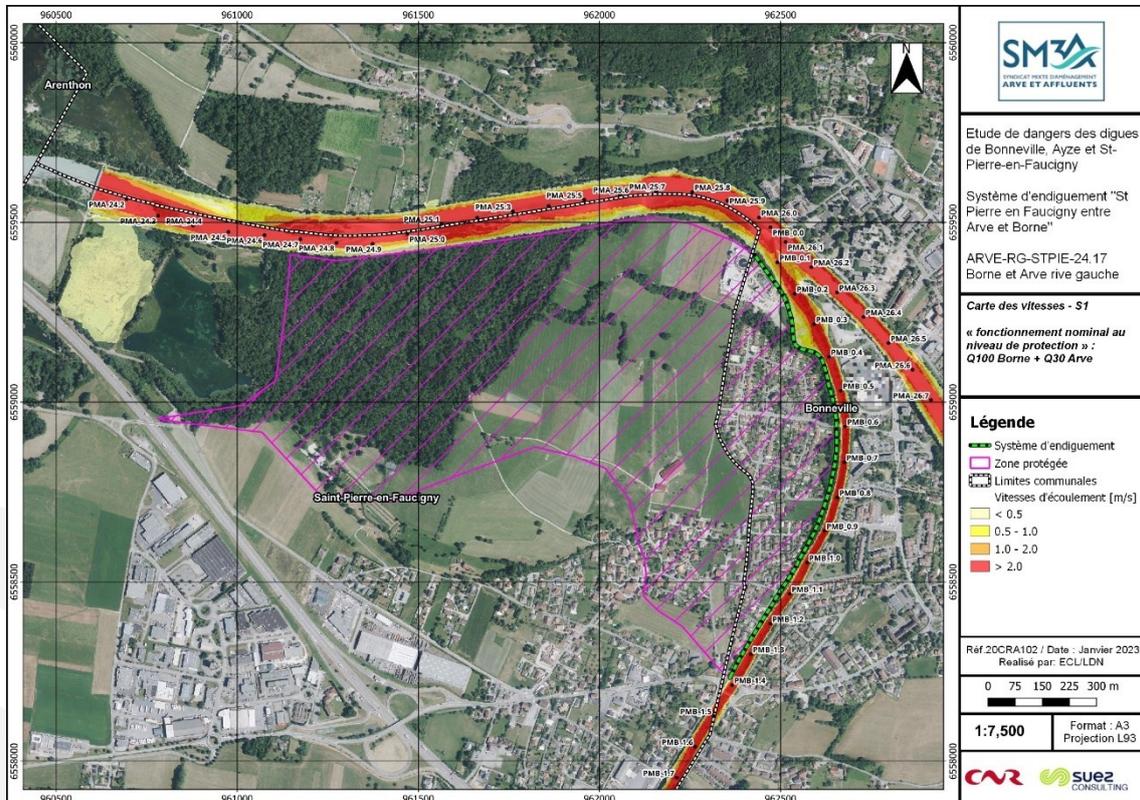


Figure 182 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement (carte des vitesses d'écoulement)

10.3 Scénario 3 : Défaillance structurelle du système d'endiguement

Conformément à l'arrêté du 30 septembre 2019 précisant le plan de l'étude de dangers, 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 de l'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture supérieur à 50 %.

Dans le cas du système d'endiguement de Saint-Pierre en Faucigny entre Arve et Borne, la défaillance structurelle est représentée par l'ouverture de deux brèches dans le corps de la digue, sur une occurrence de crue tricentenaire (Q300).

Deux sous-scénarios sont modélisés (S3.1 et S3.2). Les caractéristiques des brèches sont données dans le chapitre 8.

Sur les deux sous-scénarios, les cartographies des venues d'eau montrent qu'une partie de la zone protégée est inondée.

A la suite des cartographies (valeurs maximales des inondations), la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps est donnée sous forme de figures successives des animations de la modélisation (à partir du moment du début de l'ouverture des brèches).

10.3.1 Scénario 3.1 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne

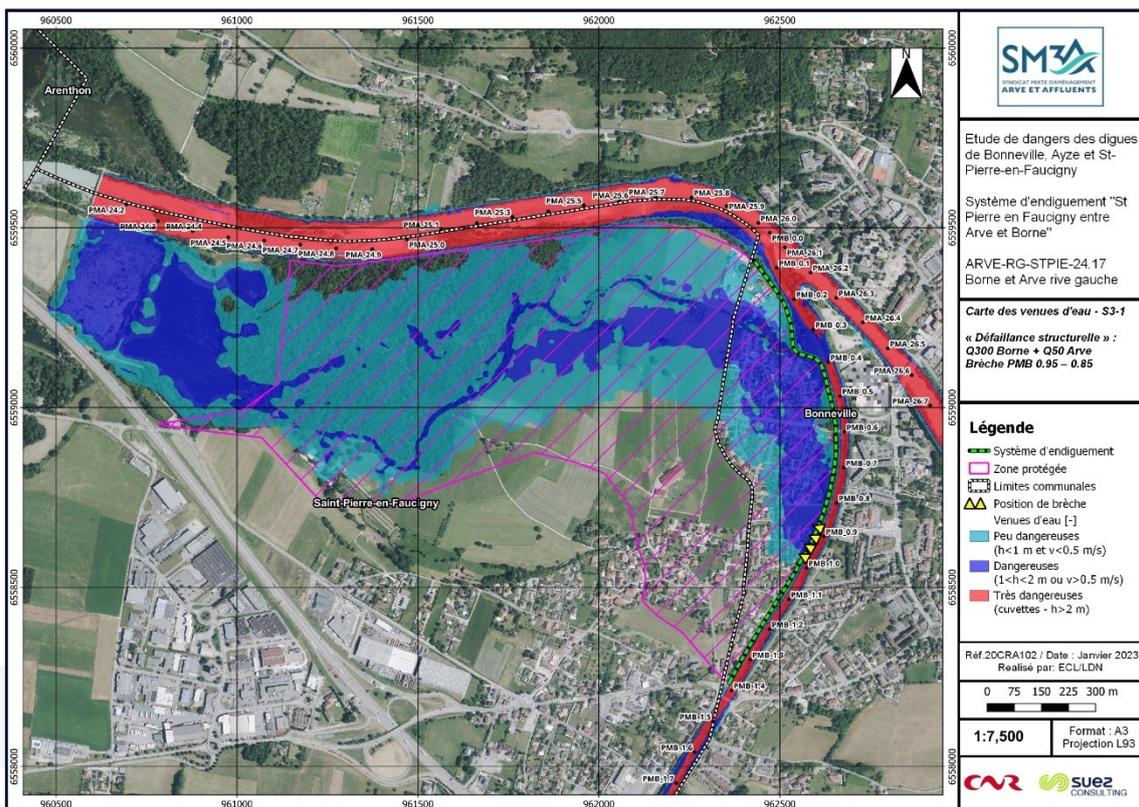


Figure 183 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

Ci-après les cartes des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement du S3.1 :

Etude de dangers des digues de Bonneville, AYZE et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

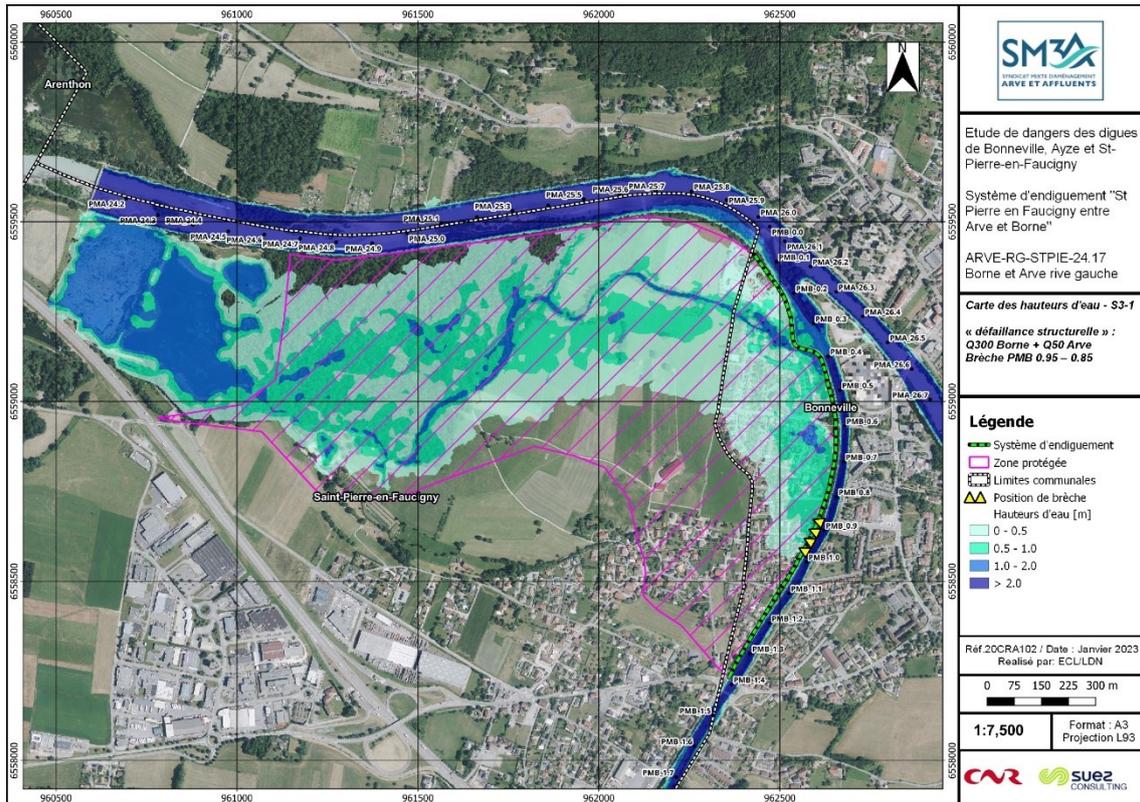


Figure 184 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des hauteurs d'eau)

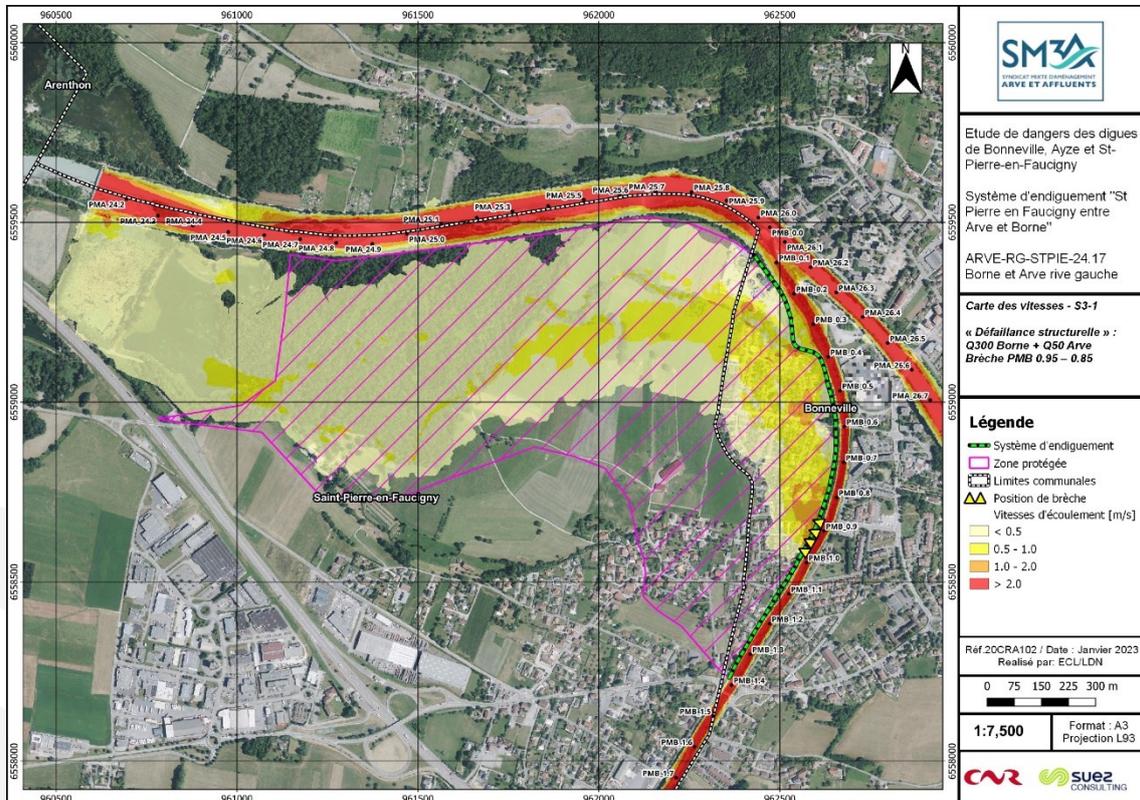


Figure 185 : Défaillance structurelle 3-1 du système d'endiguement (carte des vitesses d'écoulement)

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE



Ci-dessous une description et une série de cartographies de la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps (l'onde de submersion est représentée sous forme de hauteurs d'eau) :

- ✓ Environ 1 heures après l'ouverture de la brèche dans la digue de Toisinges, la quasi-totalité du quartier de Tucinge, située en aval de la brèche, est inondée. La moitié de la STEP de Bonneville est inondée.
- ✓ Environ 2 heures après l'ouverture, l'inondation se propage en aval et inonde la forêt communale de Bonneville. Les étangs situés en amont de la passerelle du SM3A sont également submergés. A noter que ces derniers secteurs ne présentent pas d'enjeux particuliers. Enfin, le site du SM3A est inondé.
- ✓ Environ 3 heures après l'ouverture de la brèche, l'enveloppe inondée est sensiblement la même que à deux heures de l'ouverture. Néanmoins, les hauteurs d'eau augmentent au niveau des étangs.

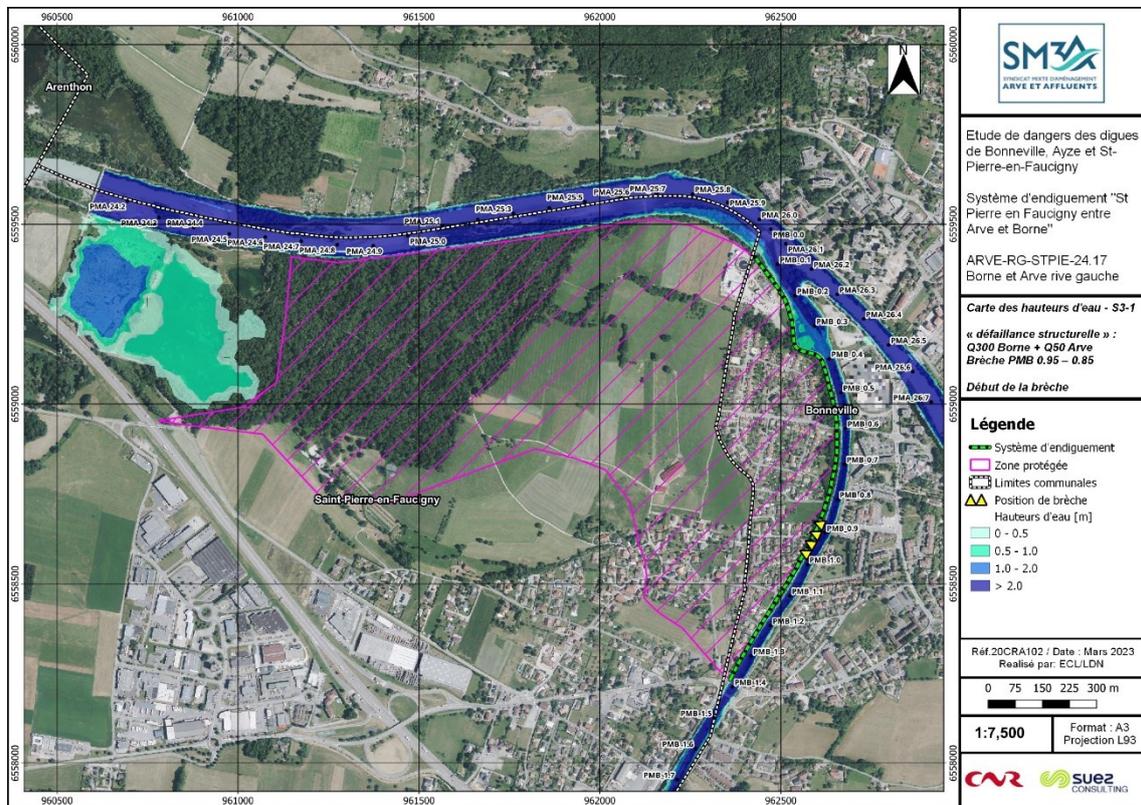


Figure 186 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche

Etude de dangers des digues de Bonneville, AYZE et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

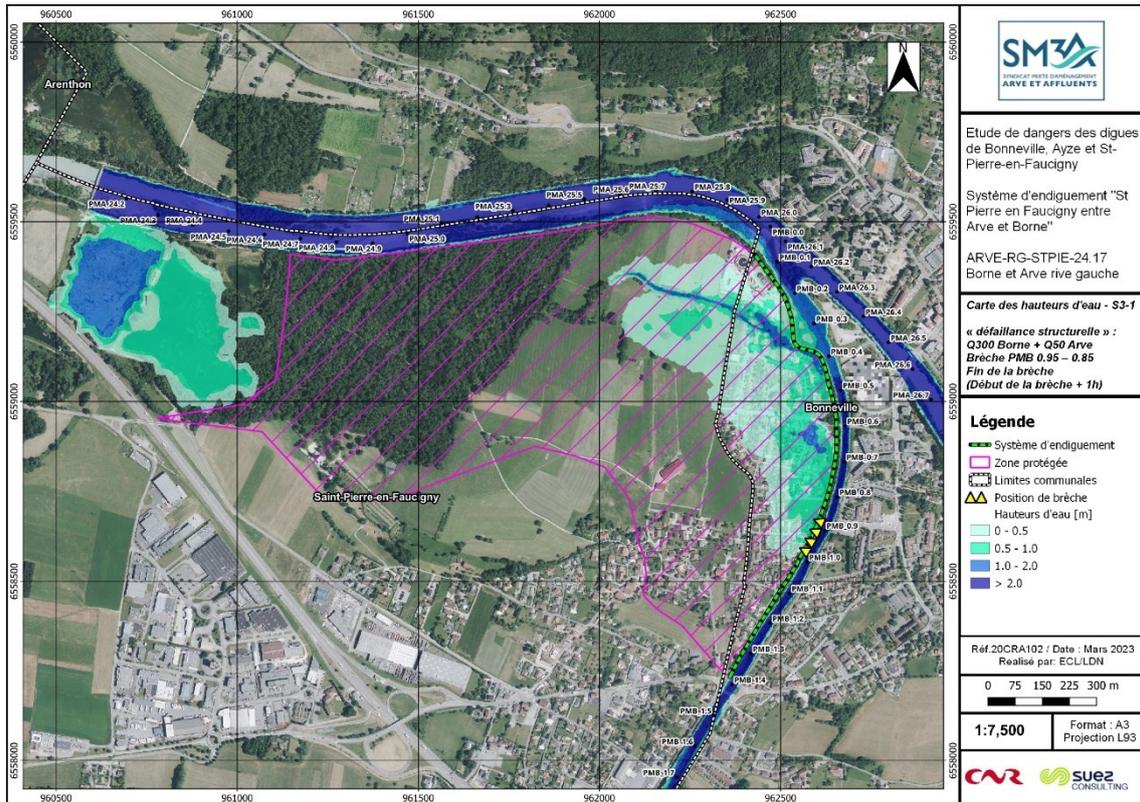


Figure 187 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 1h00

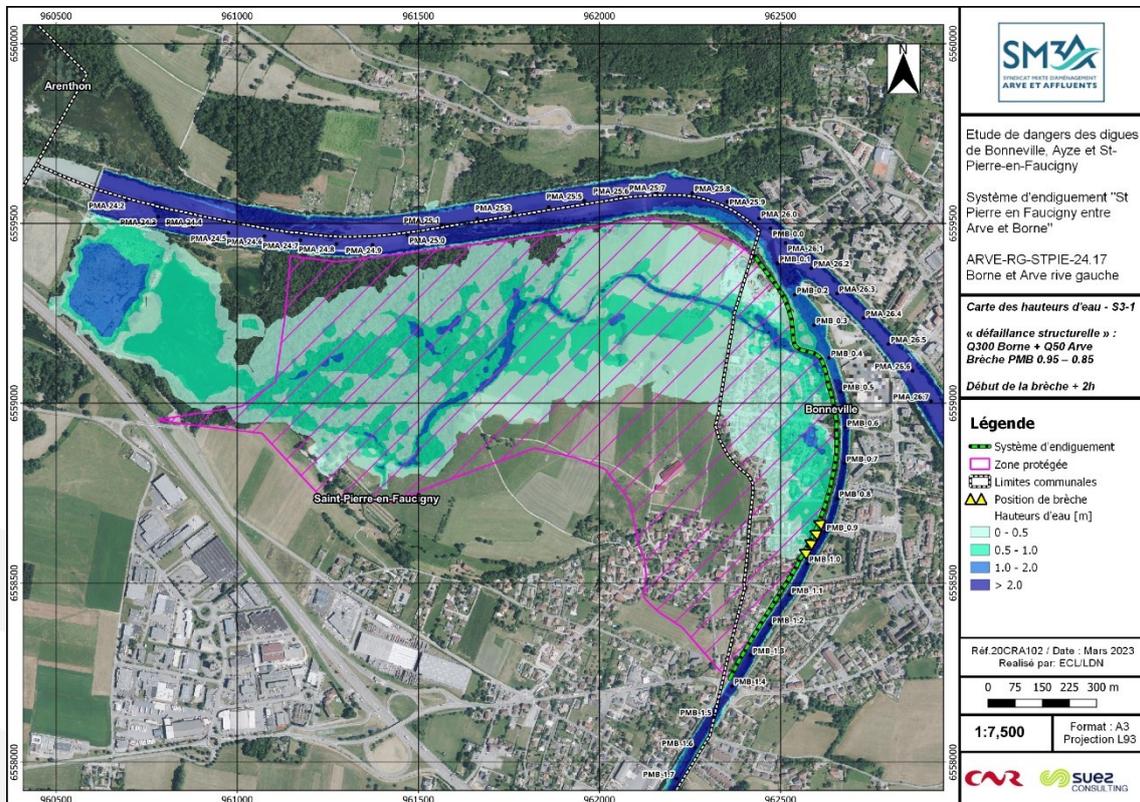


Figure 188 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 2h00

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

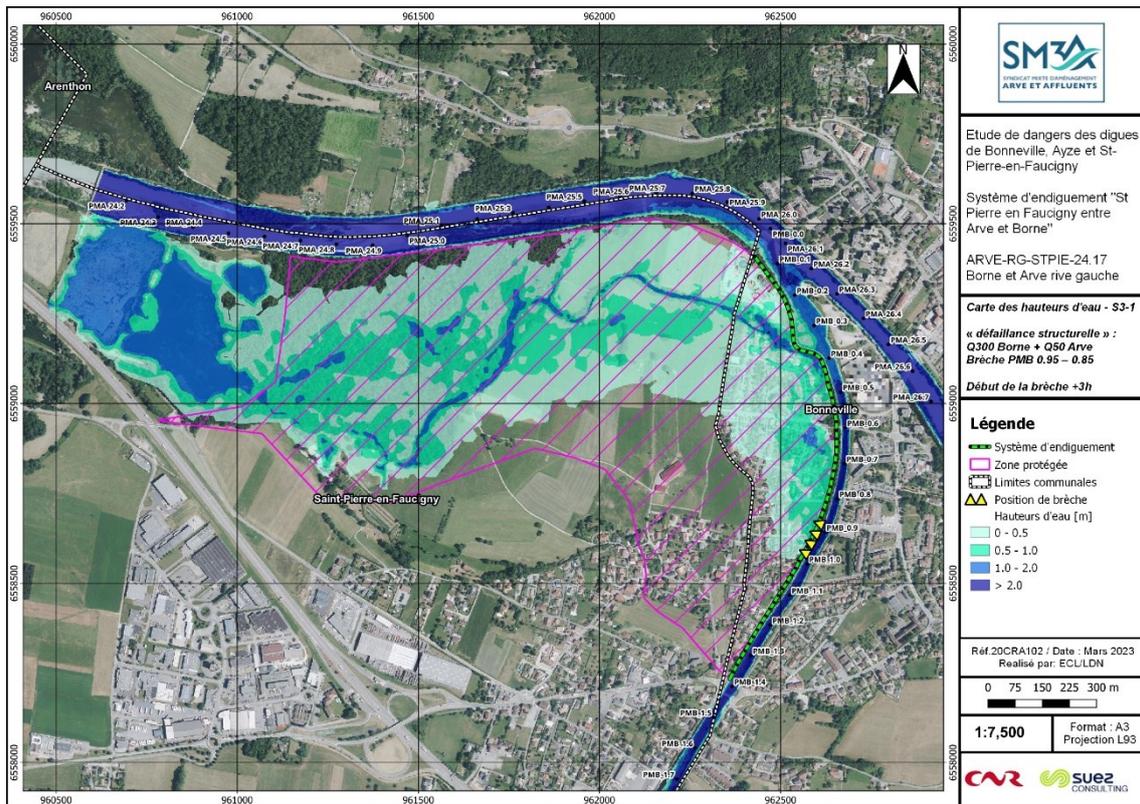


Figure 189 : Défaillance structurelle 3-1 – début de la brèche + 3h00

10.3.2 Scénario 3.2 : Rupture par brèches pour des crues supérieures au débit de sureté de l'ouvrage – rive gauche Borne

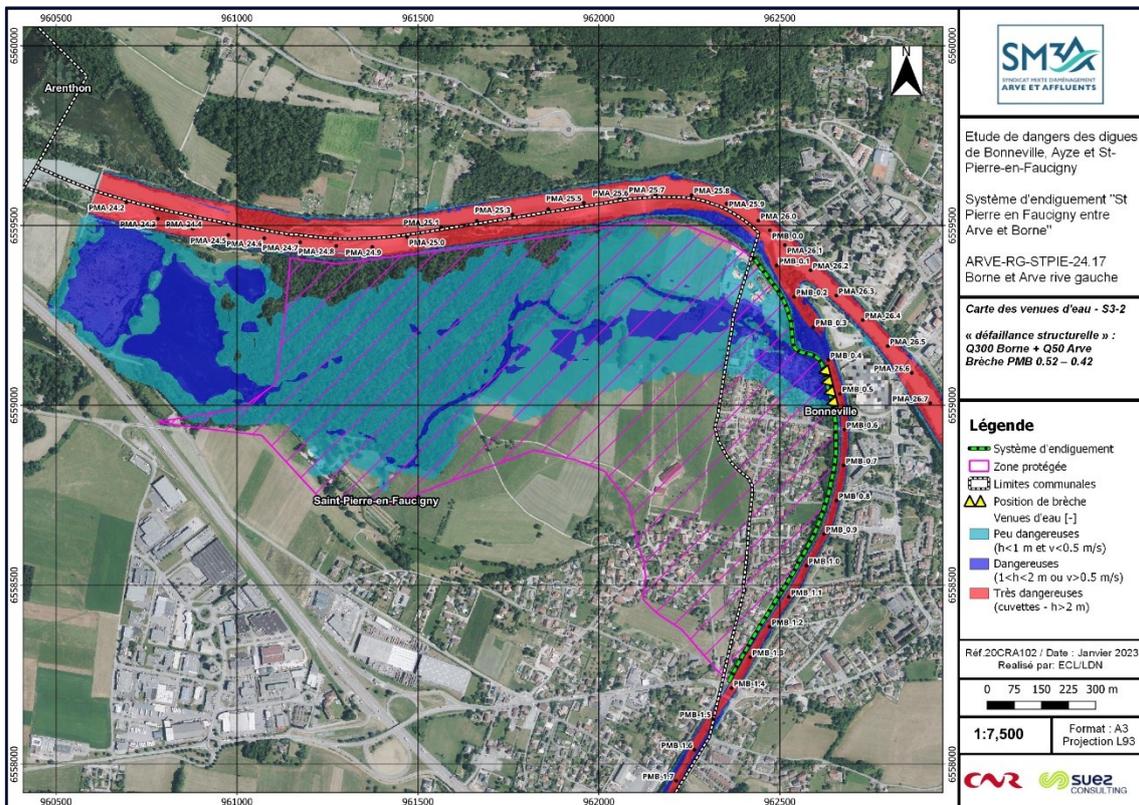


Figure 190 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des venues d'eau)

Ci-après les cartes des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement du S3.2 :

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

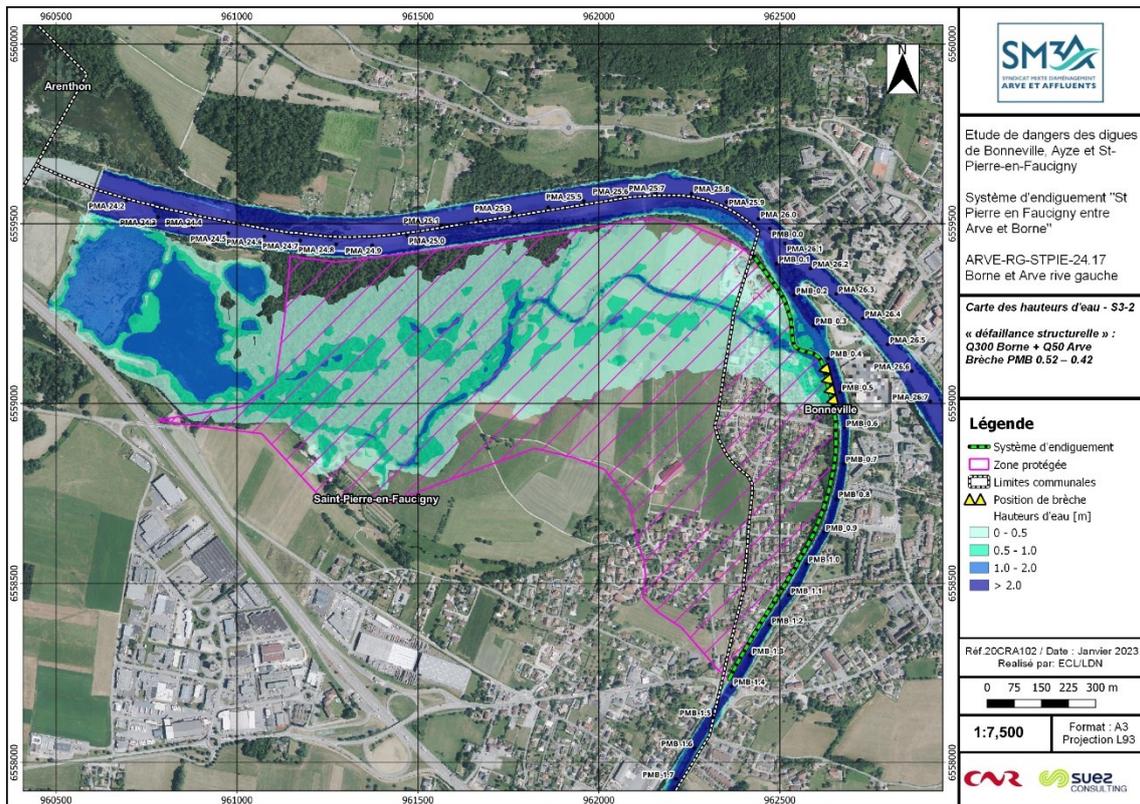


Figure 191 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des hauteurs d'eau)

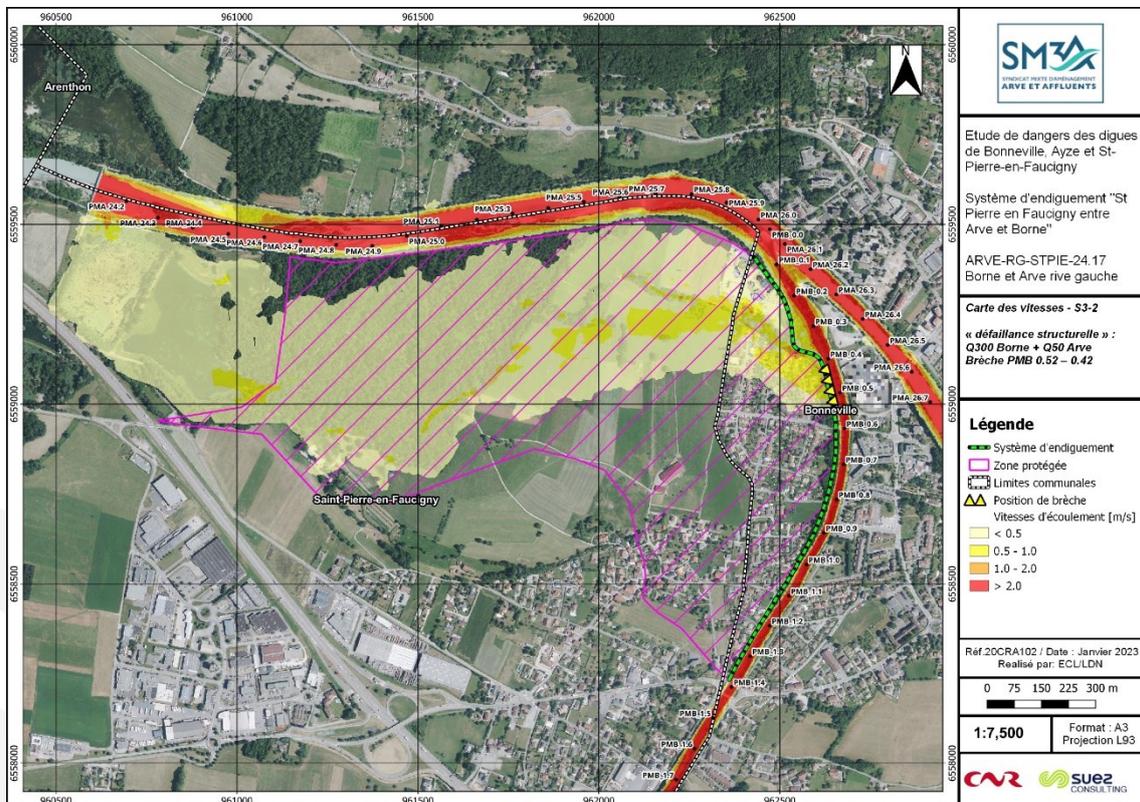


Figure 192 : Défaillance structurelle 3-2 du système d'endiguement (carte des vitesses d'écoulement)

Etude de dangers des digues de Bonneville, AYZE et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

Ci-dessous une description et une série de cartographies de la propagation de l'onde de submersion en fonction du temps (l'onde de submersion est représentée sous forme de hauteurs d'eau) :

- ✓ Environ 1 heures après l'ouverture de la brèche dans la digue de la STEP, une partie du quartier de Tucinge, située en aval du pont de Toisinges, est inondée. La moitié de la STEP de Bonneville est inondée.
- ✓ Environ 2 heures après l'ouverture de la brèche, l'inondation se propage en aval et inonde la forêt communale de Bonneville. Les étangs situés en amont de la passerelle du SM3A sont également submergés. A noter que ces derniers secteurs ne présentent pas d'enjeux particuliers. Enfin, le site du SM3A est inondé.
- ✓ Environ 3 heures après l'ouverture de la brèche, l'enveloppe inondée est sensiblement la même que à deux heures de l'ouverture. Néanmoins, les hauteurs d'eau augmentent au niveau des étangs.

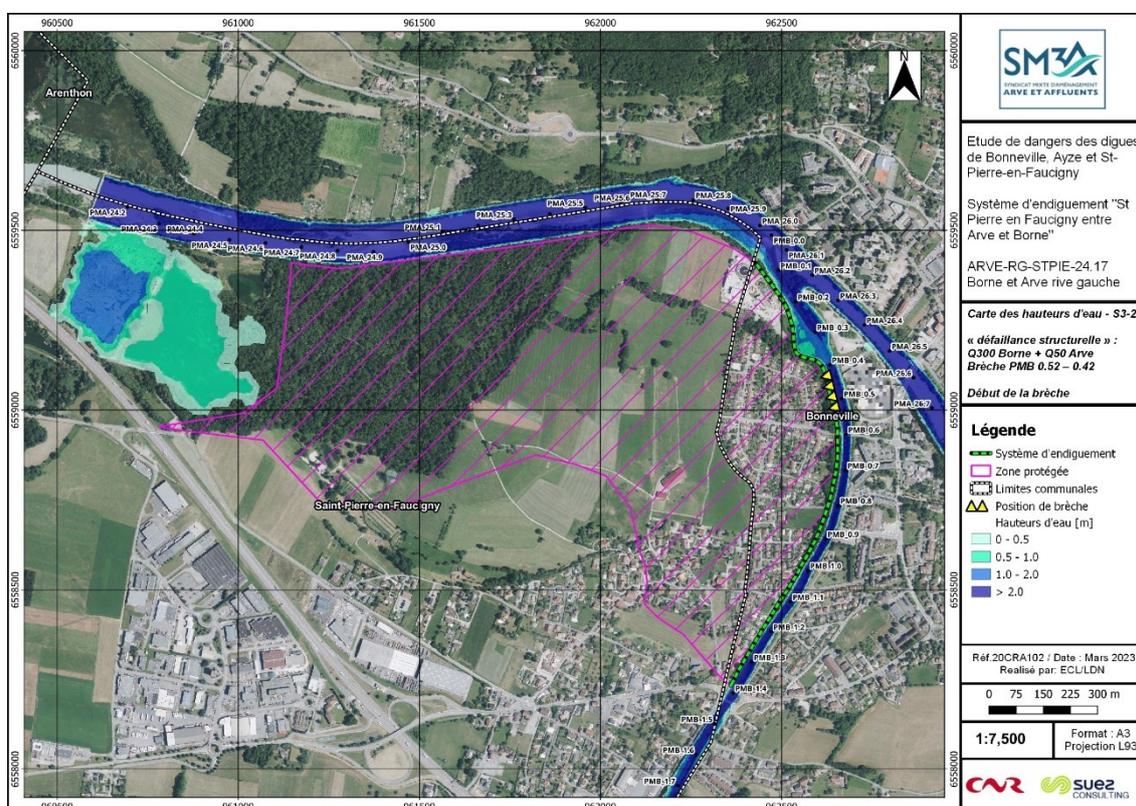


Figure 193 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche

Etude de dangers des digues de Bonneville, AYZE et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

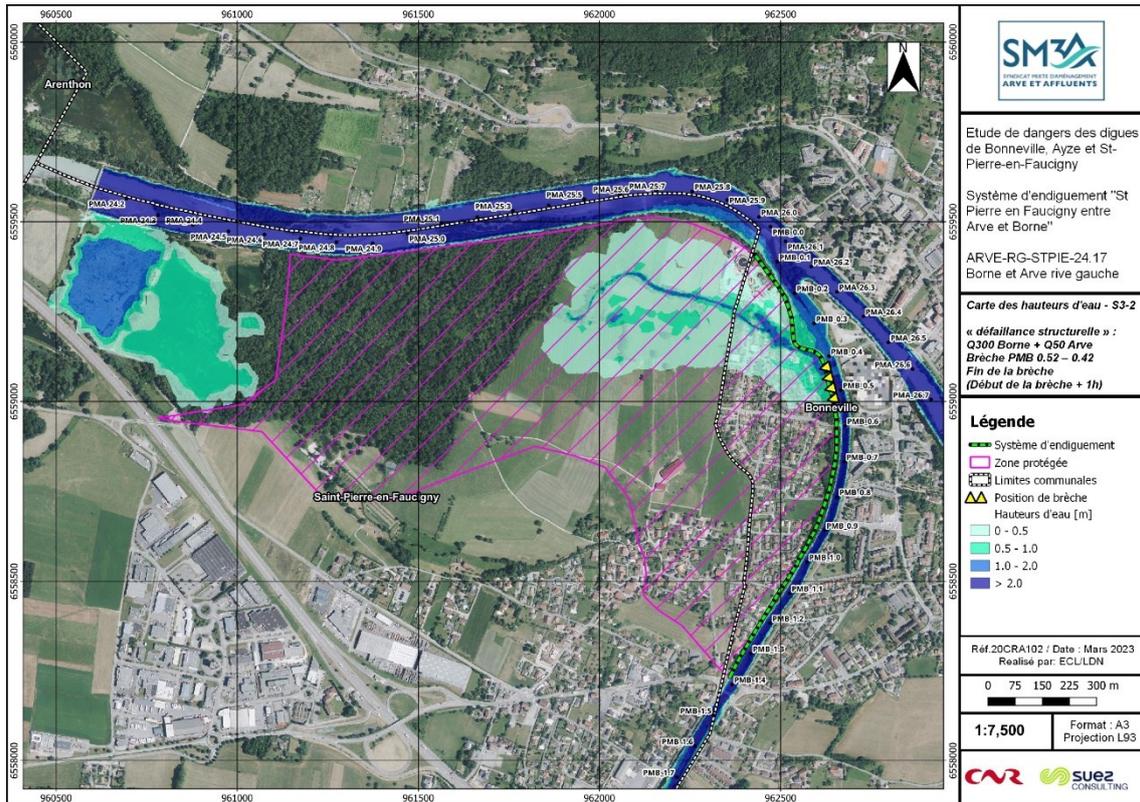


Figure 194 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 1h00

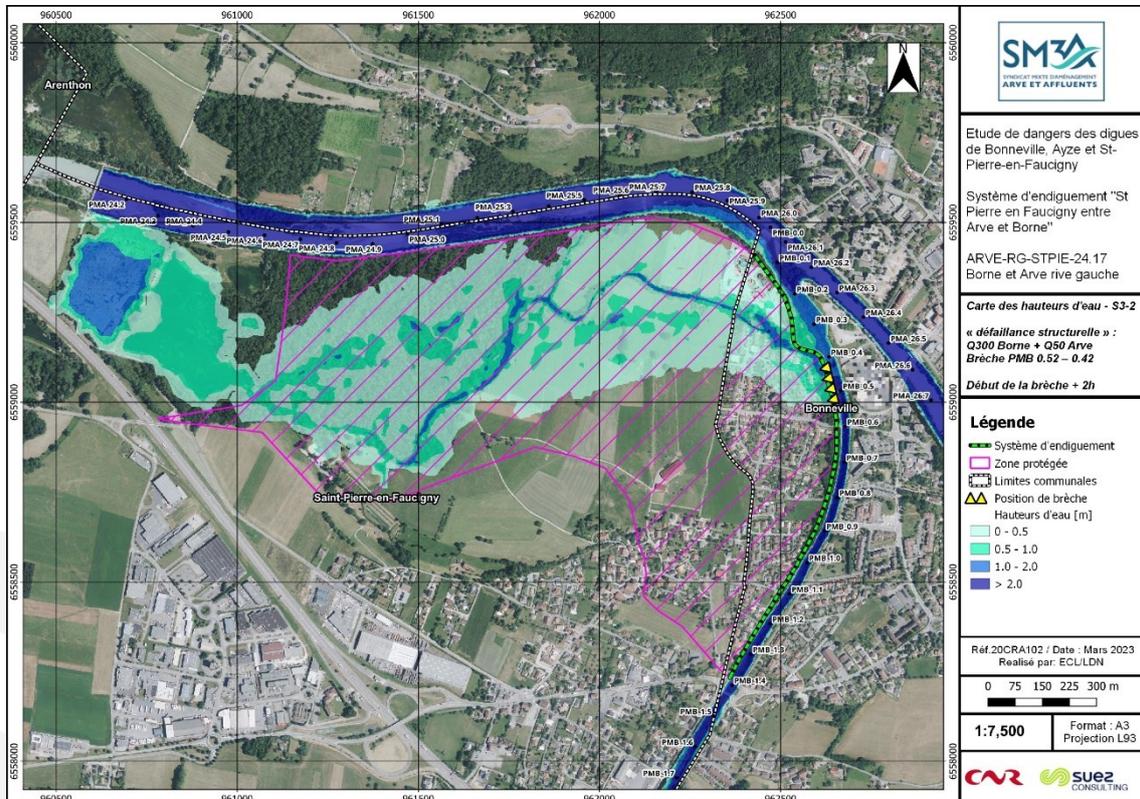


Figure 195 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 2h00

Etude de dangers des digues de Bonneville, Ayze et St-Pierre-en-Faucigny - Système d'endiguement " St Pierre en Faucigny entre Arve et Borne " - Arve-RG-STPIE-24.17 - BORNE RIVE GAUCHE

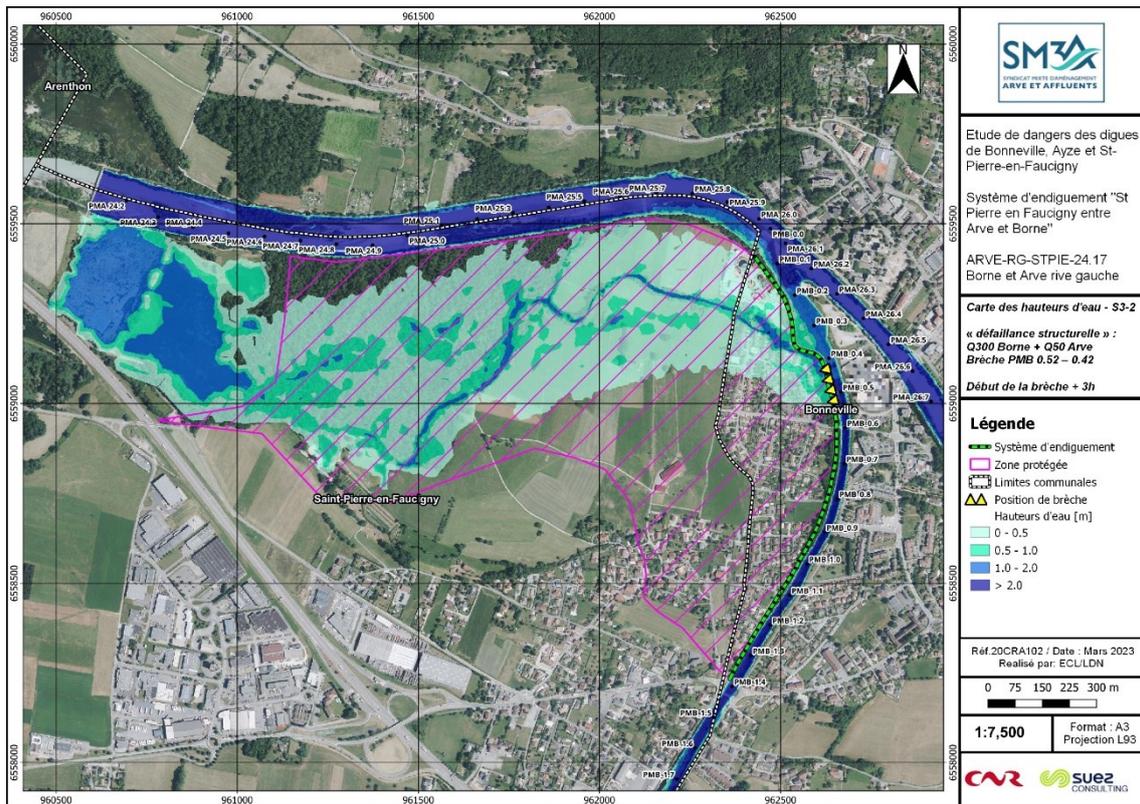


Figure 196 : Défaillance structurelle 3-2 – début de la brèche + 3h00

11. TABLE DES ANNEXES

- **ANNEXE 1** : Etude de danger « Saint-Pierre-en-Faucigny entre Arve et Borne » Note de vulnérabilité : enjeux et populations exposés. SEPIA CONSEIL. Juin 2022.

- **ANNEXE 2** : Atlas cartographique associé au chapitre 10 et données vectorielles

- **ANNEXE 3** : Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville – Etude d’Avant-Projet – Annexe 1 – Groupement Suez Consulting/CNR/Biotec, Juillet 2021.

- **ANNEXE 4** : 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. Juin 2021.

- **ANNEXE 5** : VTA Notice générale référencée DIGP 2020-633-00 et fiches synthèses d’Octobre 2020, CNR/Safege

- **ANNEXE 6** : Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville - Construction du modèle hydraulique – Notice I.001094.001 – DIGP 2021-834-01, CNR. Mai 2021

- **ANNEXE 7** : Confortement et reconstruction des digues du Borne à Bonneville. Dimensionnement géotechnique des ouvrages – G2PRO SUEZ Consulting. Mars 2023.

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**

