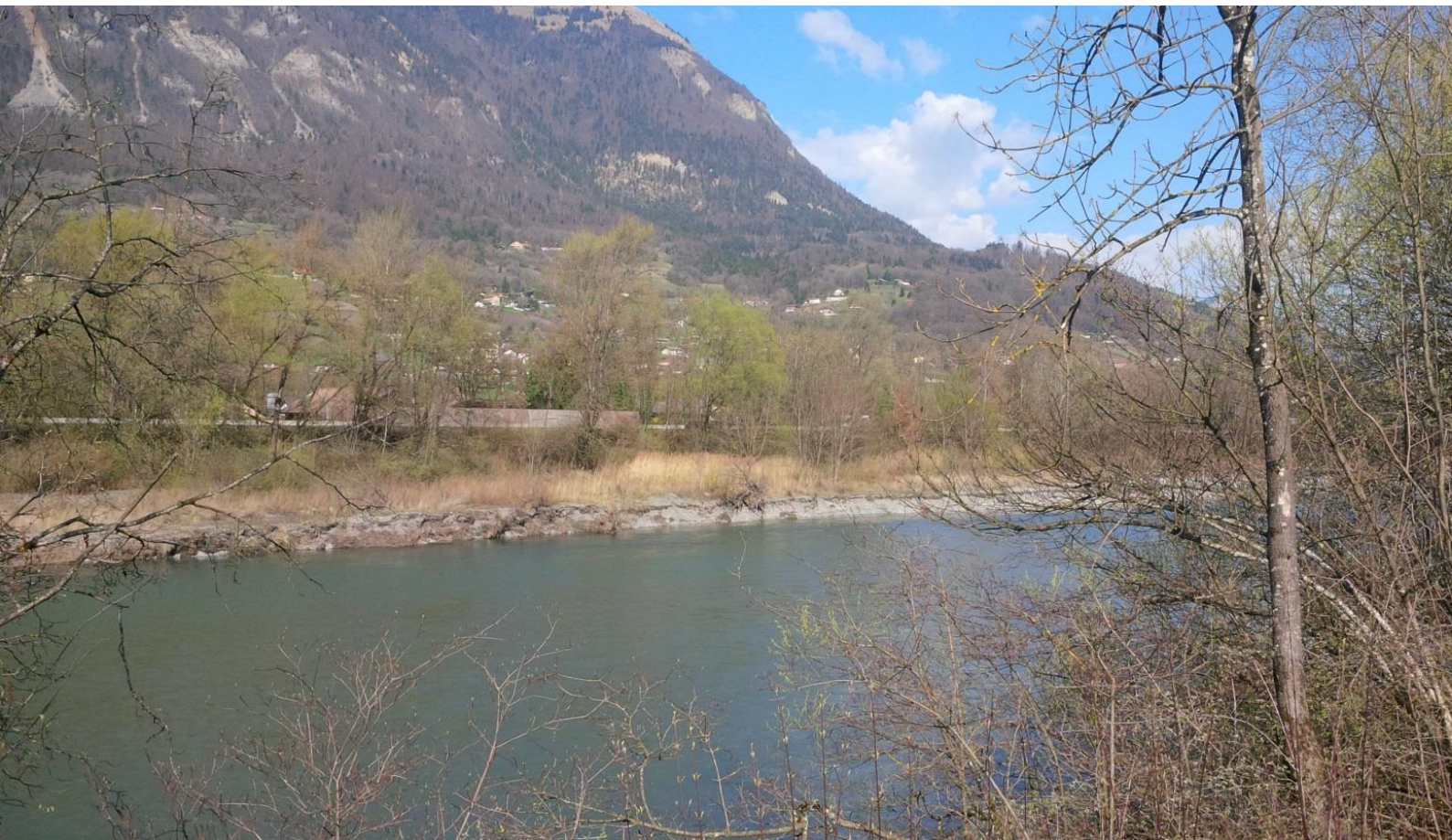




Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville

Tronçon Pont Royal RD1203 - Confluence Arve/Borne (PM0 à
1380 sur le Borne)

Mission d'ingénierie géotechnique G2 - Stade Avant-Projet




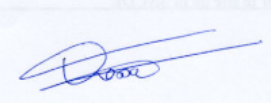
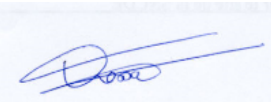
Confortement et reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville

Tronçon Pont Royal RD1203 - Confluence Arve/Borne (PM0 à 1380 sur le Borne)

Mission d'ingénierie géotechnique G2 - Stade Avant-Projet

DIGP 2021-772-00 Mai 2021

INTERLOCUTEUR CNR	Valentin DEVERNOIS - 06 70 40 60 11		
	CNR Ingénierie Entité MOE : DIGP-AH 2 rue André Bonin, 69316 Lyon cedex 04		
MAITRE D'OUVRAGE	S.M.3.A - Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents		
ADRESSE	300 Chemin des Prés Moulins - 74800 Saint pierre en Faucigny		
INTERLOCUTEUR	M RENOUE Emmanuel		
RÉFÉRENCE DU CONTRAT	Commande n°2019-PI-14		
NIVEAU DE CONFIDENTIALITÉ	<input type="checkbox"/> CONFIDENTIEL	<input type="checkbox"/> INTERNE	<input checked="" type="checkbox"/> PUBLIC

CONTRÔLE QUALITÉ	NOM	DATE	SIGNATURE
RÉALISÉ PAR	DEVERNOIS Valentin	27/05/2021	
VÉRIFIÉ PAR	TROSSAT Sophie	01/06/2021	
APPROUVÉ PAR	TROSSAT Sophie	01/06/2021	

HISTORIQUE DU DOCUMENT

INDICE	DATE	DÉSIGNATION DE LA RÉVISION
-00	27/05/2021	Version initiale

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	7
1.1 Contexte	7
1.2 Objectif de l'étude.....	7
1.3 Documents supports	7
2 NATURE DU PROJET	8
3 DONNEES GENERALES.....	8
3.1 Situation géographique	8
3.2 Historique de l'aménagement de la confluence Arve – Borne	10
3.2.1 L'origine	10
3.2.2 L'évolution historique du lit du Borne	11
3.3 Cadre géologique régional	12
3.4 Cadre hydrogéologique général	12
3.5 Données hydrauliques.....	13
3.5.1 Fonctionnement hydraulique général du Borne à sa confluence avec l'Arve	13
3.5.2 Auscultation et mesures	13
3.5.3 Niveaux caractéristiques du Borne	13
3.6 Données parasismiques	13
3.7 Données géophysiques et géotechniques.....	13
3.8 Aspects foncier et urbanisme.....	14
4 MOYENS MIS EN ŒUVRE – RECONNAISSANCES 2017	14
4.1 Reconnaissances géophysiques	14
4.2 Reconnaissances géotechniques.....	14
4.2.1 Sondages et essais in situ	15
4.2.2 Essais de laboratoire.....	16
5 CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES ISSUES DES RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUE DE 2017	16
5.1 Caractéristiques géotechniques issues des reconnaissances in situ	16
5.1.1 Digue de Bois Jolivet B	16
5.1.2 Digue de Queue du Borne	17
5.1.3 Digue de Toisinges	17
5.1.4 Digue de la STEP	18
5.2 Caractéristiques géotechniques issues des essais de laboratoire	19
5.2.1 Analyse des essais de cisaillement.....	19
5.2.2 Granulométrie – classification GTR	19
5.2.3 Caractéristiques physico-chimiques.....	20
5.3 Synthèse géologique des reconnaissances 2017	21
5.3.1 Rive droite.....	21
5.3.1.1 Profils	21
5.3.1.2 Paramètres géomécaniques	22
5.3.2 Rive gauche.....	23
5.3.2.1 Profils	23
5.3.2.2 Paramètres géomécaniques	25
6 EVALUATION DE LA STABILITE DES DIGUES EXISTANTES	26
6.1 Rappel du diagnostic de 2018	26
6.2 Etude de sensibilité – 2020	26
6.3 Conclusions et principes d'adaptation des ouvrages au sol – AVP	28
7 EBAUCHE DIMENSIONNELLE DES DIFFERENTS OUVRAGES – PRO.....	29
7.1 Ebauche structurelle	29
7.1.1 Hypothèses	29
7.1.2 Méthodologies.....	30
7.1.3 Seuil double rampe	31
7.1.4 Rive droite.....	32
7.1.4.1 RD – T1.....	32

7.1.4.2	RD – T2.....	34
7.1.4.3	RD – T3 & T4	36
7.1.4.4	RD – T5.....	38
7.1.4.5	RD – T6.....	39
7.1.4.6	RD – T7.....	40
7.1.5	<i>Rive gauche</i>	41
7.1.5.1	RG – T(-1) à T1 / Passage de la Véloroute sous le Pont Royal	41
7.1.5.2	RG – T2.....	48
7.1.5.3	RG – T3.....	50
7.1.5.4	RG – T4.....	51
7.1.5.5	RG – T5.....	53
7.1.5.6	RG – T6.....	55
7.1.5.7	RG – T7.....	56
7.1.5.8	RG – T8.....	58
7.1.5.9	RG – T9.....	59
7.2	Ebauche hydrogéologique.....	60
7.2.1	<i>Méthodologie</i>	60
7.2.1.1	Loi de Kozeny	60
7.2.1.2	Loi de Darcy.....	61
7.2.2	<i>Evaluation temps de percolation</i>	61
7.2.3	<i>Interprétation et conclusions</i>	63
7.3	Conclusions	65
8	RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES ADDITIONNELLES – PRO	66
ANNEXE	68
	Annexe 1 : Modélisation hydraulique – Lignes d'eau projet	68
	Annexe 2 : Profil 507RD – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 3 : Profil 373RD – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 4 : Profil 341RD – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 5 : Profil 1285RG – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 6 : Profil 774RG – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 7 : Profil 465RG – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 8 : Profil 426RG – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 9 : Profil P1RG – Confortement – Modélisation Talren	68
	Annexe 10 : Profil 115RG – Confortement – Modélisation Talren.....	68
	Annexe 11 : Cadastre	68
	Annexe 12 : Reconnaissances géotechnique 2020/21 – Localisation des sondages	68
	Annexe 13 : Etude de sensibilité – Modélisation Talren.....	68

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des endiguements concernés par l'étude.....	9
Figure 2 : Profils types historiques issus de l'étude historique Acthys Diffusion – Juillet 2017 – RD du Borne	10
Figure 3 : Profils types historiques issus de l'étude historique Acthys Diffusion – Décembre 2017 – RG du Borne	11
Figure 4 : Contexte géologique général – extrait de la carte géologique BRGM	12
Figure 5 : Localisation des sondages géotechniques réalisés en 2017 sur les digues objets de l'étude.	15
Figure 6 : Granulométries.	20
Figure 7 : Résultats des analyses physico-chimiques.	20
Figure 8 : Bois Jolivet B – PM 1300.	21
Figure 9 : Bois Jolivet B – PM 1200.	21
Figure 10 : Bois Jolivet B – PM 722.	21
Figure 11 : Queue du Borne – PM 400.	22
Figure 12 : Queue du Borne – PM 200.	22

Figure 13 : Toisings – PM 1300.	23
Figure 14 : Toisings – PM 1200.	23
Figure 15 : Toisings – PM 1076.	23
Figure 16 : Toisings – PM 774.	23
Figure 17 : STEP – PM 400.	24
Figure 18 : STEP – PM 300.	24
Figure 19 : STEP – PM 145.	24
Figure 20 : Dimensions des épis.	31
Figure 21 : Installation du mur – Schéma de principe.	33
Figure 22 : Mur préfabriqué – Modèle LT H120-240.	33
Figure 23 : Mur préfabriqué – Hypothèses de calcul.	33
Figure 24 : RD-T1 – Confortement – Coupe type.	34
Figure 25 : RD-T2 – Confortement – Coupe type.	36
Figure 26 : Résultats des expérimentations de Burenkova (1993, à gauche) et Li&Fannin (2008, à droite).	37
Figure 27 : RD-T3 & T4 – Confortement – Coupe type.	38
Figure 28 : RD-T5 – Confortement – Coupe type.	39
Figure 29 : RD-T6 – Confortement – Coupe type.	40
Figure 30 : Rampe amont – Vue en plan.	41
Figure 31 : Rampe amont – Elévation.	41
Figure 32 : Vue en élévation du mur existant et du niveau fini projet de la piste cyclable.	43
Figure 33 : RG-T(-1) – P1 à P7 – Coupe type (ici P4).	44
Figure 34 : RG-T(-1) – P7 à P10 – Coupe type (ici P7).	44
Figure 35 : Zone située entre les deux ponts – Vue en plan.	45
Figure 36 : Zone située entre les deux ponts – Elévation.	45
Figure 37 : RG-T0 – P11 à P13 – Coupe type (ici P11).	46
Figure 38 : Rampe aval – Vue en plan.	47
Figure 39 : Rampe aval – Elévation.	47
Figure 40 : RG-T1 – Coupe type (ici P18).	48
Figure 41 : RG-T2 – Confortement solution 1 – Coupe type.	50
Figure 42 : RG-T3 – Confortement – Coupe type.	50
Figure 43 : RG-T4 – Confortement – Coupe type.	52
Figure 44 : RG-T5 – Confortement – Coupe type.	54
Figure 45 : RG-T6 – Confortement – Coupe type.	56
Figure 46 : Profil en long du Borne conforté – Tronçon aval au PM400.	56
Figure 47 : RG-T7 – Confortement – Coupe type.	58
Figure 48 : RG-T8 – Confortement – Coupe type.	59
Figure 49 : RG-T8 – Confortement – Coupe type.	60
Figure 50 : Ligne de saturation pour une digue homogène sans drainage aval.	61
Figure 51 : Limnigrammes pour Q ₁₀₀	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Contenu des reconnaissances géophysiques 2017.	14
Tableau 2 : Contenu des reconnaissances géotechniques 2017.	15
Tableau 3 : Résultats des essais de cisaillement.	19
Tableau 4 : Résultats des essais d'identification.	19
Tableau 5 : Rive droite – Paramètres géomécaniques.....	22
Tableau 6 : Rive droite – Paramètres géomécaniques.....	25
Tableau 7 : Stabilité actuelle – Conclusion générale.	26
Tableau 7 : Paramètres géomécaniques – Etude de sensibilité.....	27
Tableau 9 : Etude de sensibilité – Approche 1 – Résultats.	28
Tableau 9 : Etude de sensibilité – Approche 2 – Résultats.	28
Tableau 8 : Découpage en tronçons homogènes – RD.....	29
Tableau 9 : Découpage en tronçons homogènes – RG.....	29
Tableau 10 : Données d'entrée pour le dimensionnement des enrochements.	30
Tableau 11 : RD-T1 – Confortement – Effet des épis.....	34
Tableau 12 : RD-T2 – Confortement – Effet des épis.....	35
Tableau 13 : Résultats Talren – Profil 507RD.	37
Tableau 14 : Résultats Talren – Profil 373RD.	39
Tableau 15 : Résultats Talren – Profil 341RD.	40
Tableau 16 : Résultats Talren – Profil 1285RG.	49
Tableau 17 : RG-T2 – Confortement – Effet des épis.....	49
Tableau 18 : Résultats Talren – Profil 774RG.	51
Tableau 19 : RG-T4 – Confortement – Effet des épis.....	52
Tableau 20 : Résultats Talren – Profil 465RG.	53
Tableau 21 : RG-T5 – Confortement – Effet des épis.....	54
Tableau 22 : Résultats Talren – Profil 426RG.	55
Tableau 23 : Résultats Talren – Profil P1RG.....	57
Tableau 24 : Résultats Talren – Profil 145RG.	58
Tableau 25 : Résultats Talren – Profil 115 RG.	59
Tableau 26 : Evaluation des temps de percolation critiques – RD.	62
Tableau 27 : Evaluation des temps de percolation critiques – RG.	62
Tableau 28 : Comparaison temps de percolation / crue – RD.	64
Tableau 29 : Comparaison temps de percolation / crue – RG.....	64
Tableau 30 : Reconnaissances géotechniques – Phase terrain – Programme prévisionnel.	67
Tableau 31 : Reconnaissances géotechniques – Phase laboratoire – Programme prévisionnel.	67

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La CNR (Compagnie Nationale du Rhône) a procédé à une 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 et réutilisées présentement dans le cadre de l'Avant-Projet de confortement et de reconstruction des digues du Borne sur la commune de Bonneville en aval du Pont de la RD1203.

1.2 Objectif de l'étude

Il s'agit d'une mission géotechnique normalisée de type G2 – AVP au sens de la norme NF P 94-500 de Novembre 2013.

Ce document doit permettre de définir :

- Le contexte géologique et géotechnique global sommaire à l'échelle du projet,
- Les principales caractéristiques géomécaniques des différents sols à retenir pour la conception du projet,
- L'analyse des risques potentiels (stabilité des ouvrages existants, sujétions particulières liées au sol en place),
- Les principes d'adaptation des ouvrages aux différents terrains rencontrés,
- Une ébauche dimensionnelle de certains ouvrages (soutènements, fondations, ...),
- Eventuellement la définition d'un programme de reconnaissances additionnelles permettant la réalisation des phases futures (PRO notamment).

1.3 Documents supports

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

- Base de données INFOTERRE,
- 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
- Etude historique et fiches d'information historique par système d'endiguement de Décembre 2017, Acthys Diffusion
- Diagnostics de stabilité référencés DI ECS 2017-531-01 et DI ECS 2017-533-01 de Mai 2018, CNR
- 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 – HYDROGEOTECHNIQUE
- 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
- RD1203 – Aménagement du carrefour du Pont du Borne – Coffrage des murs rive droite et gauche – plan n°4098-CBR-PL-6104-0, Juillet 2013.

- RD1203 – Aménagement du carrefour du Pont du Borne – Mur de soutènement en enrochements – Note de calcul n°1303-GUE-PL-2003-0, Juillet 2013.
- 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.

2 NATURE DU PROJET

Pour mémoire, le repérage est noté en PM (Point Métrique), le PM 0 étant la confluence entre le Borne et l’Arve, emplacement fourni par le Maître d’Ouvrage. Les PM sont comptés positivement depuis la confluence et en direction de l’amont. Les cotes précisées dans le présent document sont en NGF IGN 69.

Suite à la fourniture des Etudes de Dangers sur les digues de l’Arve et du Borne, le MOA a confié une étude de niveau Avant-Projet visant à définir des possibilités d’aménagement des digues RD et RG du Borne entre les PM 0 et 4200 afin de protéger les enjeux exposés pour la crue d’occurrence centennale (Q_{100}). Un AVP de confortement a alors été fourni en Décembre 2018.

Le projet, qui s’appuie sur cet AVP préalable et les données associées, 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 Q_{100} 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 tel que proposé dans l’annexe 1 de la notice d’AVP DIGP 2021-766.

Ce document, qui fait partie intégrante de la notice globale d’AVP, propose une ébauche dimensionnelle de ces profils types de confortement.

3 DONNEES GENERALES

3.1 Situation géographique

Les digues faisant l’objet de la présente étude sont situées exclusivement sur la commune de Bonneville (74), en rive droite et rive gauche du Borne, entre sa confluence avec l’Arve en aval (PM 0) et le Pont Royal de la RD1203 (PM 1380) en amont.

Les systèmes d’endiguement étudiés sont les suivants (d’amont en aval) :

- Rive droite :
 - Bois Jolivet B (BORNE-RD-BONNE-0.61) : Environ 800 m depuis le pont de la RD 1203 (pont Royal) jusqu’au pont de Toisinges ;
 - Queue du Borne (BORNE-RD-BONNE-0.23) : Environ 400 m depuis le pont de Toisinges jusqu’à la confluence avec l’Arve
- Rive gauche :
 - Toisinges (BORNE-RG-BONNE-0.05) : Environ 800 m depuis le pont de la RD 1203 (pont Royal) jusqu’au pont de Toisinges ;
 - STEP (BORNE-RG-BONNE-0.61) : Environ 600 m depuis le pont de Toisinges jusqu’à la confluence avec l’Arve.

La figure suivante localise ces systèmes d’endiguement.

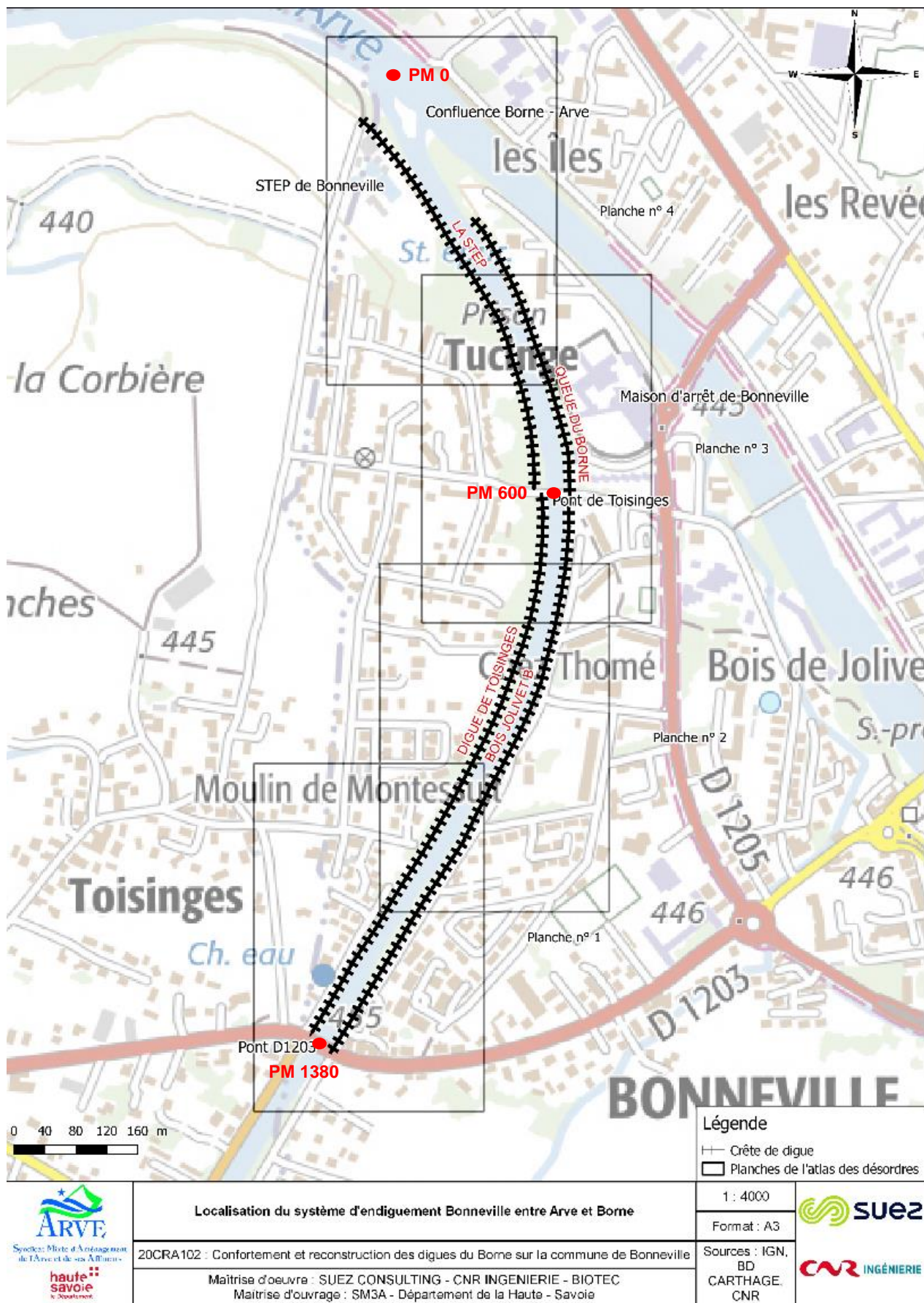


Figure 1 : Localisation des endiguements concernés par l'étude.

3.2 Historique de l'aménagement de la confluence Arve – Borne

3.2.1 L'origine

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

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

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

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

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

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

Sont rappelés ci-après pour mémoire les différentes évolutions des endiguements en bordure du Borne situés en aval du pont de la RD 1203.

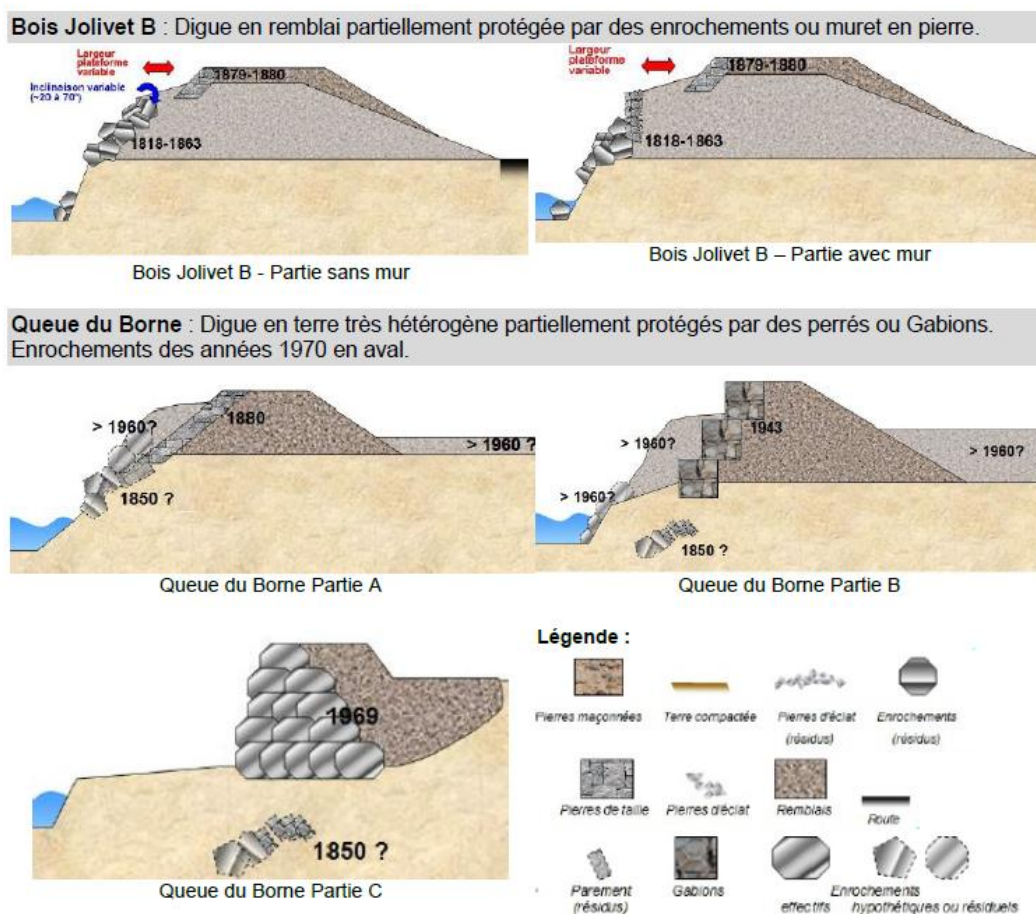
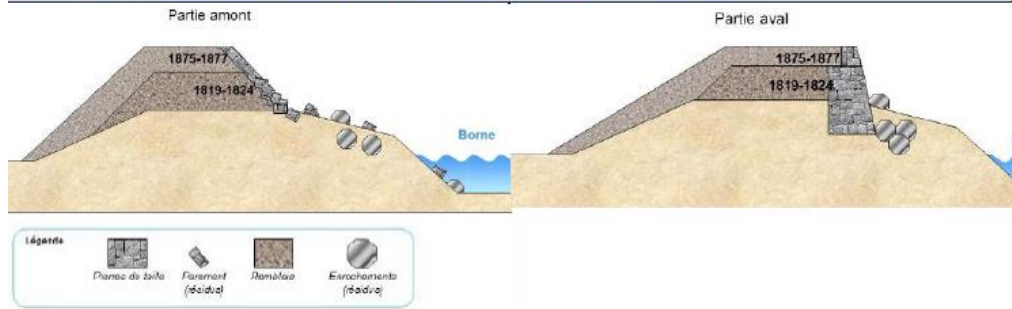


Figure 2 : Profils types historiques issus de l'étude historique Acthys Diffusion – Juillet 2017 – RD du Borne

Toisinges: Digue en remblai protégée par un perré ou mur en pierre de taille. Reprise successives. Pied de digue protégé par des enrochements épars. Digue ancienne (XIXème).



STEP: Digue en remblai protégée par un perré ou mur en pierre de taille. Reprise successives. Digue ancienne (XIXème). Pied de digue protégé par des enrochements épars.

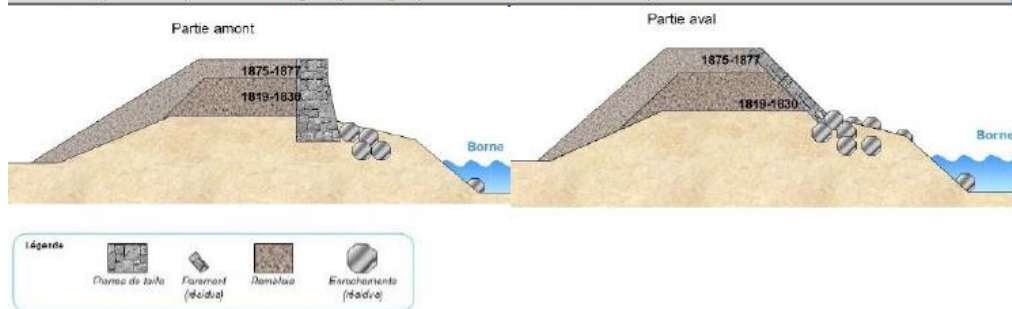


Figure 3 : Profils types historiques issus de l'étude historique Acthys Diffusion – Décembre 2017 – RG du Borne

3.2.2 L'évolution historique du lit du Borne

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.

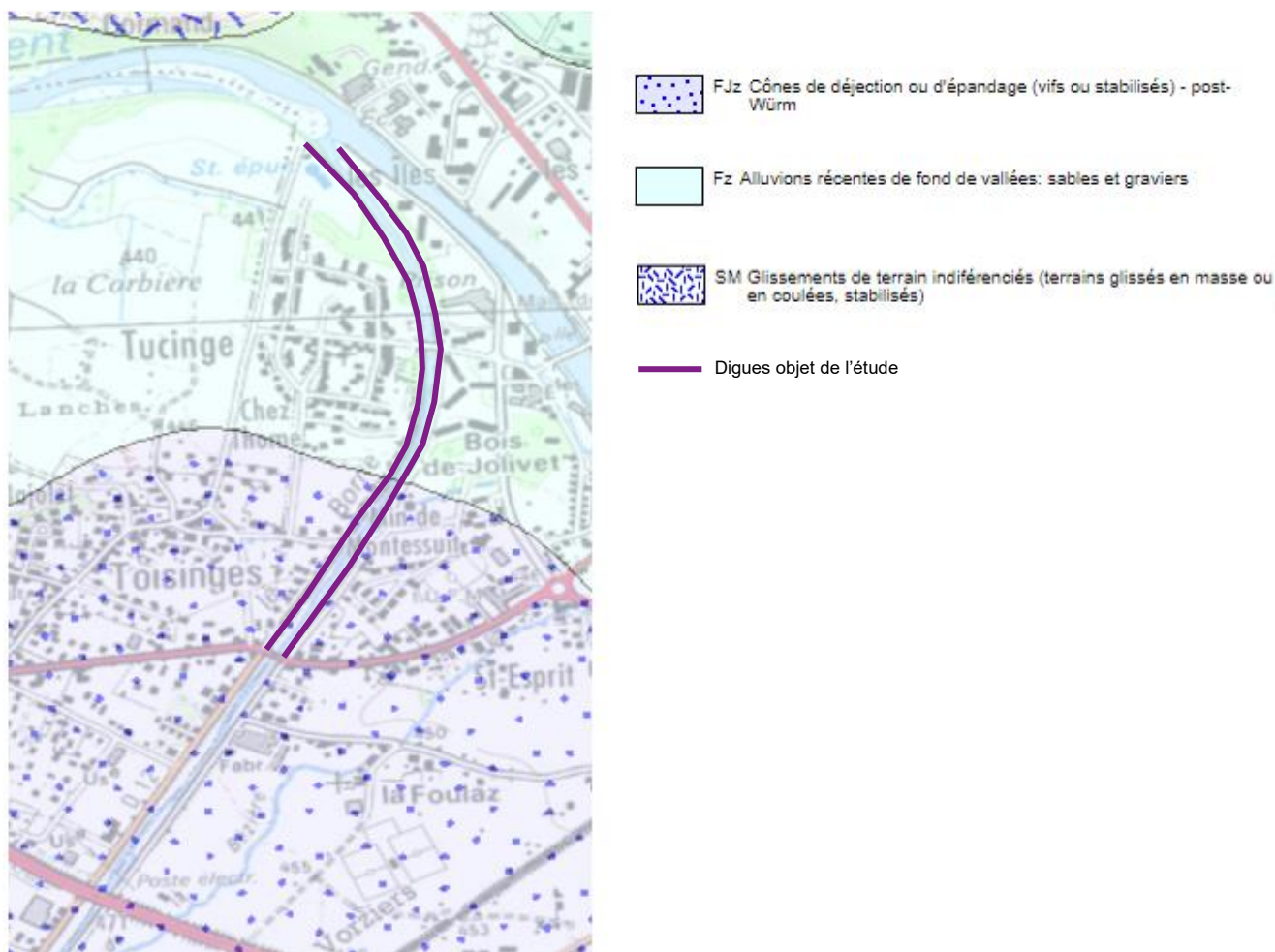
A ce jour et d'après les informations recueillies, le phénomène d'incision semble plus ou moins stabilisé.

3.3 Cadre géologique régional

La zone d'étude est inscrite d'une manière générale dans une zone d'épandage torrentielle post glaciaire (Würm) à la confluence des rivières de l'Arve et du Borne, dans la basse vallée Bonnevilleoise.

D'après les éléments en notre possession (banque de données du sous-sol BRGM), la zone de confluence s'inscrit, sous d'éventuels limons de recouvrements et/ou remblais d'aménagement, au sein des alluvions Quaternaires récentes, sablo graveleuses en tête puis franchement graveleuses plus en profondeur, au sein desquels viennent s'intercaler de manière aléatoire des lentilles sablo- limoneuses, voir argileuses.

Le substratum, taillé à l'emporte-pièce, se trouve plus en profondeur, et n'intéresse pas la zone d'étude.



3.4 Cadre hydrogéologique général

Les digues du Borne objet de l'étude ne sont pas équipées de piézomètres permettant de situer le niveau de nappe. De plus, le niveau de nappe n'a pas été identifié lors des reconnaissances géotechniques de 2017 :

- Soit parce qu'elle n'a pas été rencontrée lors des forages ;
- Soit parce que la technique de forage utilisée (forage avec emploi d'eau) a rendu impossible la distinction du passage dans la nappe.

Le cadre hydrogéologique de la zone d'étude est donc inconnu.

3.5 Données hydrauliques

3.5.1 Fonctionnement hydraulique général du Borne à sa confluence avec l'Arve

La rivière du Borne présente un régime d'écoulements torrentiels (idem pour l'Arve). La particularité de cette rivière est la vitesse des écoulements en crue et le transport de sédiments.

La charge de fond est très conséquente pour le Borne même si elle l'est davantage pour l'Arve qui reçoit juste en amont de la confluence les écoulements et la charge solide du Giffre.

Les matériaux transportés sont du type galets ou gros graviers avec apports de matériaux sableux sur les bancs, sur l'Arve notamment.

Du fait de ce transport solide intense, des fortes variations du lit peuvent survenir en crue.

Le Borne semble présenter une charge solide plus modérée que sur l'Arve. Les plages de dépôt préférentielles semblent être localisées au sortir des gorges du Borne et à la confluence avec l'Arve. Le barrage de Beffay, géré par EDF, joue probablement dans l'évaluation modérée de la charge solide.

3.5.2 Auscultation et mesures

Le secteur d'étude ne présente aucun dispositif de mesure de type limnimètre ou échelle limnimétrique permettant de mesurer le niveau d'eau du Borne.

Aussi, les digues du secteur d'étude ainsi que la plaine adjacente ne sont pas équipées de piézomètres permettant de déterminer le niveau de nappe en fonction des état hydraulique (étiage, crue, etc.) du Borne et de l'Arve.

Les conditions hydrauliques exposées ci-après et utilisées pour l'établissement des paragraphes § 5.3 à 7 sont issues de modélisations hydrauliques et de l'expérience géotechnique CNR concernant le domaine des endiguements.

3.5.3 Niveaux caractéristiques du Borne

Les niveaux caractéristiques du Borne ont été déterminés à partir d'une modélisation hydraulique 2D intégrant l'Arve et le Borne afin notamment de prendre en compte l'influence de chacun de ces deux cours d'eau au niveau du point singulier de la confluence Arve/Borne.

Les hypothèses considérées pour construire le modèle hydraulique ainsi que la présentation de ce modèle et les résultats obtenus sont présentés dans la notice hydraulique.

Le fichier Excel donnant les lignes d'eau modélisées utilisées pour l'ébauche dimensionnelle des profils de digue confortés est donné en Annexe 1.

3.6 Données parasismiques

Le secteur de Bonneville est classé en zone à sismicité 4 (aléa moyen) selon le nouveau zonage sismique de mai 2011 (article D.563-8-1 du code de l'environnement).

A ce stade, l'étude de sensibilité des ouvrages actuels et confortés au risque sismique n'a pas été réalisé. Il sera à évaluer au stade PRO sur demande du Client.

3.7 Données géophysiques et géotechniques

Cet aspect est détaillé plus longuement dans les paragraphes § 4 et 5 pour aboutir sur une synthèse géologique sous forme de profils types actuels.

3.8 Aspects foncier et urbanisme

Ces aspects, qui impactent les solutions de confortement envisageables, ne sont pas rappelés ici et sont détaillés dans la notice globale d'AVP DIGP 2021-766 et dans son annexe 1 qui est le document de définition des tronçons homogènes de confortement.

4 MOYENS MIS EN ŒUVRE – RECONNAISSANCES 2017

La suite de ce document exploite des données techniques issues de reconnaissances réalisées en 2017.

4.1 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 1 : 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.

4.2 Reconnaissances géotechniques

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

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

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	2
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

Tableau 2 : Contenu des reconnaissances géotechniques 2017.

La figure suivantes 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 5 : Localisation des sondages géotechniques réalisés en 2017 sur les digues objets de l'étude.

Les paragraphes suivants définissent les objectifs associés à chaque type de reconnaissance réalisé en 2017.

4.2.1 Sondages et essais in situ

- Les sondages carottés ont été exécutés selon la norme NF EN ISO 22475-1. Les carottages ont été réalisés avec emploi d'eau claire et avec une machine de type Hydrofore 750. Le diamètre du carottier employé est de 116 mm (diamètre carotte 90 mm) et les échantillons intacts ont été conditionnés sous gaine PVC étanche.

Les sondages carottés n'ont pas été utilisés pour la réalisation d'essais de perméabilité et n'ont pas été équipés en piézomètres, ils ont donc été rebouchés à l'issue de la prestation.

- Les sondages au pénétromètre dynamique ont été exécutés selon la norme NF EN ISO 22476-2. Ils ont été réalisés avec l'emploi d'une machine de type Hydrofore 200.

Ils avaient pour but de caractériser la compacité des sols rencontrés via la mesure de la résistance de pointe q_d et d'en déduire une stratigraphie par comparaison avec les autres reconnaissances.

- Les sondages à la tarière hélicoïdale manuelle avaient pour but d'observer la couche superficielle des digues dans des zones difficiles d'accès empêchant la mobilisation de machines de forage lourdes.

4.2.2 Essais de laboratoire

Compte tenu de la nature des terrains rencontrés, les essais suivants ont été réalisés :

- Des analyses d'identification contenant la classification GTR (NF P 11-300), la teneur en eau (NF P 94-050), la valeur au bleu (NF P 94-068), la granulométrie (NF P 94-056) et la sédimentométrie si nécessaire (NF P 94-057) de manière à caractériser le type de matériau rencontré.
- Des essais de cisaillement à la boîte (NF P 94-070) de manière à évaluer les paramètres géomécaniques des matériaux rencontrés.
- Des analyses physico-chimiques des échantillons de sols de manière à évaluer l'état de pollution des sols rencontrés.

5 CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES ISSUES DES RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUE DE 2017

5.1 Caractéristiques géotechniques issues 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).

5.1.1 Digue de Bois Jolivet B

Reconnaissances géophysiques :

Il est possible d'en ressortir les conclusions suivantes :

- La présence d'enrochements côté rivière qui se répartissent sur le talus d'une façon assez hétérogènes, discontinus, recouverts de terrain de couverture ponctuellement épais et sous un couvert végétal assez dense.
- Le centre de la digue au niveau des sondages et du profil en long montre une succession en deux ou trois horizons granulométriques.

On distingue :

- Des PM 1380 (Pont Royal) à 1230, une répartition globalement en deux horizons.
- Des PM 1230 à 1110, une répartition que l'on peut définir en trois horizons. Le superficiel composé de graves limono-sableuses est constant mais on retient la présence d'une surépaisseur résistive (teintes oranges) bien marquée entre PM. On se situe sous la nappe d'accompagnement de la rivière mais les matériaux restent très graveleux éventuellement des galets propres ou avec très peu de fines. En profondeur, on retrouve une baisse des résistivités correspondant à des matériaux plus limoneux.
- Entre les PM 1110 et 1050, un retour à une répartition en deux couches.

- Des PM 1050 à 950, des variations de résistivités horizontales et verticales importantes liées probablement à des blocs ou des ouvrages en profondeur et à l'influence de la maison encadrée (ancien moulin).
- Des PM 950 à 870 : on retrouve cette structure que nous qualifions en trois horizons.
- Du PM 870 et jusqu'à la fin du profil (pont de Toisinges), on retrouve la répartition globalement similaire du début avec deux horizons distincts.

Sondages carottés :

Le log géologique issu du sondage carotté fait ressortir la présence d'un matériau de type grave sablo-limoneuse grise sur l'ensemble du forage (6 m / TA) soit sur l'ensemble du corps de digue et sa fondation.

Le taux de récupération a toujours été supérieur ou égal à 95% hormis pour la couche superficielle (0 – 1.6 m / TA) ou le taux était de 50%. D'après les photos cela correspondrait à un matériau plus grossier et présentant moins de matrice fine que sur le reste du carottage.

Sondages pénétrométriques :

Le sondage PD320 a fait ressortir la présence de terrains compacts ($q_d > 12$ MPa) jusqu'au refus à 2,8 m / TA.

Les sondages PD561 et PD748 ont fait ressortir la présence de terrains compacts ($8 \text{ MPa} < q_d < 15 \text{ MPa}$) en tête respectivement jusqu'à 0,6 m et 0,8 m puis moyennement compacts ($q_d \approx 5,2 \text{ MPa}$) jusqu'à 1,4 m et enfin très compact ($q_d > 20 \text{ MPa}$) jusqu'au refus respectivement à 2,4 m et 2,2 m.

5.1.2 Digue de Queue du Borne

Reconnaitances géophysiques :

Des PM 590 (pont de Toisinges) à 435, la structure de la digue est conforme à la répartition type des horizons tels qu'ils sont également décrits dans le système d'endiguement de Bois Jolivet B, c'est-à-dire un horizon superficiel résistif (teintes rouges, graves sablo-limoneuses) sur des alluvions sous nappe, moins résistives (teintes oranges à bleues) et composées de sables, graves et une fraction fine limoneuse à priori plus abondante.

Des PM 435 à 235, cette succession décrite est surmontée d'un placage de 2m environ d'épaisseur et caractérisée par des résistivités nettement plus faibles et correspondant à des matériaux plus sablo-limoneux. On se situe au-delà de l'enceinte de la prison et la digue longe un parking. Morphologiquement, la digue est différente sur cette section et apparait bien délimitée topographiquement. Il est possible que cet horizon superficiel corresponde à des dépôts récents de rehausse de digue. Au-delà de ce placage superficiel (teintes bleues) on retrouve en dessous la structure type en deux couches distinctes.

La fin de Queue de Borne est marquée par deux ensembles plus légèrement résistifs sans en connaître la cause.

Sondage carotté :

Le log géologique issu du sondage carotté fait ressortir la présence d'un matériau de type grave sablo-limoneuse à limono-sableuse gris brun à gris blanc sur l'ensemble du forage (6.10 m / TA).

Le taux de récupération a toujours été supérieur ou égal à 90%.

5.1.3 Digue de Toisinges

Reconnaitances 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.

Sondage carotté :

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%.

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.

5.1.4 Digue de la STEP

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.

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%.

5.2 Caractéristiques géotechniques issues des essais de laboratoire

5.2.1 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.

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

Tableau 3 : Résultats des essais de cisaillement.

5.2.2 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.

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

Tableau 4 : Résultats des essais d'identification.

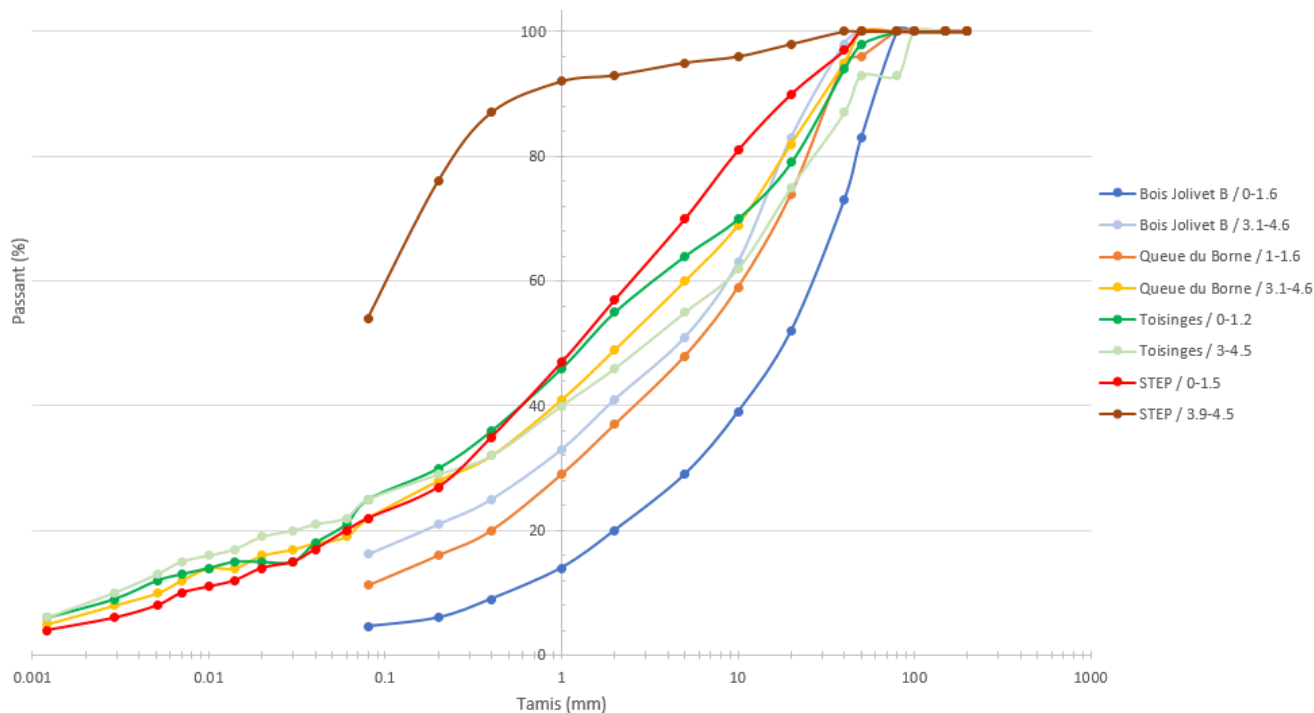


Figure 6 : Granulométries.

5.2.3 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.

Échantillon	Seuils d'admissibilité en I.S.D (en mg/kg)			QueueBorne – SC253		Toisings – 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
	Profondeur d'analyse (m/TA)								
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	26800	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 ⁴	<51	<50	<51	<50	55	<50
Chlorure	800 ⁶	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 ^{7a}	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
Mercure	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 **	I.S.D.I **	I.S.D.I	I.S.D.I	I.S.D.I	I.S.D.I

Figure 7 : Résultats des analyses physico-chimiques.

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

5.3 Synthèse géologique des reconnaissances 2017

Ce paragraphe présente les profils type actuels de digue établis sur la base des éléments présentés ci-avant.

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 utilisés pour cette étude.

5.3.1 Rive droite

5.3.1.1 Profils

- Bois Jolivet B :

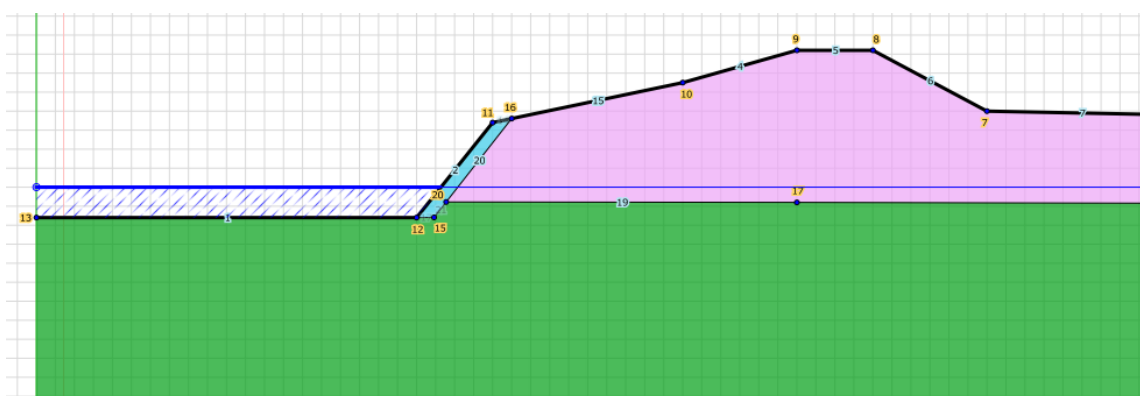


Figure 8 : Bois Jolivet B – PM 1300.

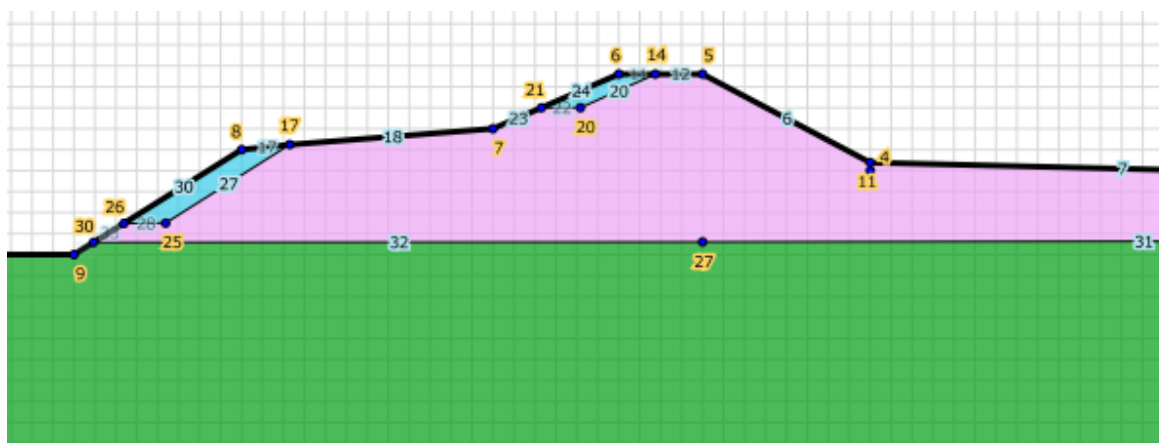


Figure 9 : Bois Jolivet B – PM 1200.

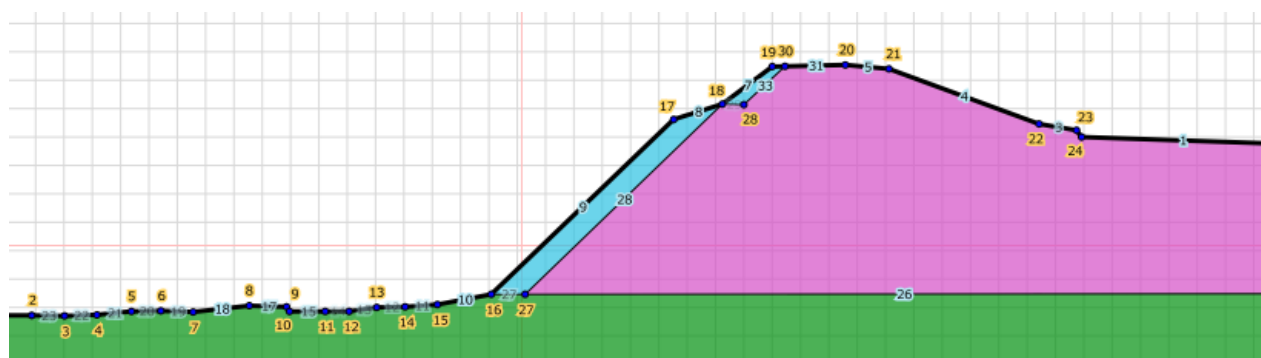


Figure 10 : Bois Jolivet B – PM 722.

- Queue du Borne :

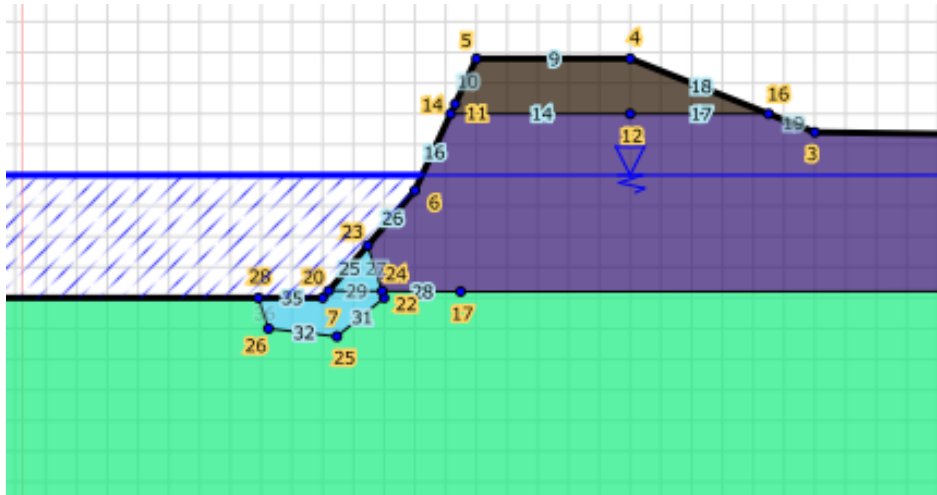


Figure 11 : Queue du Borne – PM 400.

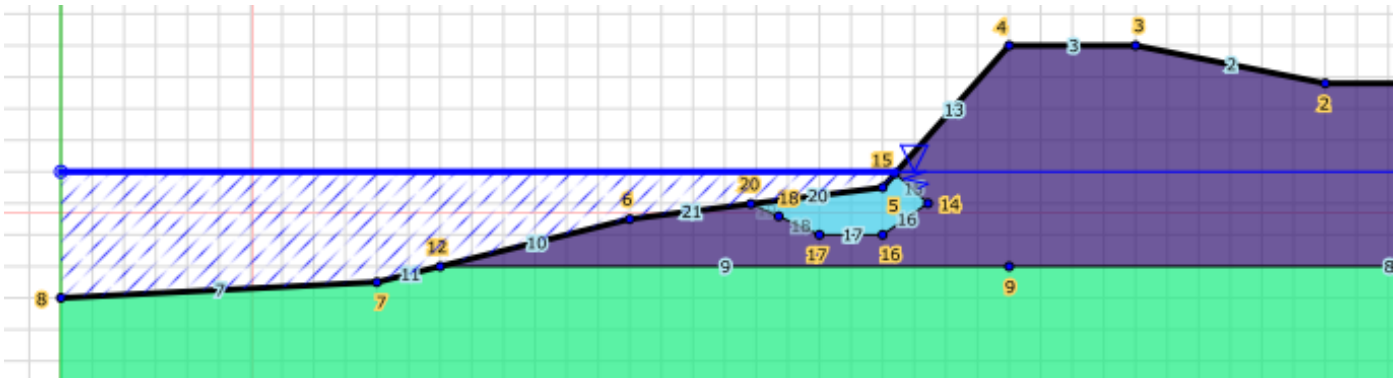


Figure 12 : Queue du Borne – PM 200.

5.3.1.2 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
BOIS JOLIVET B					
Profil topo retenu	Profondeur	Description	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
1200 +1300+722	0 à 4m	Grave + matrice sablo limoneuse grise (D3) très grossier (29% de passant à 5mm)	20	0	37
	4 à 6m	Graves à cailloux + matrice sablo limoneuse grise (B5) donc un peu plus fin !	20	0	35
QUEUE DU BORNE					
Profil topo retenu	Profondeur	Description	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
200+400	0 à 1 m	Sable très fin limoneux marron gris à quelques cailloutis et graviers (TV ?)	19	4	27
	1 à 4m	Grave quasiment pures légère matrice matrice (C1B3)	18	0	37
	4 à 6m	Graves à matrice sablo limoneuse en proportion variable (B5)	20	0	35

Tableau 5 : Rive droite – Paramètres géomécaniques

5.3.2 Rive gauche

5.3.2.1 Profils

- Toisings :

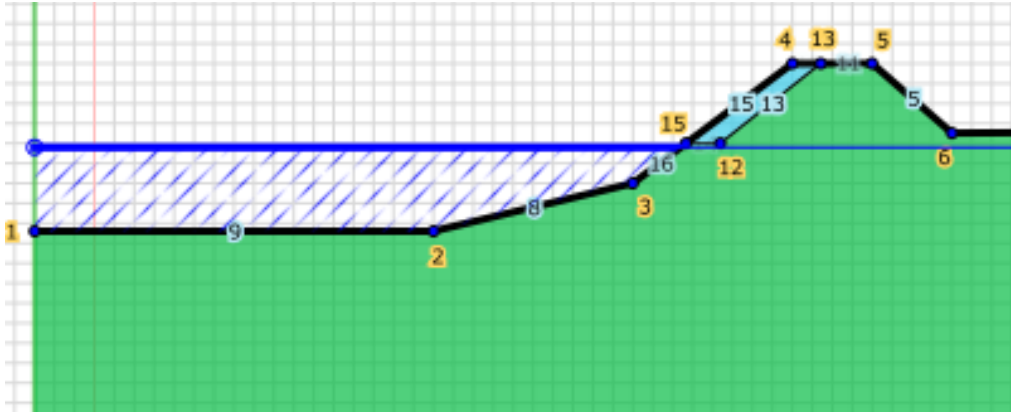


Figure 13 : Toisings – PM 1300.

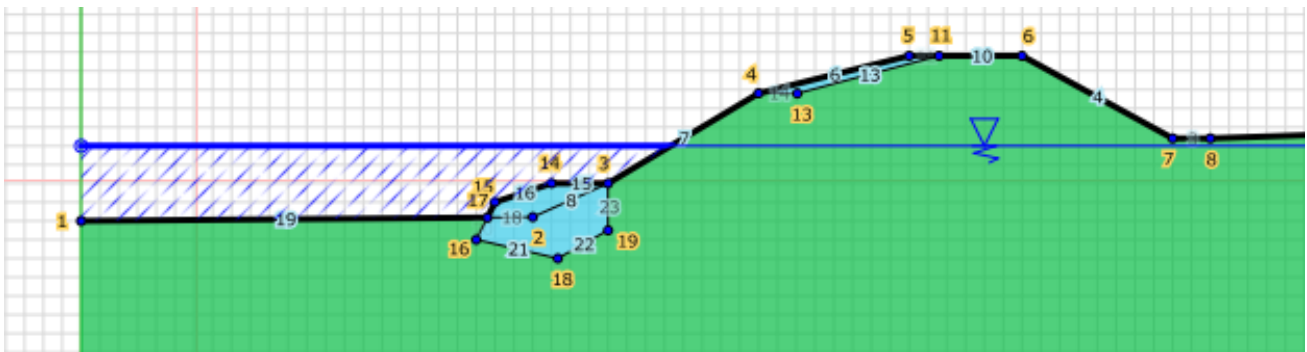


Figure 14 : Toisings – PM 1200.

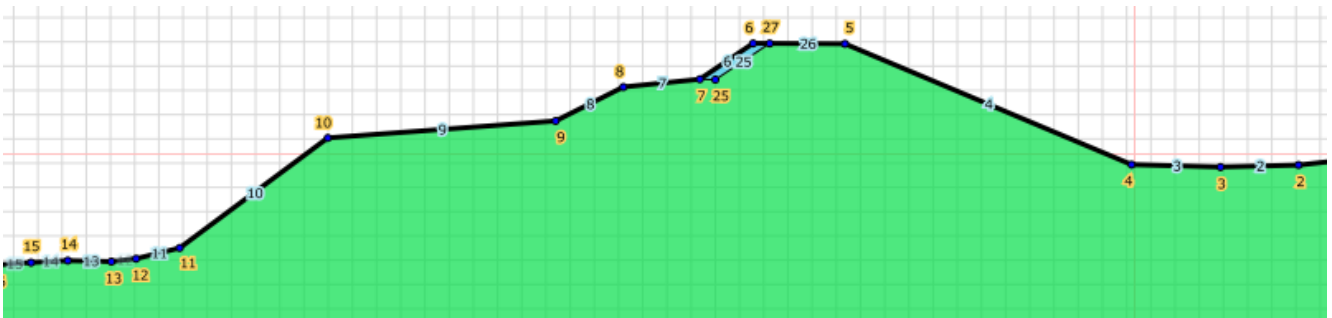


Figure 15 : Toisings – PM 1076.

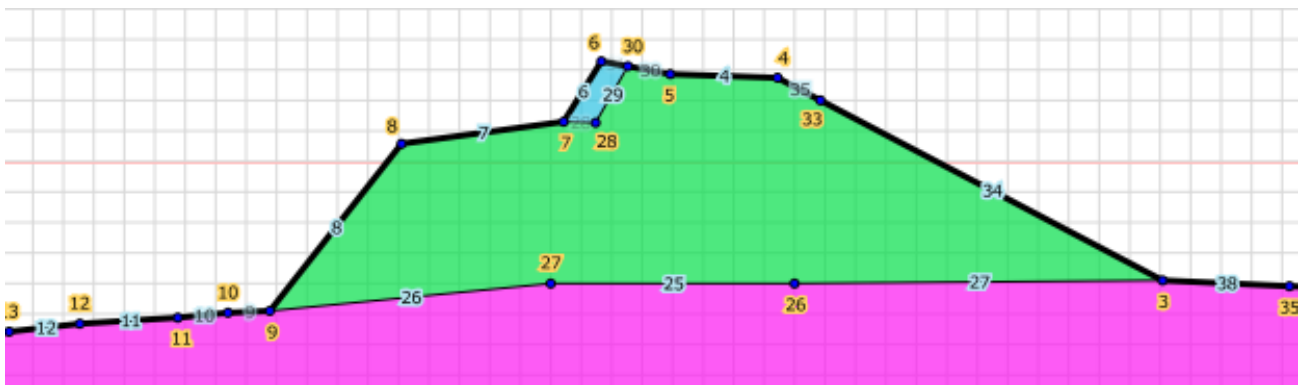


Figure 16 : Toisings – PM 774.

- STEP :

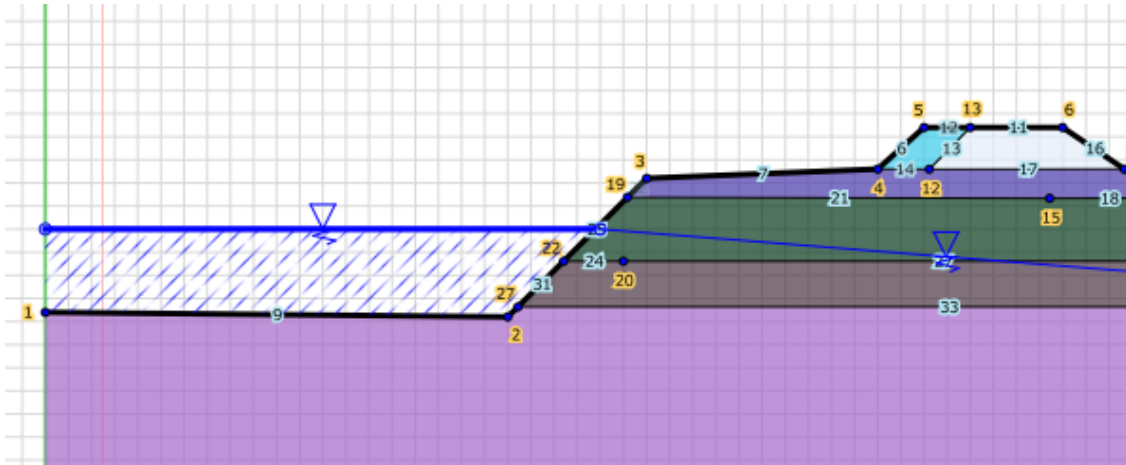


Figure 17 : STEP – PM 400.

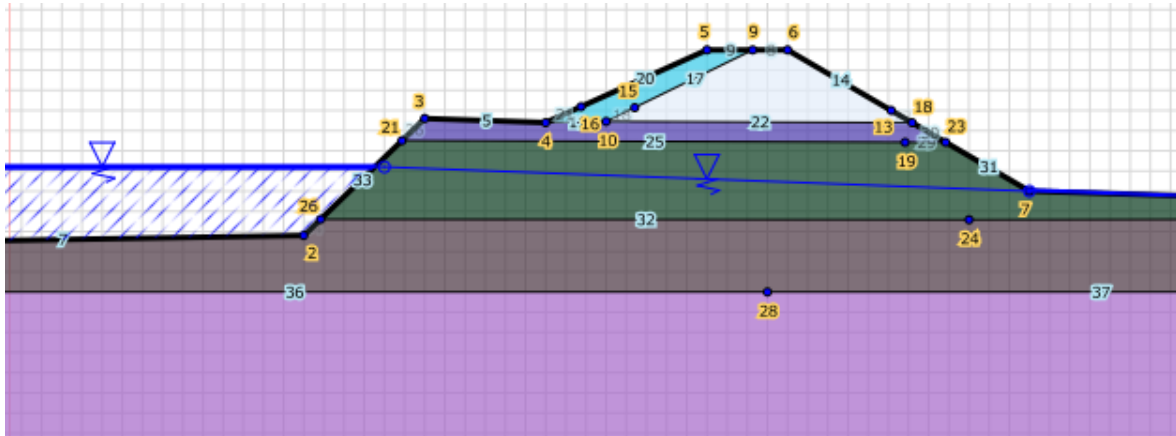


Figure 18 : STEP – PM 300.

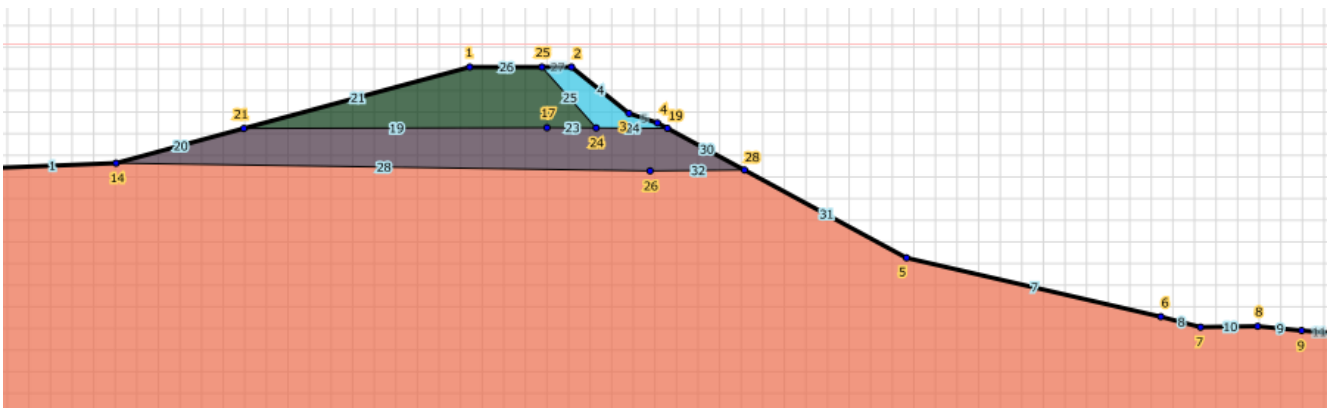


Figure 19 : STEP – PM 145.

5.3.2.2 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

Tableau 6 : Rive droite – Paramètres géomécaniques

6 EVALUATION DE LA STABILITE DES DIGUES EXISTANTES

6.1 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.

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 7 : Stabilité actuelle – Conclusion générale.

6.2 Etude de sensibilité – 2020

Présentation et objectif :

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.

Le tableau suivant présente les modifications apportées sur ces paramètres géomécaniques dans le cadre de cette étude. Ces modifications se basent sur une ré exploitation des résultats des reconnaissances géotechniques de 2017.

Caractéristiques mécaniques des sols							
Profil topo	Description	Diagnostic 2017			Sensibilité 2020		
		γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
BOIS JOLIVET B							
1200 +1300 + 722	Graves à cailloux + matrice sablo limoneuse grise (B5) donc un peu plus fin !	20	0	35	20	0	31
QUEUE DU BORNE							
200+400	Grave quasiment pures légère matrice matrice (C1B3)	18	0	37	20	0	37
	Graves à matrice sablo limoneuse en proportion variable (B5)	20	0	35	20	0	31
TOISINGES							
1200+1300 +1285 + 1076	Graves sablo limoneuses grises à passage plus limono sableux (C1B5)	20	3	31.2	20	3	32
774	Graves sablo limoneuses grises à passage plus limono sableux (C1B5)	20	3	31.2	20	3	32
STEP							
300 + 400	Sable fin limoneux gris beige à nombreux cailloux	21	0	29.2	20	0	31
	Limon sableux à cailloux	19	4	27	19	4	31
	Limons à cailloux (A1)	19	2	25	19	5	27
	Sable fin limoneux à cailloux	21	0	29	20	0	31
465 + 145	Limon sableux à cailloux	19	4	27	19	4	31
	Limons à cailloux (A1)	19	2	25	19	2	27
	Sable fin limoneux à cailloux	21	0	29	20	0	31

Tableau 8 : Paramètres géomécaniques – Etude de sensibilité.

Les calculs ont été réalisés suivant deux approches :

1. Sur les mêmes profils que ceux utilisés pour le diagnostic, suivant les mêmes conditions hydrauliques et suivant les mêmes recherches de cercles de glissement, de manière à ne bien prendre en compte que l'influence des paramètres géomécaniques ;
2. Sur des nouveaux profils construits sur la base des profils du diagnostic de 2018, en appliquant les conditions hydrauliques « état actuel » calculées par le modèle hydraulique CNR pour ce projet et en faisant varier les paramètres géomécaniques.

Résultats :

Le tableau suivant donne une synthèse comparative des résultats obtenus suivant l'approche 1 décrite ci-avant. L'annexe 13 présente les calculs globaux réalisés en 2020 pour l'étude de sensibilité.

Rive	PM	Diagnostic 2018		Sensibilité 2020	
		Niveau bas Décrue rapide – Q ₁₀₀		Niveau bas Décrue rapide – Q ₁₀₀	
Droite	1300	0.66	0.70	0.65	0.64
	1200	1.69	1.04	1.52	0.96
	400	0.71	0.60	0.71	0.60
	200	0.70	0.81	0.70	0.82
Gauche	1300	1.03	1.10		
	1200	1.52	1.48		
	400	0.65	0.73	0.70	0.79
	300	0.76	0.99	0.83	1.08

Tableau 9 : Etude de sensibilité – Approche 1 – Résultats.

Le tableau suivant donne une synthèse comparative des résultats obtenus suivant l'approche 2 décrite ci-avant.

Rive	Tronçon	PM	Utilisation données géotech - Diagnostic 2018						Utilisation données géotech - Sensibilité					
			Niveau bas		Décrue rapide Q100		Décrue rapide Q100 + 1 m		Niveau bas		Décrue rapide Q100		Décrue rapide Q100 + 1 m	
			Mini	Crête	Mini	Crête	Mini	Crête	Mini	Crête	Mini	Crête	Mini	Crête
RD	RD-T1	1300	0.59	1.34	0.63	1.39	0.64	1.37	0.59	1.22	0.62	1.26	0.64	1.27
		1200	0.93	1.7	0.99	1.79	0.99	1.8	0.88	1.52	0.94	1.6	0.95	1.64
	RD-T2	722	0.7	0.72	0.76	0.8	0.72	0.76	0.7	0.72	0.76	0.8	0.72	0.76
RG	RG-T2	1285	1.05		1.12		1.05		1.08		1.14		1.07	
		1076	1.08	1.56	1.19	1.7	1.26	1.64	1.11	1.61	1.23	1.76	1.29	1.7
	RG-T4	774	0.68	0.85	0.74	0.92	0.77	0.92	0.69	0.86	0.75	0.93	0.79	0.93
	RG-T6	465	0.67	0.7	0.72	0.75	0.71	0.73	0.73	0.77	0.78	0.82	0.77	0.8
	RG-T8	145	0.79	0.88	0.9	0.96	0.8	0.88	0.85	0.94	0.96	1.02	0.85	0.94

Tableau 10 : Etude de sensibilité – Approche 2 – Résultats.

Conclusions :

Les deux approches montrent 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.

6.3 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.

	PM	RD-T1	RD-T2	RD-T3/4	RD-T5	RD-T6	RD-T7
Début		1380 (Pont)	1140	590 (Pont)	395	350	195
Fin		1140	605 (Pont)	395	350	195	70 (Confluence)

Tableau 11 : Découpage en tronçons homogènes – RD.

	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)

Tableau 12 : Découpage en tronçons homogènes – RG.

7 EBAUCHE DIMENSIONNELLE DES DIFFERENTS OUVRAGES – PRO

Ce paragraphe constitue l'ébauche dimensionnelle des solutions de confortement dont les principes ont été présentés dans le document DIGP 2021-776 donné en annexe 1 de l'AVP. Il vise à définir les solutions techniques envisagées et qui seront à préciser au stade PRO.

7.1 Ebauche structurelle

Ce paragraphe synthétise les réflexions concernant l'ébauche structurelle des ouvrages (géométrie, constitution, etc.) proposée au stade AVP.

7.1.1 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 Q_{100} ;
- Cote de crue extrême :
 - Globalement équivalent à la cote atteinte à Q_{100} 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 Q_{100} 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 CNR (cf. Annexe 1) ;
- Foncier : Cadastre
- Topographie : levé Sintegra 2017 et LIDAR 2014 & 2015
- Aspect géotechnique : Exploitation des reconnaissances Hydrogéotechnique 2017 comme réalisé pour le diagnostic de 2018 (cf. § 5) ;
- Autres matériaux :
 - **Remblai** : type tout venant / $c' = 0$ kPa / $\varphi' = 30^\circ$ / $\gamma = 20$ kN/m³
 - **Enrochements** : blocométrie adaptée / $c' = 0$ kPa / $\varphi' = 45^\circ$ / $\gamma = 26$ kN/m³

7.1.2 Méthodologies

Conception générale :

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.

Les hypothèses considérées pour chaque modèle de calcul sont rappelées dans les fichiers résultats donnés en Annexes.

Blocométrie des protections en enrochements (butées et épis) :

Le poids et la taille des enrochements sont estimés à partir de la formule d'Isbach :

$$D_{50} = 0.7 \times \frac{\gamma}{\gamma' - \gamma} \times \frac{v^2}{2g} \qquad W_{50} = 0.5 \times \left(\frac{\pi}{6} + 1\right) \times \gamma' \times D_{50}^3$$

La correction de Lane est appliquée pour estimer la taille des enrochements suivant la pente du talus :

$$\lambda = \cos \alpha \times \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \varphi}\right)^2}$$

Les vitesses majorées d'écoulements pour la crue Q₁₀₀ varient sur le tronçon aval de la RD1203 entre 3.8 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.

Les données d'entrées caractéristiques sont les suivantes sur le secteur considéré :

Symbole	Paramètre	Valeur
γ	Poids spécifique de l'eau	1 t/m ³
γ'	Poids moyen des enrochements	2.6 t/m ³
v	Vitesse majorée de l'écoulement (vitesse x1.2)	Varie selon l'intensité de la crue (m/s)
α	Angle du talus	Varie selon le profil considéré
φ	Angle d'équilibre du matériau	0.70 rad (45°)

Tableau 13 : Données d'entrée pour le dimensionnement des enrochements.

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. La littérature existante s'avère peu disserte sur les volumes de bêche à mettre en œuvre (cf. Rock and manual, guide CETMEF ...).

L'épaisseur de la bêche suivra les mêmes préconisations que pour la digue à savoir 2 fois le diamètre moyen des blocs.

L'optimisation de la bêche ne pourra être envisagée que sur la base d'un modèle hydraulique à fond mobile.

Aussi, principalement du fait du manque d'espace, les couches filtres de transition entre sols de granulométrie très différente ne pourront être mise en œuvre. Il est donc proposé d'intégrer des géotextiles anti contaminant et filtrant à ces interfaces, notamment aux interface enrochements/remblai et enrochements/TN.

Epis en enrochements – Géométrie & positionnement :

Le dimensionnement géométrique et le positionnement des épis a été établi sur la base de l'expérience du groupement sur des cours d'eau de géométrie et comportement similaire.

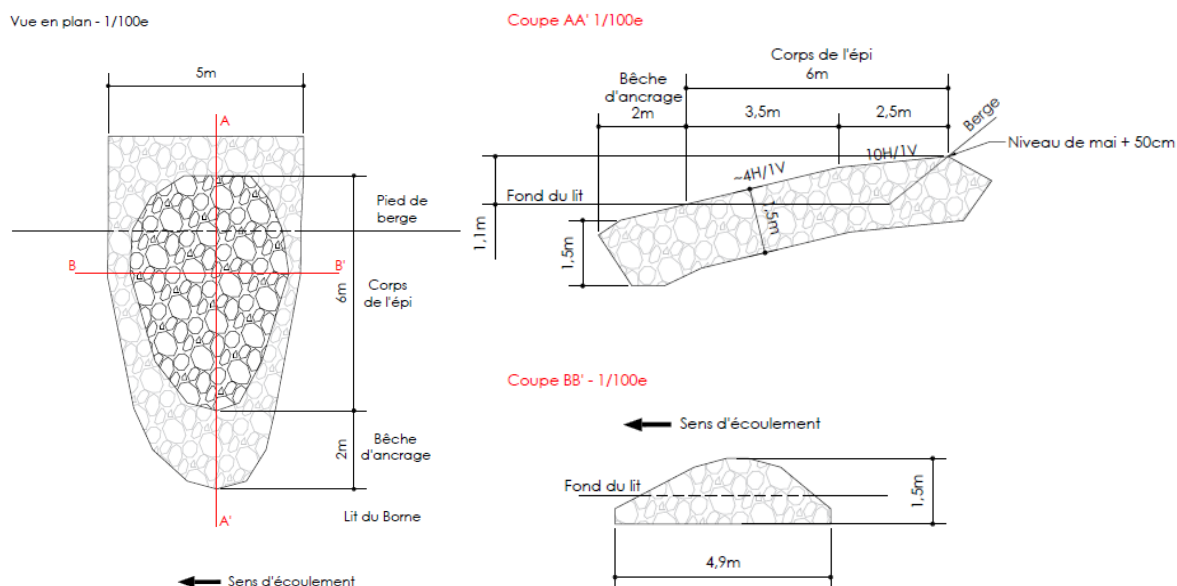


Figure 20 : Dimensions des épis.

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 Q_{100} ;
- 3.64 m/s pour la Q_{10} .

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 D_{50} de 59 cm équivalent à un W_{50} 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.

7.1.3 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 Q_{100} , au droit du seuil actuel ;
- 3.7 à 4 m/s pour l'état projeté, pour Q_{100} , 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 fournit un poids moyen W_{50} 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 D_{50}).

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.

7.1.4 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).

7.1.5 Rive droite

Dans la suite, 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.

7.1.5.1 RD – T1

Dimensionnement :

Mur :

Le mur à installer en pied aval présente une hauteur totale minimale variable entre environ 2 et 2.4 m (dont 0.87 m pour mise hors gel) afin que son arase supérieure soit calée à la cote de crue extrême.

Le remblai, réalisé en tout venant, permettra l'élargissement de la piste piétonne de crête à la largeur cible de 1.5 – 2 m. Ainsi, la hauteur de mur pourrait être revue de manière à permettre cette disposition.

Le mur pourra être réalisé en éléments préfabriqués assemblés mécaniquement les uns aux autres par emboîtement et de manière étanche par un dispositif adapté (membrane par exemple).

Afin de pouvoir installer ce mur, la digue sera décaissée de manière à dégager l'emprise nécessaire à la mise en place du mur et la fouille sera réalisée jusqu'à l'atteinte de la cote de mise hors gel du mur. L'assise sera alors préparée par compactage soigné du fond de forme et mise en œuvre d'un béton de propreté. Une fois le mur installé, les dispositifs d'étanchéité (membrane) et de drainage (delta MS et drain de pied) pourront être mis en œuvre avant de terminer avec les travaux de finition (terrassment, réfection de l'enrobé, etc.).

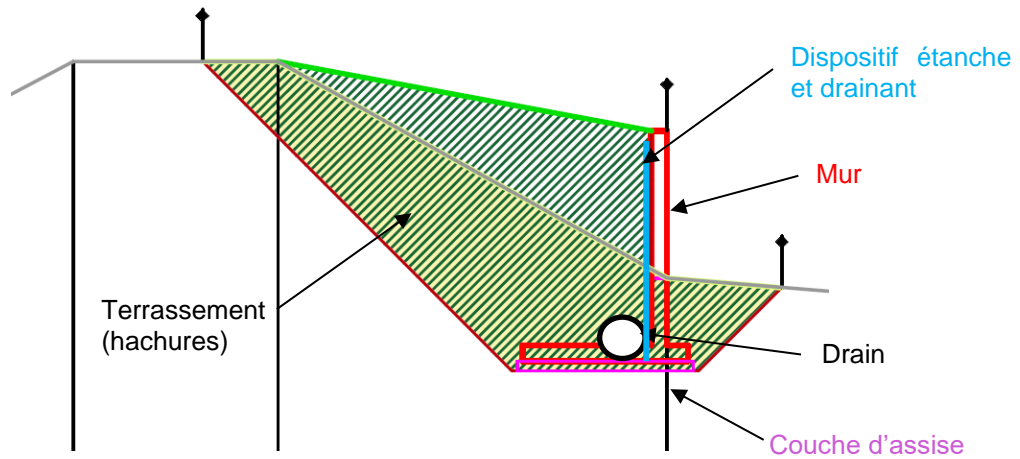


Figure 21 : Installation du mur – Schéma de principe.

Sur la base du REX sur des aménagements, CNR, il pourrait être envisagé la mise en place d'un mur de type LT H120-240 telle que décrit dans l'extrait de brochure fournisseur ci-après.

> MURS EN LT H120-240 x L120 ET H120>240 x L250 **CE** NORME EUROCODE NOUS CONSULTER POUR UNE LONGUEUR SPÉCIALE

Parement à la demande / Angle de frottement des terres 35°

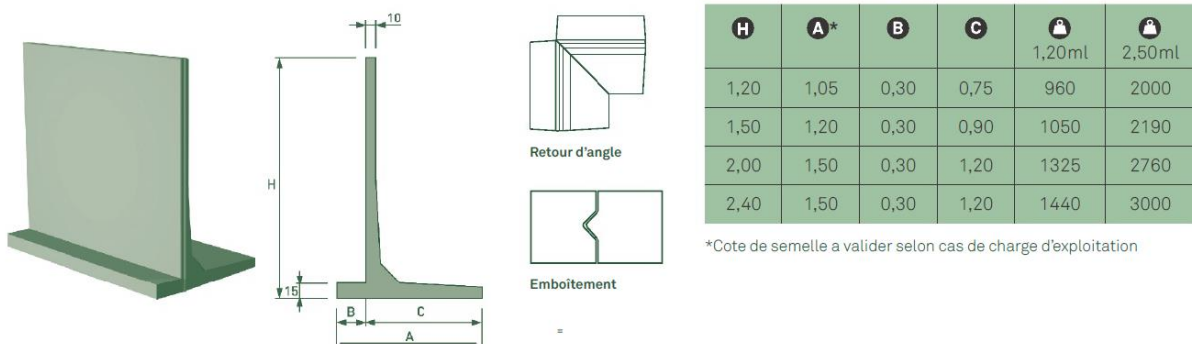


Figure 22 : Mur préfabriqué – Modèle LT H120-240.

Les hypothèses de calcul prises pour le dimensionnement par défaut d'un tel mur sont données dans la Figure 23.

Des études d'exécution seront demandés au préalable des travaux pour justifier de la stabilité des murs envisagés au vu des conditions de site et d'utilisation.

> HYPOTHÈSES DE CALCUL

SOL DE FONDATION :

- Angle de frottement interne du terrain (φ) = 35°
- Contrainte du sol σ = 1.5 bar
- Zone non sismique
- Drain en pied de mur (pas de poussée hydrostatique)

REMBLAI :

- Masse volumique ψ = 2 T/m³
- Angle de frottement interne du remblai (φ^2) = 35°

SURCHARGE :

- Surcharge d'exploitation 2 T/m²
- et talus en pente α = 20°

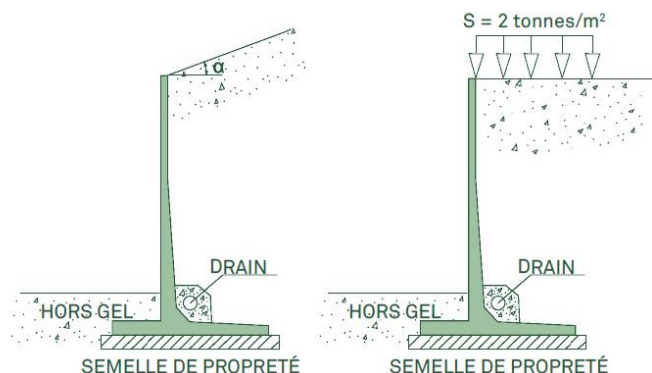


Figure 23 : Mur préfabriqué – Hypothèses de calcul.

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 dimensionnement général des épis est proposé dans le paragraphe § 7.1.2.

Le tableau suivant présente les vitesses moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté.

Situations		Etat actuel – Sans épis	Etat projeté – Avec épis	Différence
Vitesse en pied – Q ₁₀₀ (hors épi)	Max	3.69	3.58	- 0.11
	Min	2.35	2.16	- 0.19
	Moy	3.01	2.87	- 0.14
Vitesse en pied – Q ₁₀ (hors épi)	Max	3.10	2.93	- 0.17
	Min	2.06	1.82	- 0.24
	Moy	2.57	2.39	- 0.18

Tableau 14 : RD-T1 – Confortement – Effet des épis.

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 4.12 m/s obtenue par modélisation après intégration des épis reste dans la gamme de celle utilisée pour le dimensionnement général de ces derniers proposé au paragraphe § 7.1.2. Ce dimensionnement reste donc valable et des enrochements de la classe 300/1000 kg devront être employés.

Coupe type :

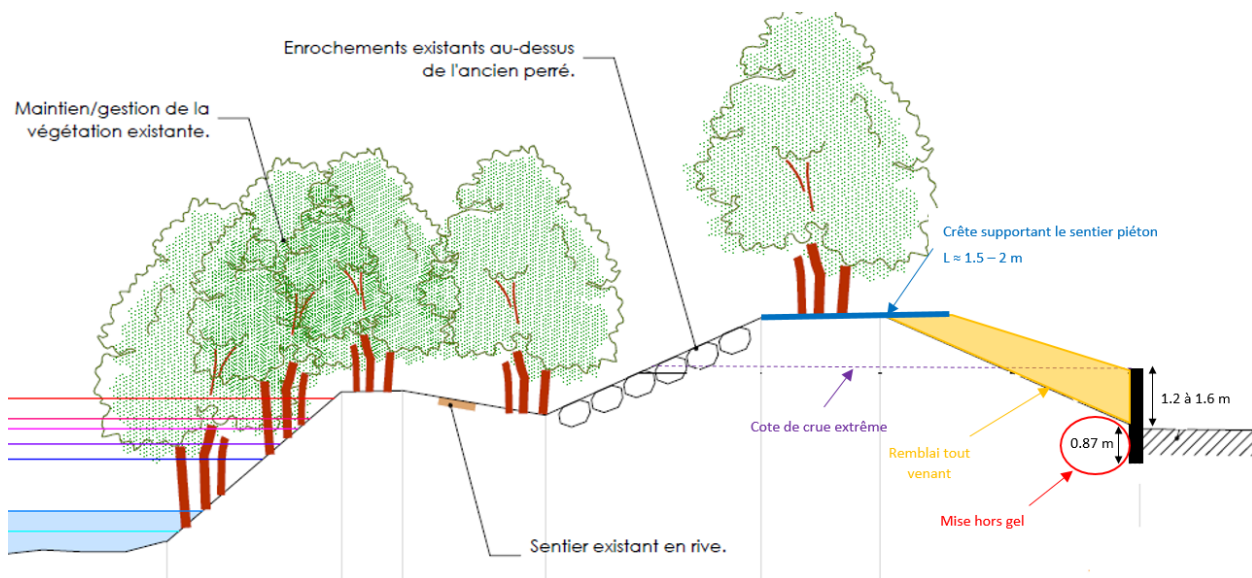


Figure 24 : RD-T1 – Confortement – Coupe type.

7.1.5.2 RD – T2

Dimensionnement :

Mur :

Sur ce tronçon, le mur à installer en pied aval présente une hauteur totale comprise entre 1.2 et 2.1 m (dont 0.87 m pour mise hors gel) afin que son arase supérieure soit calée à la cote de crue extrême.

Les préconisations de dimensionnement et d'installation sont identiques à celles proposées dans le paragraphe § 7.1.5.1.

Epis – Impact hydraulique :

Le dimensionnement général des épis est proposé dans le paragraphe § 7.1.2.

Le tableau suivant présente les moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté concernant les vitesses d'écoulement.

Situations		Etat actuel – Sans épis	Etat projeté – Avec épis	Différence
Vitesse en pied – Q ₁₀₀ (hors épi)	Max	3.70	3.52	- 0.22
	Min	2.64	2.33	- 0.31
	Moy	3.13	2.84	- 0.29
Vitesse en pied – Q ₁₀ (hors épi)	Max	3.12	2.93	- 0.19
	Min	2.24	1.83	- 0.39
	Moy	2.66	2.32	- 0.34

Tableau 15 : RD-T2 – Confortement – Effet des épis.

Les épis ont pour effet de réduire les vitesses d'écoulement en pied de talus qui restent néanmoins supérieures à 2 m/s quelle que soit la crue étudiée. Ceci implique que les épis ont bien un effet bénéfique vis-à-vis de l'érosion externe mais que cette protection ne permet pas de s'affranchir de ce risque.

En conclusion, les épis tels que dimensionnés sur ce tronçon permettent de ralentir le phénomène d'érosion externe sans le stopper. Leur rôle est davantage prépondérant dans la diversification bioécologique du cours d'eau que dans la stabilisation des endiguements.

La solution proposée à l'AVP 2018 serait celle qui permettrait de supprimer ce risque.

Epis – Blocométrie :

L'utilisation de la formule d'Isbach avec la vitesse maximale de 3.93 m/s obtenue par modélisation après intégration des épis débouche sur la nécessité d'employer des enrochements de diamètre D₅₀ de 53 cm soit un W₅₀ de 290 kg.

Pour ces épis, des enrochements de type 300/1000 kg pourrait être utilisés, comme proposé dans le dimensionnement général des épis derniers proposé au paragraphe § 7.1.2.

Coupe type :

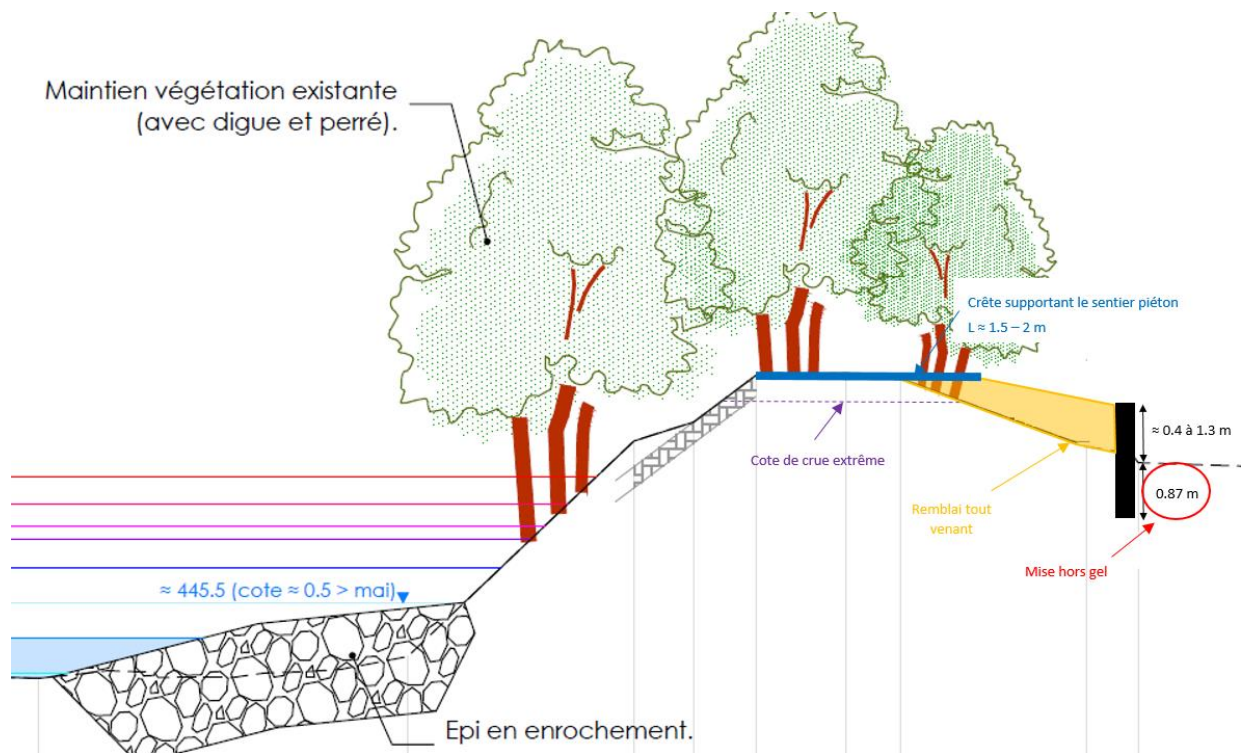


Figure 25 : RD-T2 – Confortement – Coupe type.

7.1.5.3 RD – T3 & T4

Dimensionnement :

Protection amont :

- Blocométrie : La modélisation hydraulique fait ressortir une vitesse maximale en pied de talus pour la cote de protection (Q_{100}) de l'ordre de 3.68 m/s, ce qui reste dans la gamme de vitesse considérée lors de l'AVP de 2018 et reprise en base dans le paragraphe § 7.1.2. En première approche, les pentes de talus resteront proches de celles existantes de par les contraintes foncières fortes, la protection en enrochements 300/1000 kg reste valable.
- 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.

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurelle Talren a été réalisée sur le profil 507RD. Le tableau suivant synthétise les résultats de calcul obtenus pour la géométrie retenue tandis que les résultats globaux sont disponibles dans l'Annexe 2.

Conditions	Amont – Glissement global	Amont – Glissement superficiel	Aval – Glissement global
Niveau bas	1.17	1.06	0.98 ¹ / 1.08 ²

Cote de protection	-	-	1.10 ¹
Cote de crue extrême	-	-	1.27 ¹
Décrué – Cote de protection	1.18	1.21	-
Décrué – Cote de crue extrême	1.1	1.26	-

¹ : Talus aval rectifié – pente 2.2H/1V

² : Talus aval rectifié – pente 2.5H/1V

Tableau 16 : Résultats Talren – Profil 507RD.

De manière sécuritaire, il est considéré la mise en œuvre d'un talus aval à la pente de 2.5H/1V.

L'emprise foncière disponible côté val est globalement suffisante pour mettre en œuvre un talus pentu à 2.5H/1V.

Au plus proche de l'angle Nord-Ouest de la prison, il conviendra de vérifier cette disposition. En cas d'impossibilité, le talus pourra être raidi par l'emploi d'un renforcement du remblai en géogrilles.

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 conservative) 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.

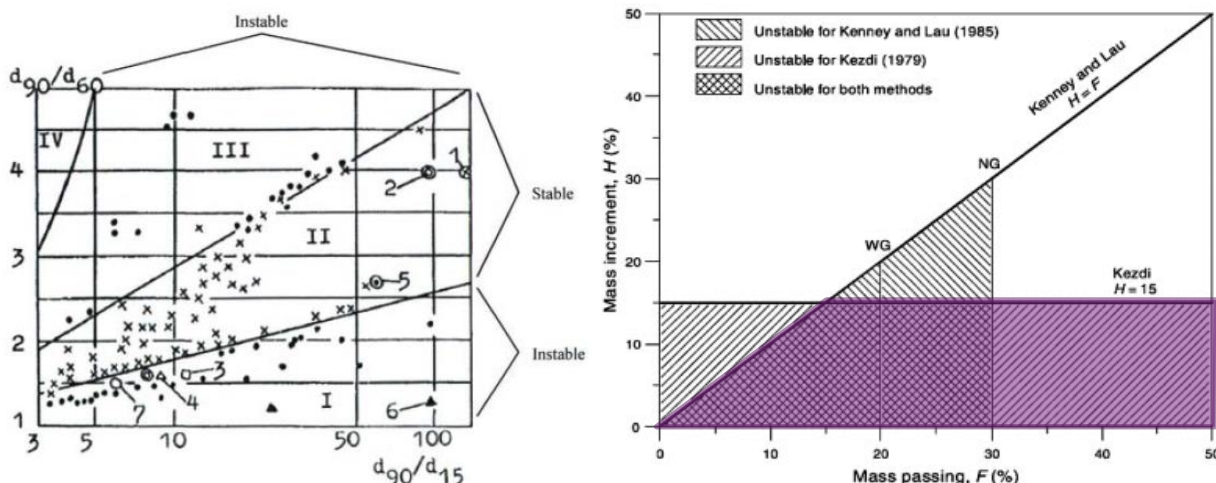


Figure 26 : Résultats des expérimentations de Burenkova (1993, à gauche) et Li&Fannin (2008, à droite).

- 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 œuvre), 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 ($D_{max} < 80 \text{ mm}$, 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. [Drainage du talus aval](#) :

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 œuvre de l'ensemble des solutions de confortement.

Coupe type :

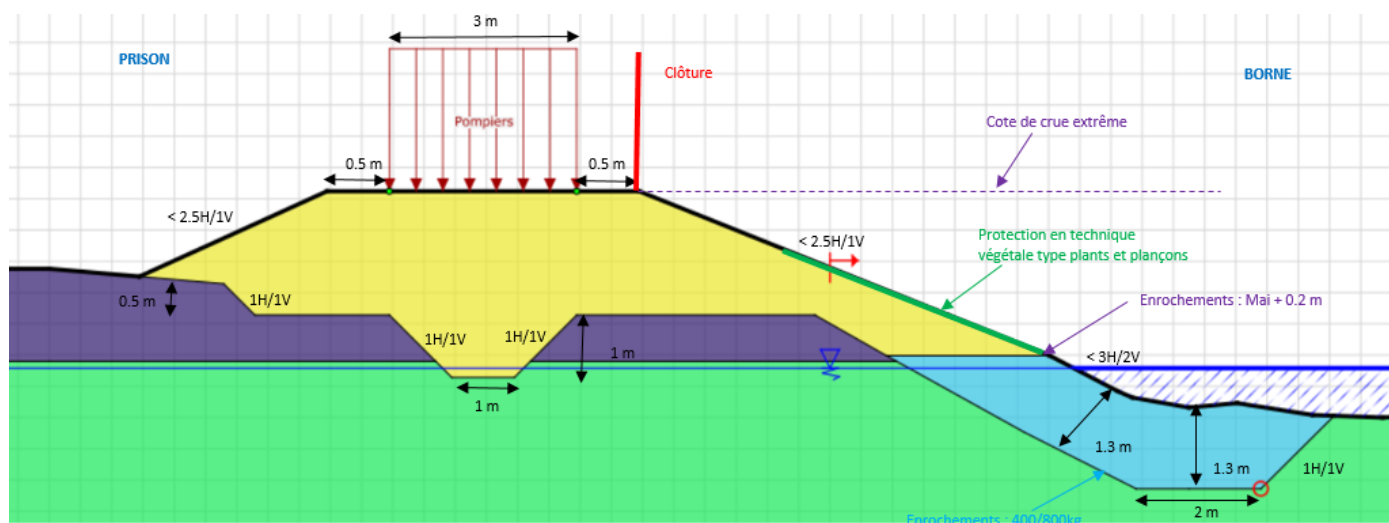


Figure 27 : RD-T3 & T4 – Confortement – Coupe type.

7.1.5.4 RD – T5

Dimensionnement :

Protection amont :

- Blocométrie : La modélisation hydraulique fait ressortir une vitesse maximale en pied de talus pour la cote de protection (Q_{100}) de l'ordre de 3.68 m/s, les conclusions du paragraphe § 7.1.5.3 restent valables.
- Dimensions du sabot : Idem § 7.1.5.3
- Hauteur enrochements : Idem § 7.1.5.3

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.

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurale Talren a été réalisée sur le profil 373RD. Le tableau suivant synthétise les résultats de calcul obtenus pour la géométrie retenue tandis que les résultats globaux sont disponibles dans l'Annexe 3.

Conditions	Amont – global	Amont – superficiel	Amont - Pied Aval –	Pente 2.5H/1V
Niveau bas	1.28	1.01	1.26	1.04
Cote de protection	-	-	-	1.23
Cote de crue extrême	-	-	-	1.29
Décruie – Cote de protection	1.16	1.15	1.16	-
Décruie – Cote de crue extrême	1.34	0.99 ¹	1.22	-

¹ : Calcul très pessimiste du fait d'un rabattement de nappe assez faible.

Tableau 17 : Résultats Talren – Profil 373RD.

Par conservatisme et de manière sécuritaire, on conservera une pente de talus amont minimale de 2.5H/1V et une pente de talus aval du merlon de 2.5H/1V.

Matériaux :

Idem § 7.1.5.3

Drainage :

Idem § 7.1.5.3.

Coupe type :

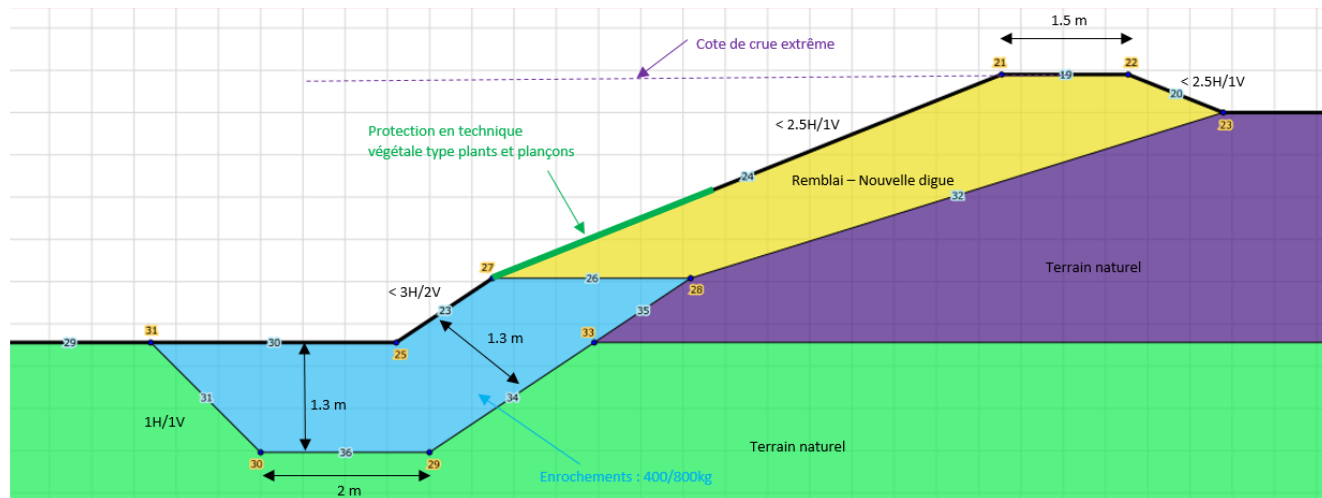


Figure 28 : RD-T5 – Confortement – Coupe type.

7.1.5.5 RD – T6

Dimensionnement :

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurale Talren a été réalisée sur le profil 341RD. Le tableau suivant synthétise les résultats de calcul obtenus pour la géométrie retenue tandis que les résultats globaux sont disponibles dans l'Annexe 4.

Conditions	Amont – Glissement global	Aval – Pente 2.5H/1V
Niveau bas	1.16 ¹ / 1.57 ²	0.99*

Cote de protection	-	1.18*
Cote de crue extrême	-	1.41 / 1.35 ³
Décruie – Cote de protection	1.12 ¹ / 1.50 ²	-
Décruie – Cote de crue extrême	0.98 ¹ / 1.35 ²	-

* : Cercle de peau

¹ : Talus amont à la pente 2.5H/1V

² : Talus amont à la pente 4H/1V

³ : Calcul réalisé au droit du profil théorique présentant la plus grande charge hydraulique à reprendre par merlon.

Tableau 18 : Résultats Talren – Profil 341RD.

Le coefficient de 0.99 obtenu pour le talus aval correspond à un glissement superficiel (cercle de peau) qui ne remet pas en cause la stabilité globale de l'ouvrage.

Par conservatisme et de manière sécuritaire, on conservera une pente de talus amont minimale de 3H/1V et une pente de talus aval du merlon de 2.5H/1V.

Dans le design proposé pour le tracé des solutions de confortement et la mise à jour de la modélisation hydraulique, considérer un talus amont plus doux (par exemple 4H/1V) serait bénéfique vis-à-vis de la gestion du risque d'érosion externe et limiterait la nécessité d'une protection de talus par enrochements (voir ci-après).

Protection amont :

La modélisation hydraulique à l'état projet fait ressortir une vitesse d'écoulement en pied de talus amont de 1.73 m/s au maximum.

Ainsi, la protection mécanique constituée d'une butée de pied en enrochements pourra être remplacée par une protection de talus en technique végétale (type lits de plants et plançons, fascines, etc.).

Coupe type :

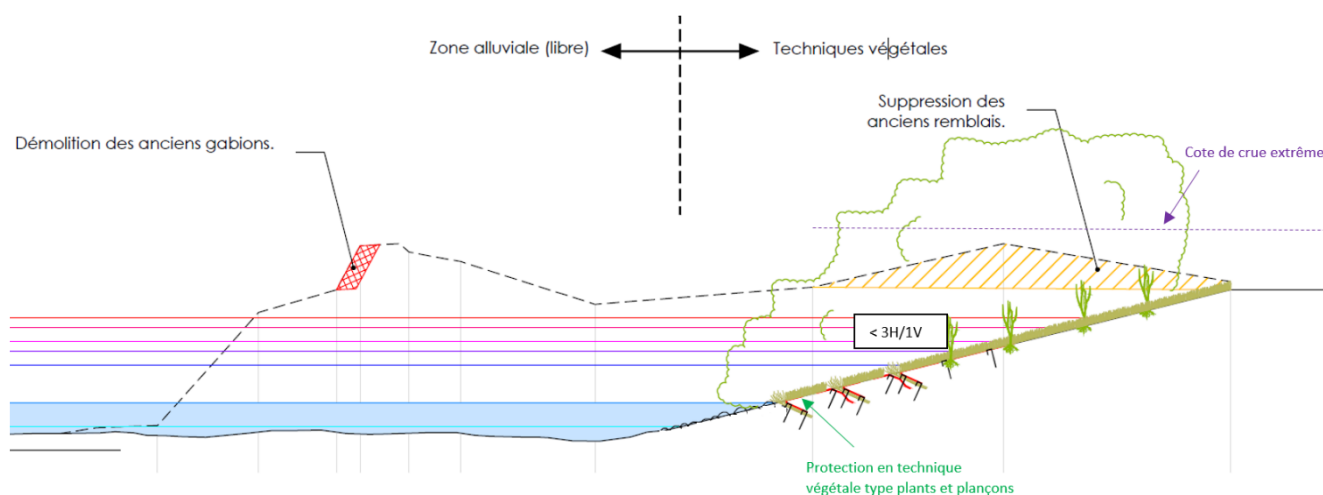


Figure 29 : RD-T6 – Confortement – Coupe type.

7.1.5.6 RD – T7

Dimensionnement :

Le dimensionnement réalisé pour le tronçon précédent sur le profil 341RD reste valable pour ce tronçon.

A noter que ce tronçon se situe en pointe de la plateforme de confluence entre Arve et Borne, il est donc impacté par l'hydraulicité de ces deux cours d'eau. La modélisation hydraulique de l'Arve n'étant pas disponible lors de la réalisation de cette étude, le dimensionnement a été réalisé sur la base de l'hydraulicité du Borne uniquement.

Il conviendra en phase PRO de revoir le dimensionnement du profil type de ce tronçon en fonction des résultats de la modélisation hydraulique sur l'Arve.

Coupe type :

Voir Figure 29.

7.1.6 Rive gauche

Dans la suite, 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.

7.1.6.1 RG – T(-1) à T1 / Passage de la Véloroute sous le Pont Royal

RG-T(-1) – Rampe amont :

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.

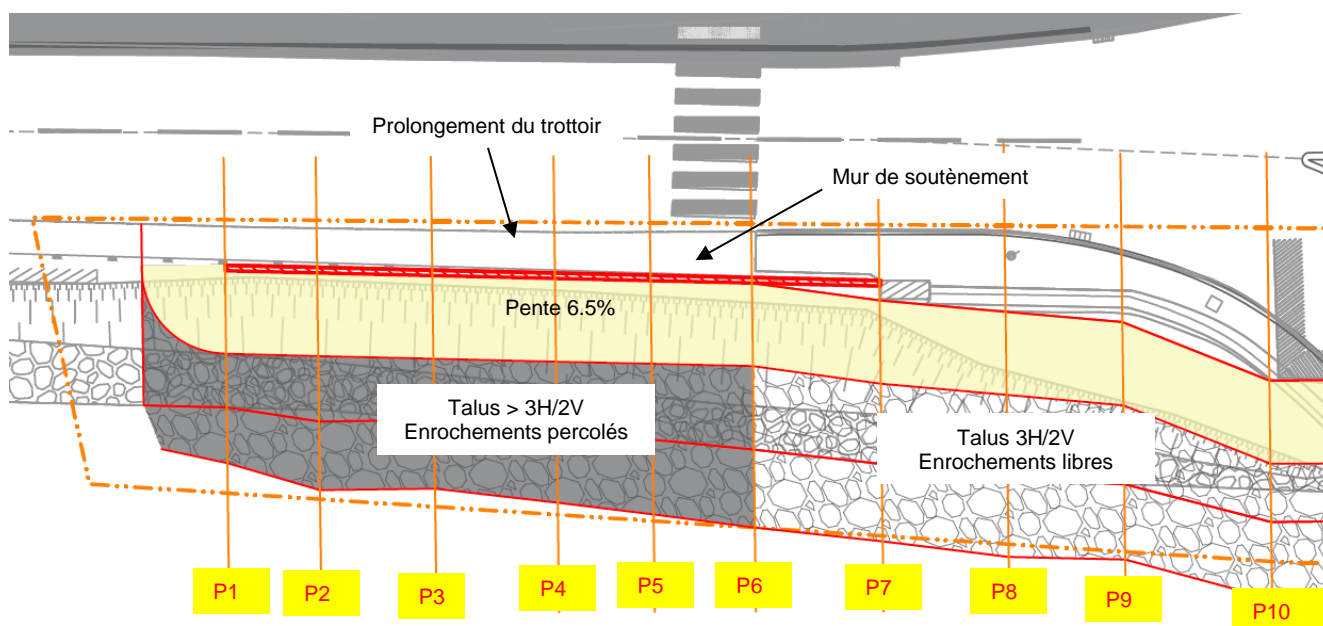


Figure 30 : Rampe amont – Vue en plan.

Echelle en X : 1/200
Echelle en Y : 1/200

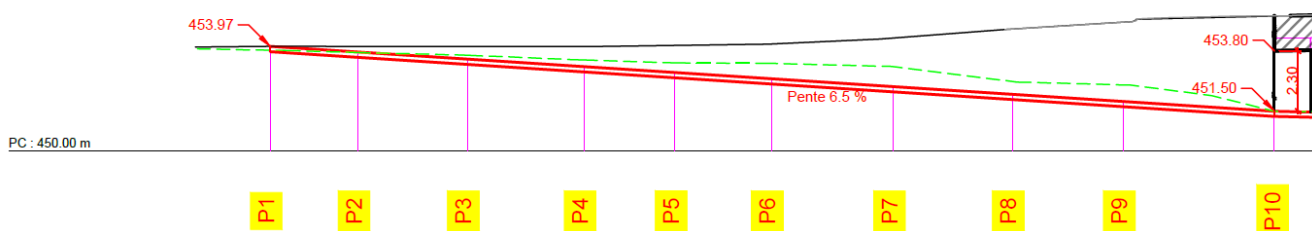


Figure 31 : Rampe amont – Elévation.

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 :

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).

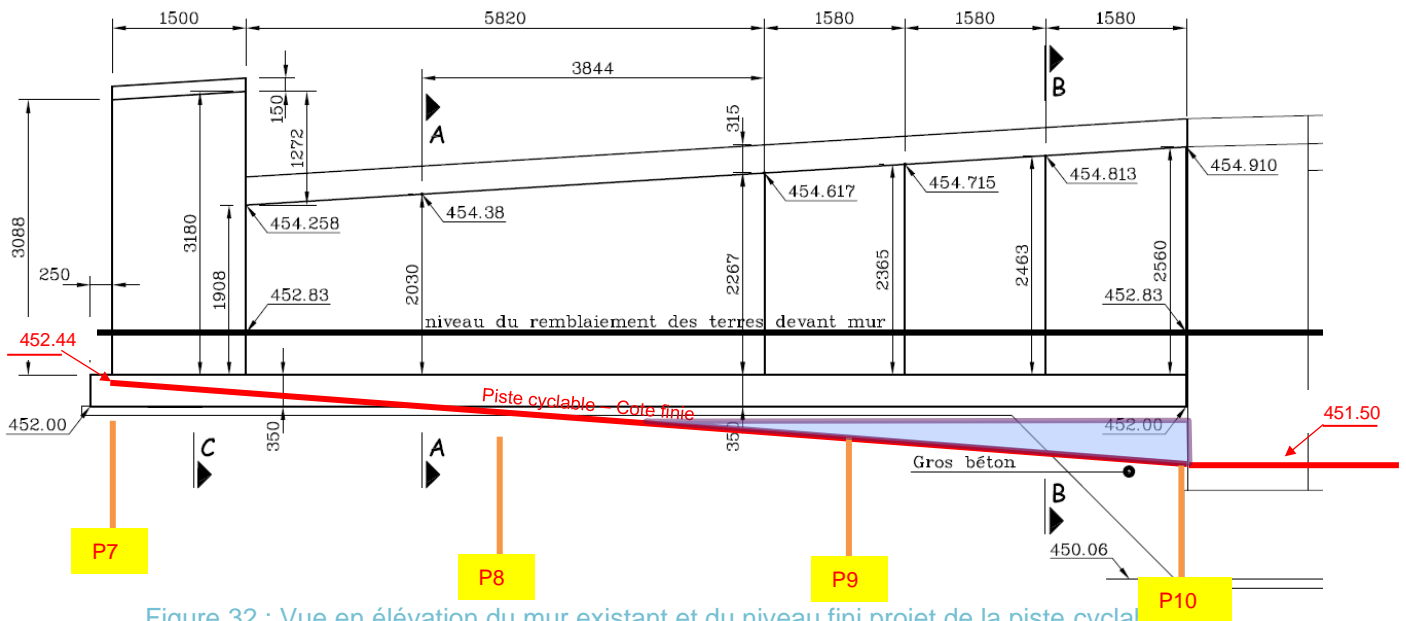


Figure 32 : Vue en élévation du mur existant et du niveau fini projet de la piste cyclable.

Les travaux de mise en œuvre 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 terrassant le remblai situé devant le mur ;
- Nécessiter une reprise du soutènement en sous œuvre 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 reprise en sous œuvre est limitée à l'emprise identifiée par un triangle bleu sur la figure 30 et qu'elle s'effectue par la mise en œuvre d'une paroi clouée ;
- 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 œuvre 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 Q_2 ;

- 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.

Coupes types :

P1 à P7 :

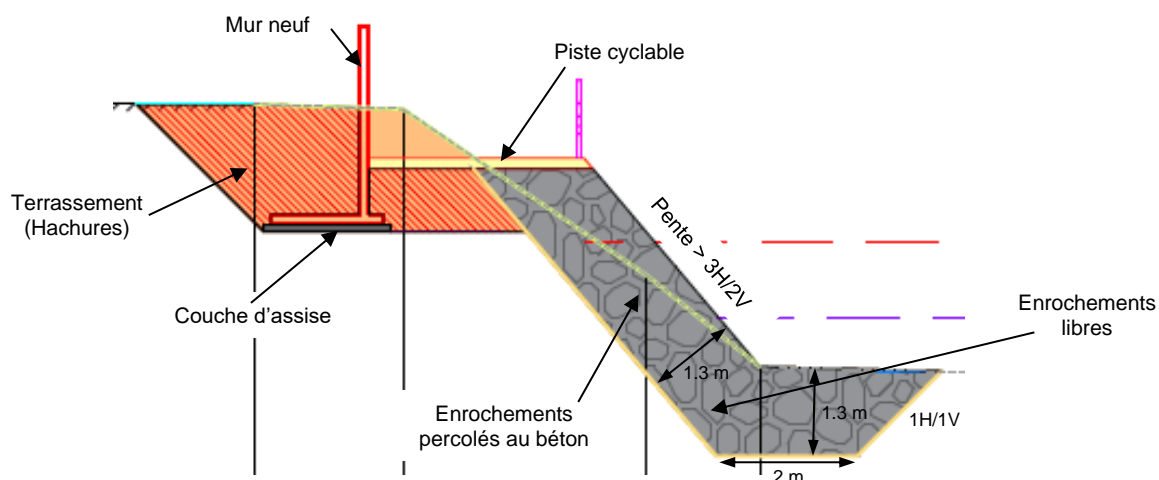


Figure 33 : RG-T(-1) – P1 à P7 – Coupe type (ici P4).

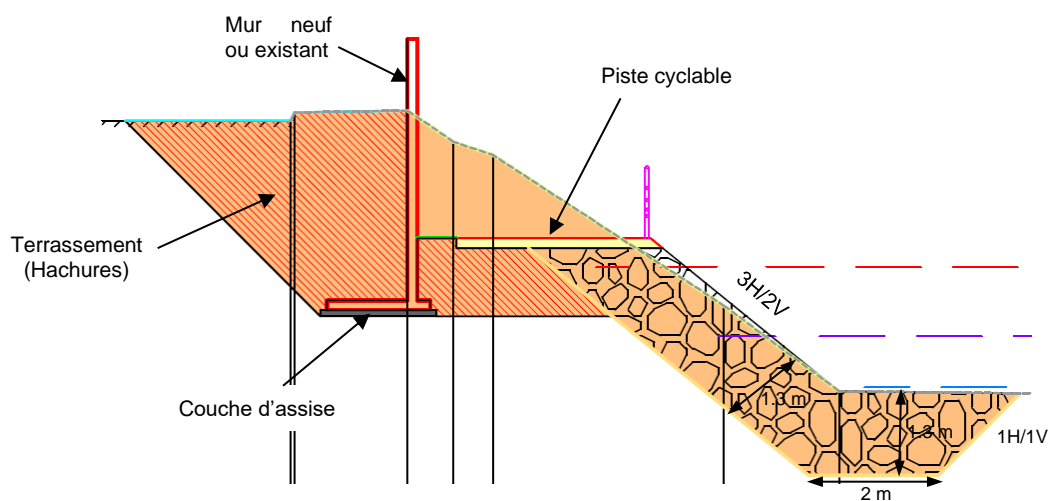


Figure 34 : RG-T(-1) – P7 à P10 – Coupe type (ici P7).

RG-T0 – Passage entre deux ponts :

Détail du principe :

La transition entre les deux rampes s'établit entre les profils P10 et P14 en conservant une lame d'air sous les ponts de 2.3 m. Cela permet la tenue d'une piste à la pente moyenne de :

- 2,3 % sur environ 40 m environ entre P10 et P13 ;
- Plane sur environ 15 m entre P13 et P14.

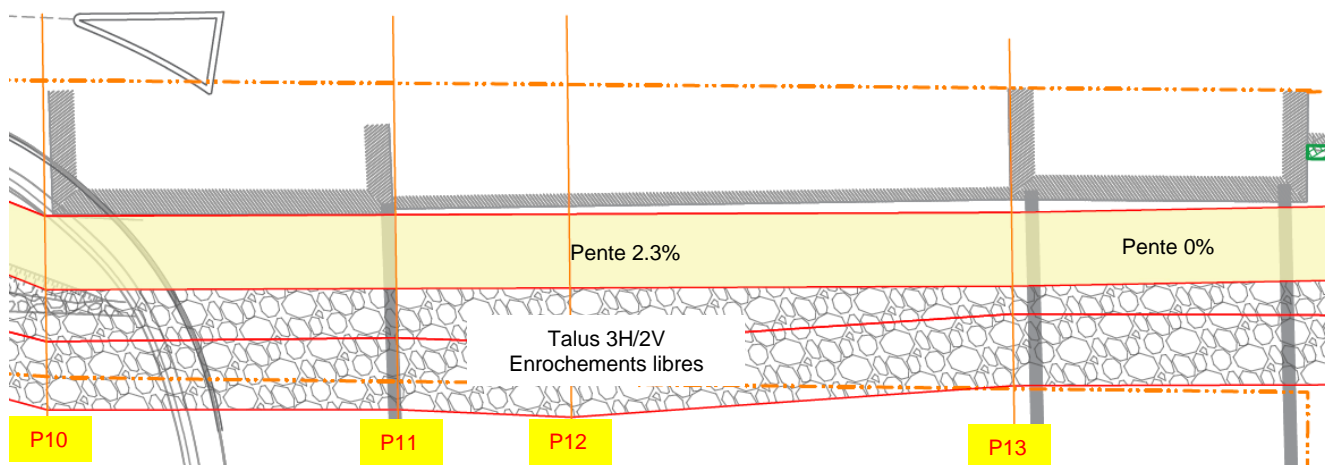


Figure 35 : Zone située entre les deux ponts – Vue en plan.

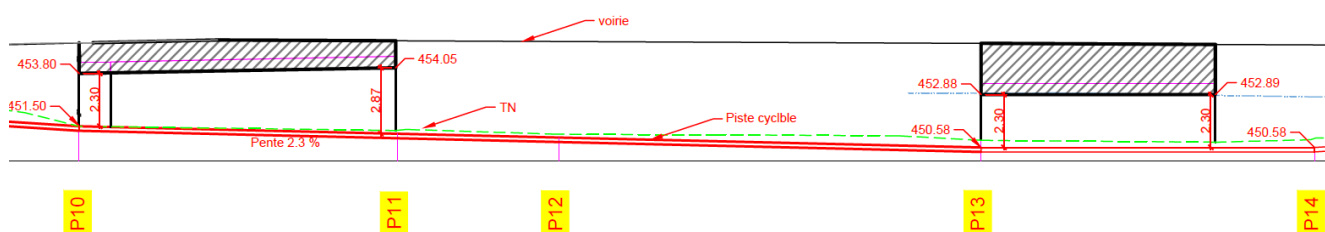


Figure 36 : Zone située entre les deux ponts – Elévation.

Le soutènement de la piste cyclable serait alors assuré par :

- Talus haut compris entre la voirie et la piste :
 - Les ouvrages GC constituant la culée RG des ponts au droit de ceux-ci ;
 - Un soutènement quasi vertical de type enrochements percolés existant entre les deux ponts ;
- Talus bas entre la piste et le Borne : un soutènement pentu à 3H/2V. Associé à la faible hauteur à reprendre, ceci implique la possibilité de mise en place d'une protection de berges en enrochements.

Aspect hydraulique :

D'après la modélisation hydraulique, la piste cyclable sur ce tronçon est située :

- Environ 50 cm au-dessus de la cote du niveau des eaux moyennes de Mai ;
- Environ 30 cm sous la cote Q_2 .

Dimensionnement :

Soutènement haut :

Le soutènement haut est déjà assuré par le soutènement en enrochements percolés existants et soutenant la voirie.

Le projet ne prévoit pas de modification significative des états de poussée/butée, tant et si bien que ce soutènement ne devrait pas être modifié. Ce point sera néanmoins à vérifier au stade PRO.

Soutènement bas :

Le talus bas présente une hauteur faible (de l'ordre de 1,1 m) qui serait pentu à maximum 3H/2V et protégé par des enrochements 300/1000 kg du même type que ceux utilisés sur les autres profils confortés.

Coupe type :

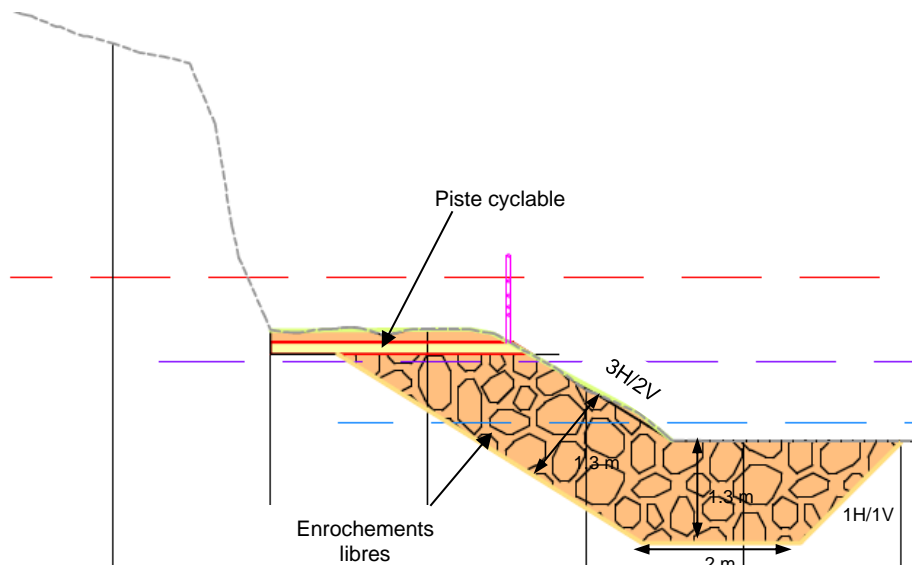


Figure 37 : RG-T0 – P11 à P13 – Coupe type (ici P11).

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.

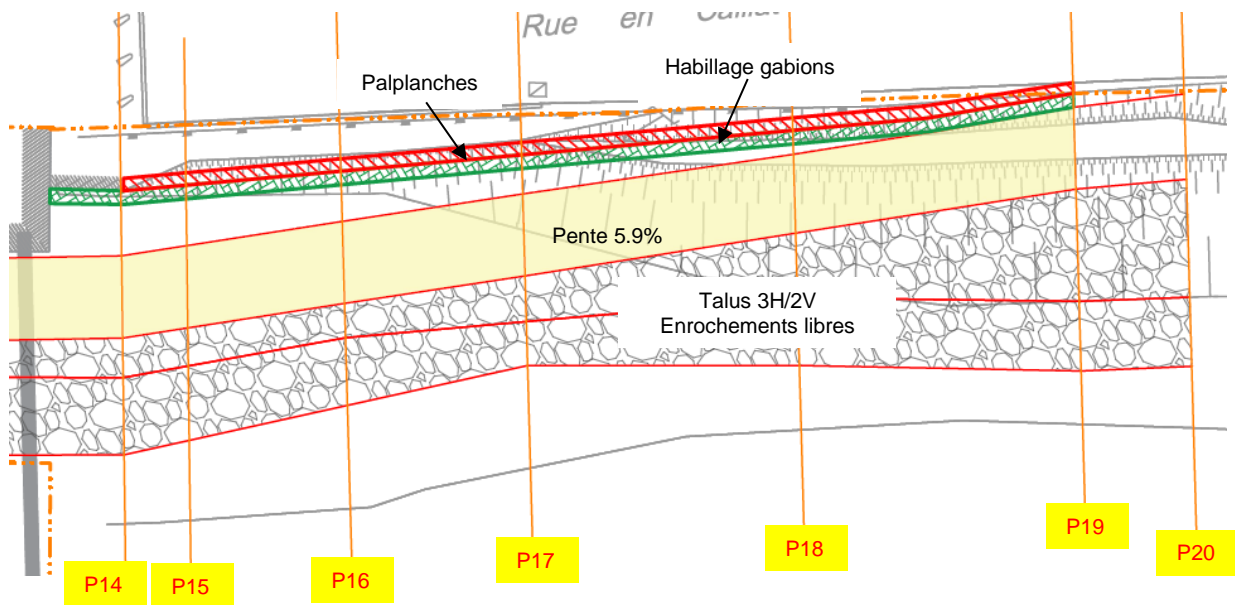


Figure 38 : Rampe aval – Vue en plan.

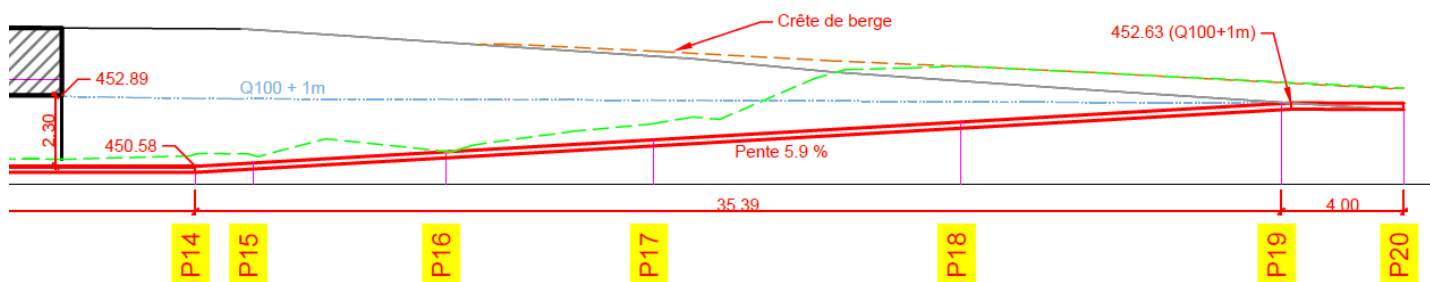


Figure 39 : Rampe aval – Elévation.

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.

Coupe type :

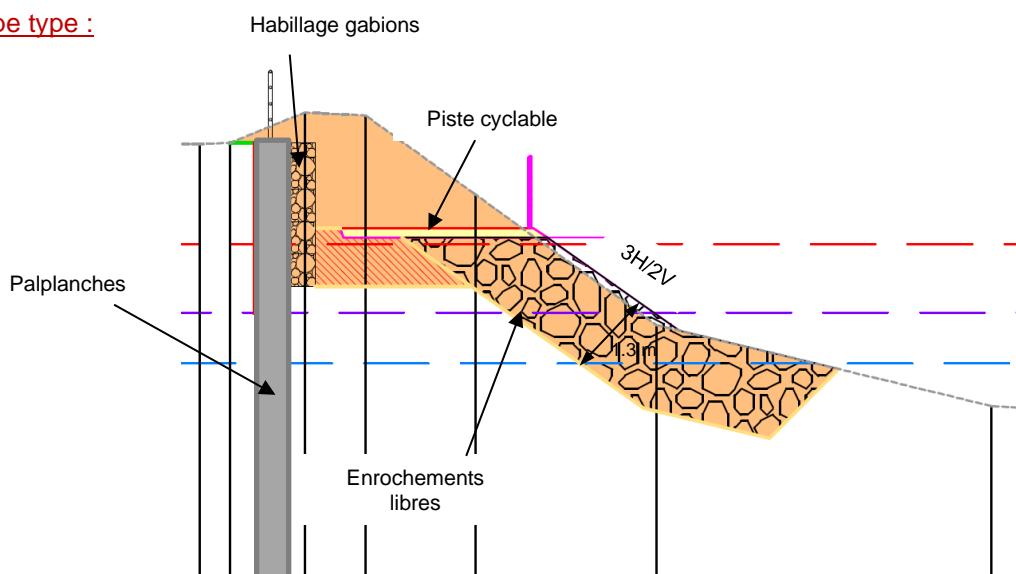


Figure 40 : RG-T1 – Coupe type (ici P18).

7.1.6.2 RG – T2

Dimensionnement :

Auto-stabilité :

Les palplanches sont dites autostables si elles sont en 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.

La modélisation Talren réalisée sur le profil 1285RG fait ressortir les résultats synthétiques suivants tandis que les résultats globaux sont présentés en Annexe 5.

Conditions	Amont – Glissement global	Amont – Glissement global – Palplanches
Niveau bas	1.01	-
Décrue – Cote de protection	1.08 / 1 ¹	1.03
Décrue – Cote de crue extrême	1.10 / 1.03 ¹	0.98

¹ : calcul pessimiste avec saturation maximale « à cœur » et désaturation linéaire amont / aval

Tableau 19 : Résultats Talren – Profil 1285RG.

A noter que le talus aval stable dans l'état actuel reste stable de par la mise en place de palplanches qui viennent constituer une coupure hydraulique et mécanique reprenant les efforts et contraintes.

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 dimensionnement général des épis est proposé dans le paragraphe § 7.1.2.

Le tableau suivant présente les moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté concernant les vitesses d'écoulement.

Situations		Etat actuel – Sans épis	Etat projeté – Avec épis	Différence
Vitesses en pied – Q ₁₀₀ (hors épi)	Max	3.50	3.42	- 0.08
	Min	2.18	2.12	- 0.08
	Moy	2.89	2.80	- 0.09
Vitesse en pied – Q ₁₀ (hors épi)	Max	2.96	2.93	- 0.03
	Min	1.82	1.82	0
	Moy	2.41	2.42	+ 0.01

Tableau 20 : RG-T2 – Confortement – Effet des épis.

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 4.12 m/s obtenue par modélisation après intégration des épis reste dans la gamme de celle utilisée pour le dimensionnement général de ces derniers proposé au paragraphe § 7.1.2. Ce dimensionnement reste donc valable et des enrochements de la classe 300/1000 kg devront être employés.

Coupe type :

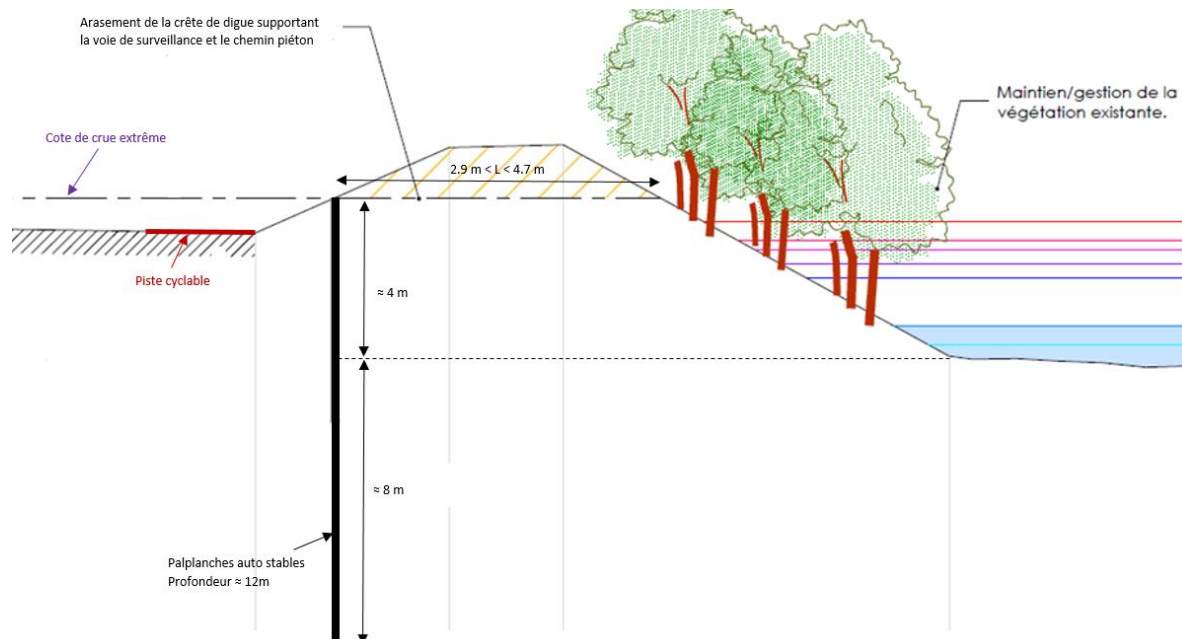


Figure 41 : RG-T2 – Confortement solution 1 – Coupe type.

7.1.6.3 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.

Voir § 7.1.6.2.

Coupe type :

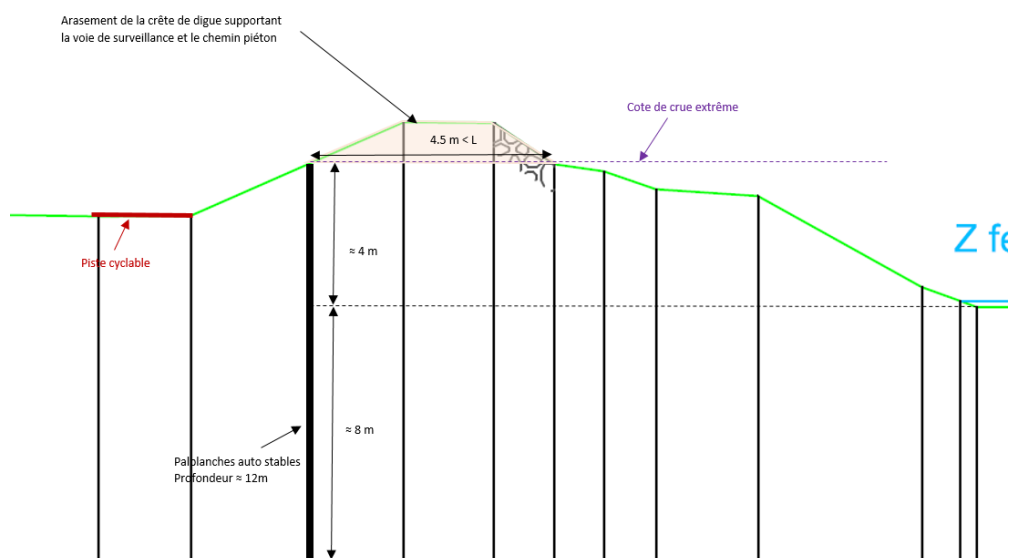


Figure 42 : RG-T3 – Confortement – Coupe type.

7.1.6.4 RG – T4

Dimensionnement :

Enveloppe géométrique :

La modélisation Talren réalisée sur le profil 774RG fait ressortir les résultats synthétiques suivants tandis que les résultats globaux sont présentés en Annexe 6.

Conditions hydrauliques	Profil 774RG – Etat actuel				Profil 774 RG – Confortement
	Amont – Glissement superficiel	Amont – Glissement global	Amont – Glissement jusqu'à nouvelle digue	Pied aval – Travaux – Pente 1.2H/1V	Aval – Pente 2.5H/1V
Niveau bas	0.68	0.96	1.31	1.01	1
Cote de protection	-	-	-	1.01	1.14
Cote de crue extrême	-	-	-	0.94 / 1.13*	1.07
Décruie – Cote de protection	0.74	1.03	1.39	-	-
Décruie – Cote de crue extrême	0.79	1.05	1.45	-	-

* : Calcul réalisé en effectuant la pondération sur les coefficients partiels « Extrême de crue »

Tableau 21 : Résultats Talren – Profil 774RG.

Cela montre que :

- La digue actuelle est sujette au glissement sans que la nouvelle digue ne soit intéressée par le glissement amont ;
- Le pied de digue aval pourra être rogné en phase travaux pour gagner de la place en vue de l'intégration de la nouvelle digue. La pente provisoire obtenue serait de l'ordre de 1.2H/1V avec une attention en cas de crue annoncée à ne pas réaliser ce décaissement ;
- Le talus aval sera stable pour une pente inférieure à 2.5H/1V.

En cas d'espace foncier insuffisant pour la mise en place d'une digue de talus aval 2.5H/1V, ce dernier pourra être raidi par l'emploi de renforcements en géogrilles. A ce stade, d'après le cadastre, il serait nécessaire de raidir le talus aval jusqu'à 1.8H/1V environ.

En conclusions, 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.

Matériaux :

Idem § 7.1.5.3.

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.

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 dimensionnement général des épis est proposé dans le paragraphe § 7.1.2.

Le tableau suivant présente les moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté concernant les vitesses d'écoulement.

Situations		Etat actuel – Sans épis	Etat projeté – Avec épis	Différence
Vitesses en pied – Q ₁₀₀ (hors épi)	Max	3.51	3.55	+ 0.04
	Min	2.22	2.05	- 0.17
	Moy	3.00	2.88	- 0.12
Vitesse en pied – Q ₁₀ (hors épi)	Max	2.95	2.90	- 0.05
	Min	1.74	1.55	- 0.19
	Moy	2.49	2.34	- 0.15

Tableau 22 : RG-T4 – Confortement – Effet des épis.

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 D₅₀ de 54 cm soit un W₅₀ de 310 kg.

Pour ces épis, des enrochements de type 300/1000 kg pourrait être utilisés, comme proposé dans le dimensionnement général des épis derniers proposé au paragraphe § 7.1.2.

Coupe type :

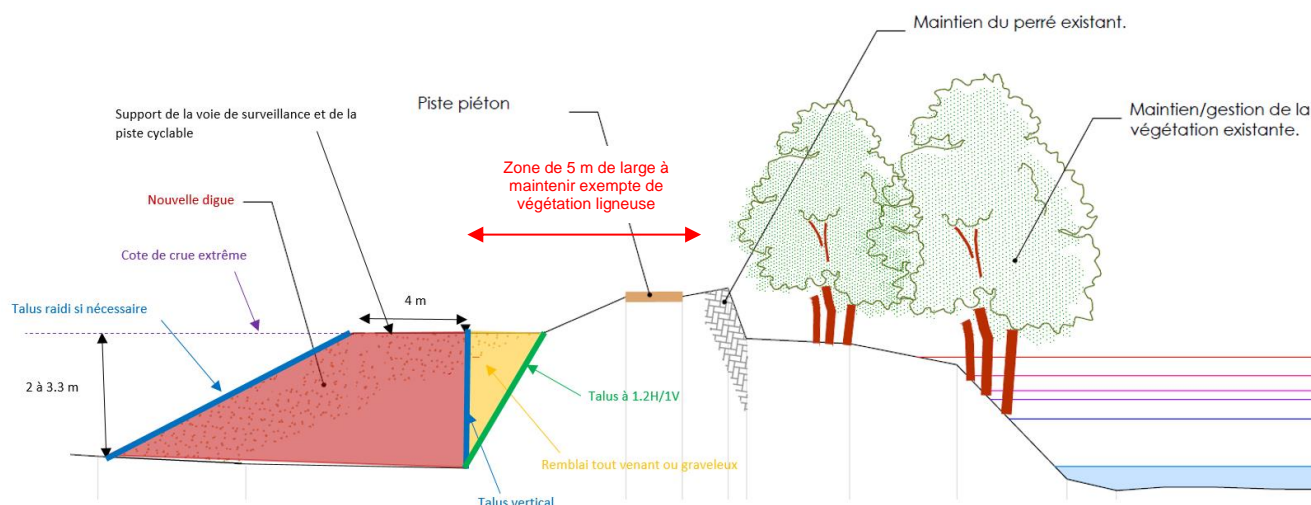


Figure 43 : RG-T4 – Confortement – Coupe type.

7.1.6.5 RG – T5

Dimensionnement :

Enveloppe géométrique :

La modélisation Talren réalisée sur le profil 465RG fait ressortir les résultats synthétiques suivants tandis que les résultats globaux sont présentés en Annexe 7.

Conditions hydrauliques	Profil 465RG – Etat actuel				Profil 465 RG – Confortement
	Amont – Glissement partiel	Amont – Glissement global	Amont – Glissement jusqu'à nouvelle digue	Pied aval – Travaux – Pente 1.2H/1V	Aval – Pente 2.5H/1V
Niveau bas	0.65	0.68	1.22	1.05	1.10
Cote de protection	-	-	-	0.97	1.18
Cote de crue extrême	-	-	-	0.89 / 1.07*	1.26
Décruie – Cote de protection	0.72	0.75	1.24	-	-
Décruie – Cote de crue extrême	0.69	0.72	1.25	-	-

* : Calcul réalisé en effectuant la pondération sur les coefficients partiels « Extrême de crue »

Tableau 23 : Résultats Talren – Profil 465RG.

Cela montre que :

- La nouvelle digue, si elle est directement adossée à la digue existante, sera intéressée par le glissement amont. Comme pour le tronçon précédent, elle est réalisée de manière déportée ce qui fait qu'elle se situe en dehors de la loupe de glissement ;
- Le pied de digue aval pourra être rogné en phase travaux pour gagner de la place en vue de l'intégration de la nouvelle digue. La pente provisoire obtenue sera de l'ordre de 1.2H/1V avec une attention en cas de crue annoncée à ne pas réaliser ce décaissement ;
- Le talus aval sera stable pour une pente inférieure à 2.5H/1V.

L'espace foncier ainsi dégagé ne devrait pas permettre de respecter le critère de pente pour le talus val qui devrait être raidi jusqu'à la pente d'environ 1,75H/1V.

En conclusions, 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 § 7.1.6.4.

Matériaux :

Idem § 7.1.5.3.

Remblai renforcé :

Le renforcement du remblai par géogrilles devra être réalisé au stade exécution par l'entreprise de travaux en utilisant les en vigueur.

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 dimensionnement général des épis est proposé dans le paragraphe § 7.1.2.

Le tableau suivant présente les moyennes obtenues sur ce tronçon aux états actuel et projeté concernant les vitesses d'écoulement.

Situations		Etat actuel – Sans épis	Etat projeté – Avec épis	Différence
Vitesses en pied – Q ₁₀₀ (hors épi)	Max	3.30	3.29	- 0.01
	Min	2.09	1.93	- 0.16
	Moy	2.61	2.61	0
Vitesse en pied – Q ₁₀ (hors épi)	Max	2.78	2.80	+ 0.02
	Min	1.76	1.48	- 0.28
	Moy	2.20	2.18	- 0.02

Tableau 24 : RG-T5 – Confortement – Effet des épis.

Les épis ne réduisent pas significativement les vitesses d'écoulement en pied de digue. Leur utilité reste donc uniquement bioécologique et non pas structurale. 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 3.29 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.

Coupe type :

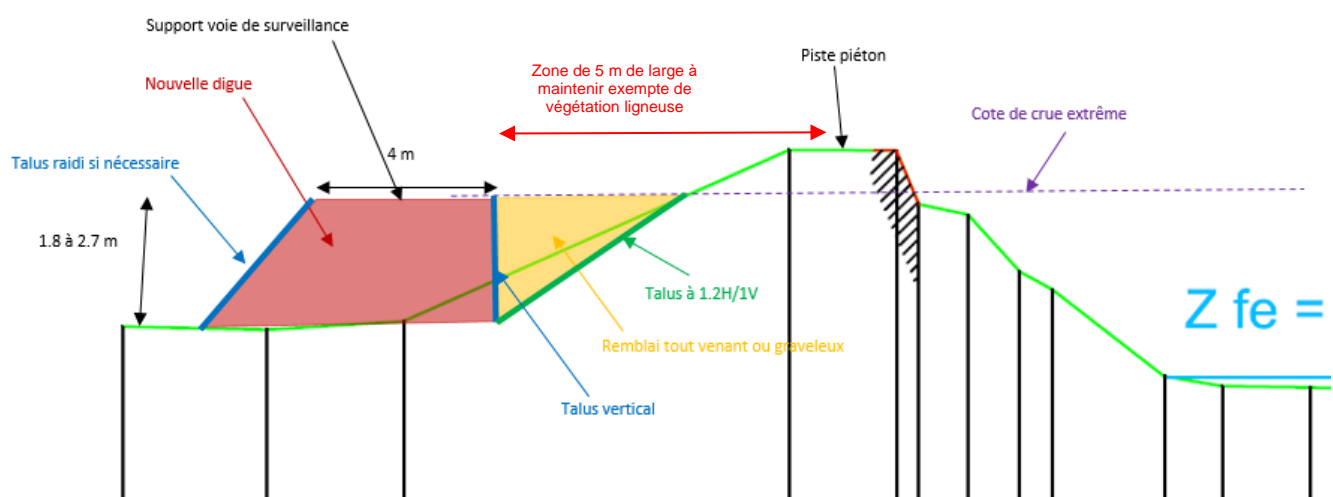


Figure 44 : RG-T5 – Confortement – Coupe type

7.1.6.6 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 : Idem § 7.1.5.3.
- Hauteur enrochements : Idem § 7.1.5.3.

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 l'Annexe 8.

Conditions	Amont – Glissement global	Amont – Glissement superficiel	Aval – Glissement global
Niveau bas	1.09	1.00	1.02
Cote de protection	-	-	1.18
Cote de crue extrême	-	-	1.27
Décru – Cote de protection	1.14	1.09	-
Décru – Cote de crue extrême	1.21	1.05	-

Tableau 25 : Résultats Talren – Profil 426RG.

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 § 7.1.5.3.

Drainage :

Idem § 7.1.5.3.

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 œuvre 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).

Coupe type :

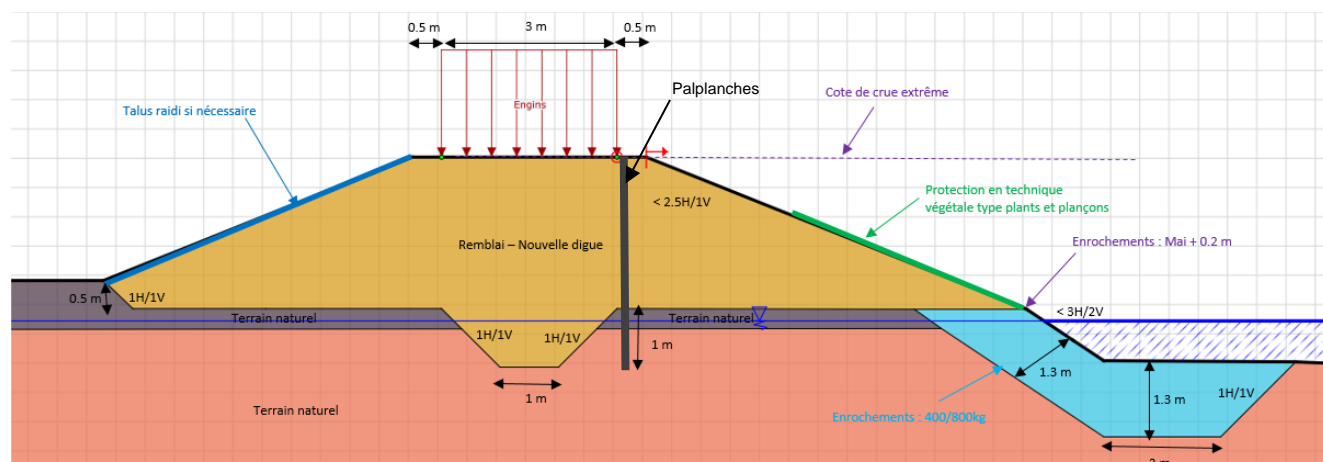


Figure 45 : RG-T6 – Confortement – Coupe type.

7.1.6.7 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 associée à une crue de période de retour 30 ans de l'Arve. Ce modèle s'appuie sur le plafond actuel du Borne.

Hors, la modification de la zone de confluence (seuils et élargissement du lit du Borne) viendront 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.

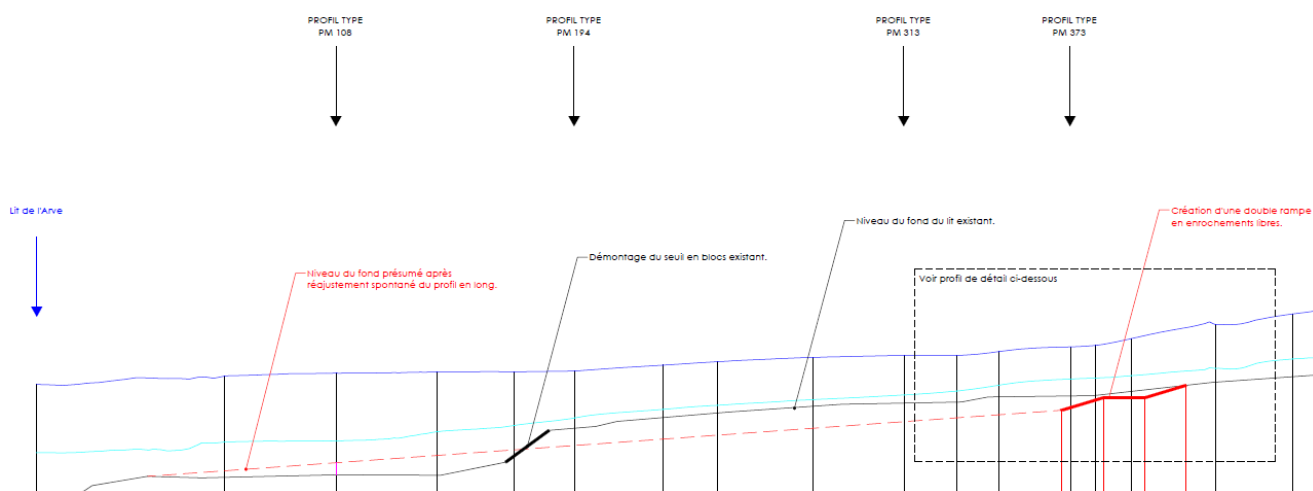


Figure 46 : Profil en long du Borne conforté – Tronçon aval au PM400.

Ainsi, la cote de crue extrême considérée pour le dimensionnement des ouvrages des tronçons RG-T7 à T9 :

- Restera vraisemblablement valide et conservatrice 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 engravement 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. Le tableau suivant synthétise les résultats de calcul obtenus pour la géométrie retenue tandis que les résultats globaux sont disponibles dans l'Annexe 9.

Profil	Glissement aval			Glissement amont		
	Pente 2H/1V	Pente 2.5H/1V	Pente 3H/1V	Pente 2H/1V	Pente 2.5H/1V	Pente 3H/1V
Niveau bas	0.88	1.09	1.33	0.86	1.06	1.27
Cote de protection	1.01	1.23	1.34	-	-	-
Cote de crue extrême	1.11	1.22	1.36	-	-	-
Décrué – Cote de protection	-	-	-	0.98	1.21	1.44
Décrué – Cote de crue extrême	-	-	-	0.95	1.14	1.31

Tableau 26 : Résultats Talren – Profil P1RG.

Il est donc 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 § 7.1.5.3.

Drainage :

Idem § 7.1.5.3.

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.

¹ Ce profil n'est pas localisé par son point métrique (PM) mais de manière arbitraire, du fait de la modification du profil en long général de l'ouvrage d'endiguement RG du Borne.

Coupe type :

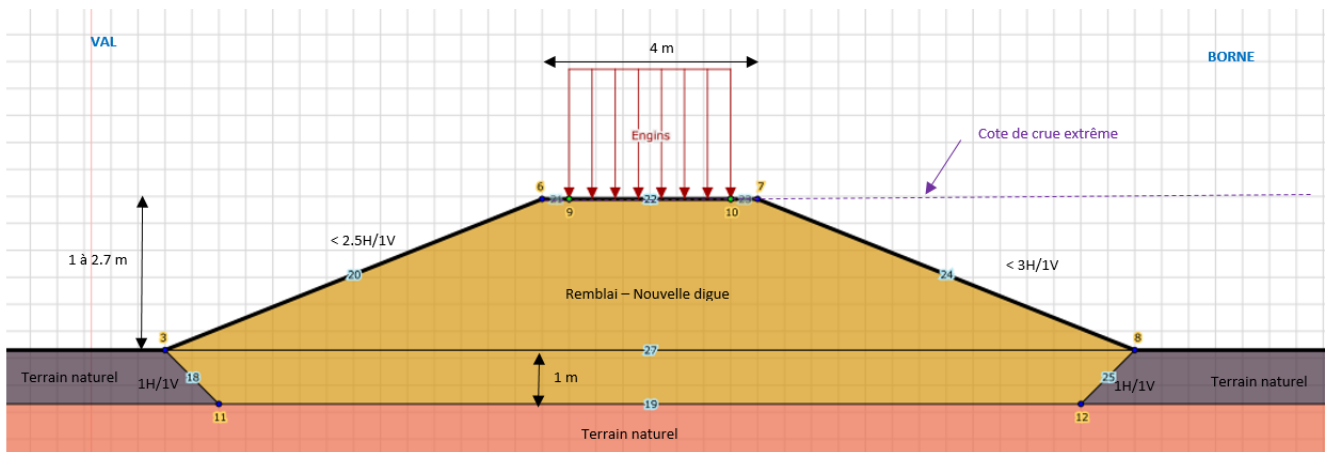


Figure 47 : RG-T7 – Confortement – Coupe type.

7.1.6.8 RG – T8

Dimensionnement :

Cote de crue extrême !

Voir § 7.1.6.7.

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurale Talren a été réalisée sur le profil du PM145 conforté. 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 l'Annexe 10.

Profil	Glissement aval Pente 2.5H/1V	Glissement amont
Niveau bas	1.14	1.45
Cote de protection	1.30	-
Cote de crue extrême	1.34	-
Décru – Cote de protection	-	1.41
Décru – Cote de crue extrême	-	1.41

Tableau 27 : Résultats Talren – Profil 145RG.

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 § 7.1.5.3.

Drainage :

Idem § 7.1.5.3.

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.

Coupe type :

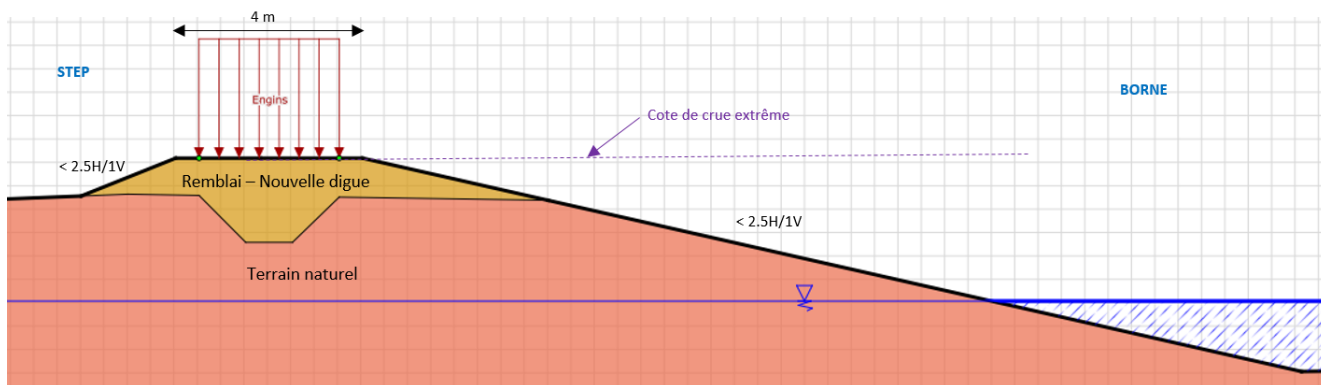


Figure 48 : RG-T8 – Confortement – Coupe type.

7.1.6.9 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 :

Voir § 7.1.6.7.

Enveloppe géométrique :

L'ébauche dimensionnelle structurelle Talren a été réalisée sur le profil théorique 115RG. 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 l'Annexe 13.

Profil	Glissement aval Pente 2.5H/1V	Glissement amont	
		Superficiel	Global
Niveau bas	1.22	1.07	1.29
Cote de protection	1.38	-	-
Cote de crue extrême	1.48	-	-
Décrué – Cote de protection	-	1.22	1.21
Décrué – Cote de crue extrême	-	1.22	1.18

Tableau 28 : Résultats Talren – Profil 115 RG.

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 § 7.1.5.3.

Drainage :

Idem § 7.1.5.3.

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. Ainsi, la conclusion du paragraphe § 7.1.6.7 reste valable.

Coupe type :

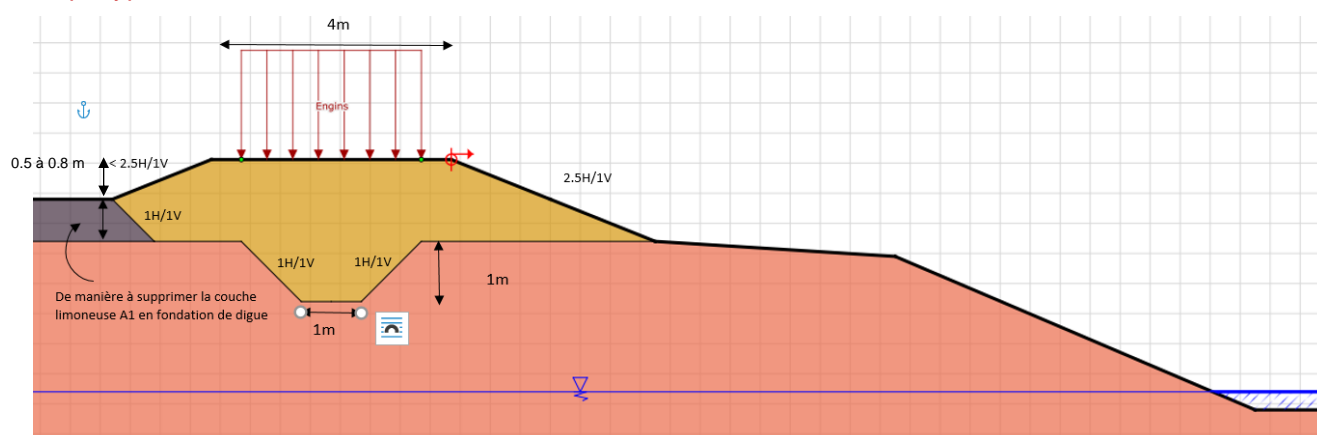


Figure 49 : RG-T8 – Confortement – Coupe type.

7.2 Ebauche hydrogéologique

Ce paragraphe utilise les conclusions issues de l'ébauche dimensionnelle structurale afin d'évaluer la faisabilité hydrogéologique des ouvrages.

7.2.1 Méthodologie

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.

7.2.1.1 Loi de Kozeny

Globalement, les ouvrages du Borne actuels et projetés se comportent comme des digues homogènes sans drain fondées sur un horizon perméable.

Kozeny a alors démontré que la ligne de saturation peut alors être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal dont le foyer O est situé en pied aval de la digue. Cette parabole est corrigée aux extrémités amont et aval de telle façon que la ligne de saturation présente la forme suivante.

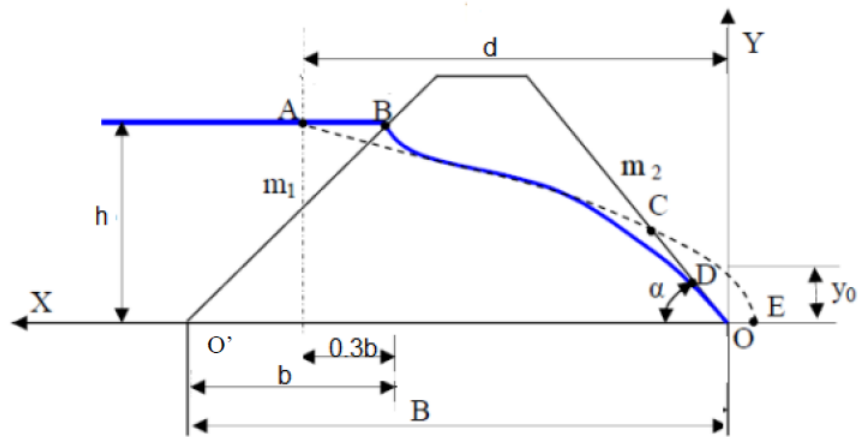


Figure 50 : Ligne de saturation pour une digue homogène sans drainage aval.

Il est alors possible de trouver l'emplacement du point D, point de résurgence sur le parement aval, en utilisant la formule suivante :

$$OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha}$$

Par soucis de simplification et du fait des dimensions restreintes des ouvrages actuels et projetés (hauteur < largeur de crête), il est considéré que la ligne de saturation s'établit comme étant une droite entre les points B et O qui constitue alors le point de résurgence aval.

7.2.1.2 Loi de Darcy

Cette loi s'applique sur le fait qu'un écoulement existe en milieu poreux saturé lorsqu'il y a un gradient hydraulique qui génère un écoulement. Elle s'écrit alors (Schlosser 1988, Degoutte et Royet 1999) :

$$V = Ki$$

Avec v : vitesse d'écoulement en m/s et K : coefficient de perméabilité en m/s.

Le tableau suivant donne un ordre de grandeur des perméabilités en fonction du type de matériau (Schlosser 1988).

Type de sol	Perméabilité	Ordre de grandeur (m/s)
Argile compacte	Imperméable	10^{-9} à 10^{-12}
limon	Très faible	10^{-7} à 10^{-9}
Sables très fin	Faible	10^{-5} à 10^{-7}
Petits graviers, sables	Assez élevée	10^{-3} à 10^{-5}
Gravier moyens à gros	Très élevée	10^{-1} à 10^{-2}

Cette approche se veut conservative dans notre cas de figure puisque les ouvrages du Borne sont des digues sèches permettant la protection face aux inondations pour des crues transitoires, elles ne sont donc pas saturées.

Pour ce cas d'étude, nous utiliserons la loi de Darcy de façon inversée de manière à déterminer, à partir du gradient hydraulique, de la géométrie des ouvrages et des hydrogrammes de crue, la perméabilité que le matériau employé pour réaliser les ouvrages devra présenter.

7.2.2 Evaluation temps de percolation

Les tableaux suivants présentent synthétiquement les résultats des temps de percolation calculés en considérant :

- Un matériau de remblai utilisé pour la constitution des nouveaux ouvrages de coefficient de perméabilité de 10^{-3} et 10^{-4} m/s ;
- Un niveau d'eau constant à la cote de protection ;
- Une saturation des remblais.

Rive droite :

Tronçon	PM critique	dH (m)	dL (m)	k = 10^{-3} m/s		k = 10^{-4} m/s		Commentaire
				V Darcy (m/s)	Tperco (h)	V Darcy (m/s)	Tperco (h)	
RD-T1	1176	1.43	6.99	$2.05 \cdot 10^{-4}$	9.7	$2.05 \cdot 10^{-5}$	97	Calcul réalisé sans considérer le mur aval qui rallonge les chemins d'écoulement
RD-T2	1076	1.27	5.57	$2.28 \cdot 10^{-4}$	7	$2.28 \cdot 10^{-5}$	70	Calcul réalisé sans considérer le mur aval qui rallonge les chemins d'écoulement
RD-T3&4	553	1.33	7.97	$1.67 \cdot 10^{-4}$	13.45	$1.67 \cdot 10^{-5}$	134.5	
RD-T5	350	0.2	2	$1.1 \cdot 10^{-4}$	5.6	$1.1 \cdot 10^{-5}$	56	
RD-T6	Sans objet – Laissé inondable pour la cote de crue extrême							
RD-T7	Sans objet – Laissé inondable pour la cote de crue extrême							

Tableau 29 : Evaluation des temps de percolation critiques – RD.

Rive gauche :

Tronçon	PM critique	dH (m)	dL (m)	k = 10^{-3} m/s		k = 10^{-4} m/s		Commentaire
				V Darcy (m/s)	Tperco (h)	V Darcy (m/s)	Tperco (h)	
RG-T(-1) à T1	Sans objet – Fonctionnement en berge pour la cote de crue extrême							
RG-T2&3 – Palplanches	Sans objet – Coupure hydraulique apportée par les palplanches							
RG-T4	722	3.27	9.43	$3.47 \cdot 10^{-4}$	8	$3.47 \cdot 10^{-5}$	80	Calcul avec talus aval raidi de manière à intégrer l'ouvrage dans l'emprise foncière
RG-T5	507	2.51	8.65	$2.9 \cdot 10^{-4}$	8.6	$2.9 \cdot 10^{-5}$	86	Calcul avec talus aval raidi de manière à intégrer l'ouvrage dans l'emprise foncière
RG-T6	426	1.99	7.35	$2.7 \cdot 10^{-4}$	7.8	$2.7 \cdot 10^{-5}$	78	
RG-T7	300	2.51	11	$2.28 \cdot 10^{-4}$	13.7	$2.28 \cdot 10^{-5}$	137	
RG-T8	183	0.93	6.33	$1.47 \cdot 10^{-4}$	12.1	$1.47 \cdot 10^{-5}$	121	
RG-T9	85	0.75	5.88	$1.28 \cdot 10^{-4}$	12.9	$1.28 \cdot 10^{-5}$	129	

Tableau 30 : Evaluation des temps de percolation critiques – RG.

7.2.3 Interprétation et conclusions

Le graphique suivant illustre le limnigramme de la crue centennale à divers PM du Borne.

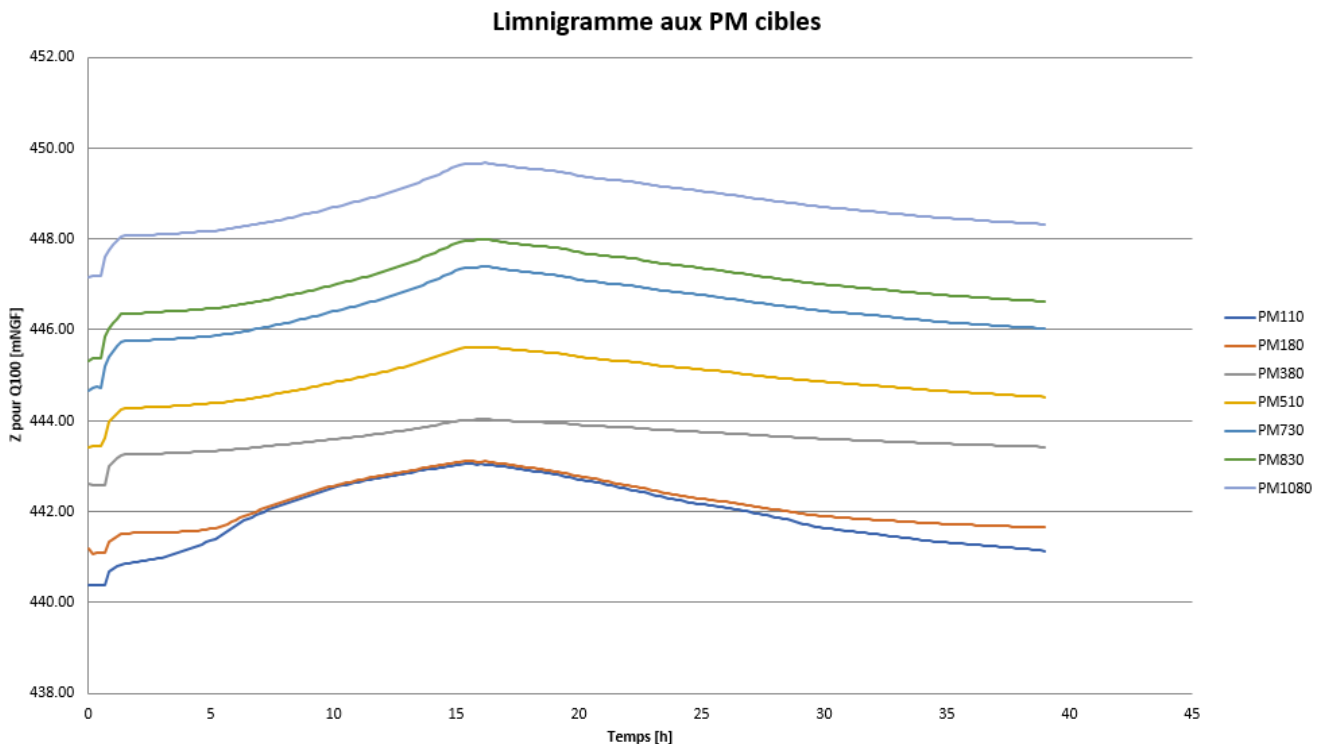


Figure 51 : Limnigrammes pour Q₁₀₀.

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.

L'approche idéale consisterait à comparer pour toute charge ce temps de percolation avec le temps de passage de la crue et à vérifier que la crue se termine avant que le phénomène de percolation en milieu poreux débouche sur l'apparition d'une résurgence en pied aval, c'est-à-dire :

$$T_{Perco} > T_{passage\ crue}$$

De manière simplifiée, deux approches sont proposées :

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.
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 ;

Rive droite :

PM	Tperco		Tcrue	
	K=10-3 m/s	K=10-4 m/s	1	2
110	Sans objet – Laissé inondable pour la cote de crue extrême			
180				
380	4.27	42.7	23.5	16.5
510	13.67	136.7	52.35	37.3
730	11.92	119.2	17.95	12.5
830	9.16	91.6	15.97	11.16
1080	6.96	69.6	28.83	20.5

Tableau 31 : Comparaison temps de percolation / crue – RD.

Rive gauche :

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

Tableau 32 : Comparaison temps de percolation / crue – RG.

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.

A noter toutefois pour la rive gauche que la prise en compte d'une ligne d'eau atteignant la cote de crue extrême (mobilisation de l'ensemble de la revanche de 1 m) revient à considérer que la digue n'est plus une digue sèche mais une digue en charge (même faible) constante. Dans ce cas de figure, le dimensionnement des ouvrages peut être à revoir de manière à intégrer ce point (drainage aval ?).

7.3 Conclusions

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 proposé de mettre en œuvre un géotextile anti contaminant et filtrant à ces interfaces, notamment les interfaces enrochements/remblai et enrochements/TN.

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 ;
- $\varphi' = 30^\circ$;
- $\gamma = 20$ kN/m³ ;
- $k = 10^{-4}$ m/s.

Les résultats des reconnaissances 2020-21 devront permettre de statuer sur la possibilité de réemploi des déblais pour la réalisation des nouveaux ouvrages.

Enrochements :

Les enrochements devront présenter les caractéristiques physiques minimales suivantes :

- Blocométrie 300/1000 kg
- $c' = 0$ kPa ;
- $\varphi' = 45^\circ$;
- $\gamma = 26$ 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 seront dimensionnées au stade PRO en fonction notamment des résultats des reconnaissances géotechniques de 2020-2021.

En première approche, il est possible de considérer des palplanches de type PU12 pour les coupures peu profondes (< 5 m) et des PU18 pour des coupures visant à obtenir une auto-stabilité des palplanches.

8 RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES ADDITIONNELLES – PRO

En continuation de l'avancement du projet et des solutions proposées au stade d'Avant-Projet et afin d'être en mesure de préciser l'ébauche dimensionnelle proposée dans le paragraphe précédent, un programme de reconnaissances géotechniques complémentaires a été établi puis était en cours de réalisation à la date de rédaction de cette étude. L'objectif est d'exploiter les résultats de ces reconnaissances au PRO pour préciser l'ébauche dimensionnelle.

Reconnaisances sur site – Programme prévisionnel :

Le tableau suivant détaille le programme prévisionnel de reconnaissances in situ prévues au marché.

Rive	Système	Tronçon	PM	Type de sondage	Profondeur (m / TA)	Essai in situ	
Droite	Bois Jolivet B	RD-T1	1232	Destructif	7 m	6 essais pressiométriques	
		RD-T2	1150	Carotté	8 m	2 essais de perméabilité	
	Queue du Borne	RD-T4	500	Pelle mécanique	Jusqu'au refus	-	
			450	Pelle mécanique	Jusqu'au refus	-	
		RD-T5	291	Pelle mécanique	Jusqu'au refus	-	
			220	Destructif	8 m	7 essais pressiométriques	
		RD-T7	Confluence	Pelle mécanique	Jusqu'au refus	-	
	Gauche	Toisings	RG-T1	1333	Destructif	15 m	14 essais pressiométriques
			RG-T2	1160	Destructif	15 m	14 essais pressiométriques
			RG-T4	673	Carotté	8 m	2 essais de perméabilité
STEP		RG-T5	560	Carotté	8 m	2 essais de perméabilité	
				Destructif	13 m	12 essais pressiométriques	
		RG-T7 (Digue détruite)	320	Pelle mécanique	Jusqu'au refus	-	
			210	Pelle mécanique	Jusqu'au refus	-	
		RG-T7 (Nouvelle digue)	Forêt	Pelle mécanique	Jusqu'au refus	1 essai de perméabilité Matsuo	
Proche STEP			Pelle mécanique	Jusqu'au refus	1 essai de perméabilité Matsuo		
		Destructif	6 m	5 essais pressiométriques			

	RG-T8/9	140	Carotté	8 m	2 essais de perméabilité
--	---------	-----	---------	-----	--------------------------

Tableau 33 : Reconnaissances géotechniques – Phase terrain – Programme prévisionnel.

Reconnaissances sur site – Localisation :

La vue en plan localisant les sondages programmés est donnée en Annexe 16.

Essais laboratoire – Programme prévisionnel :

Le tableau suivant détaille les essais laboratoire prévus au marché. Les reconnaissances étant en cours au moment de la rédaction de cette étude, il ne précise pas les échantillons testés. Ceci sera à intégrer lors de l'exploitation des résultats prévues au stade PRO via l'étude de G2PRO.

Type d'essai	Nombre	Objectif recherché
Teneur en eau	28	Classification, identification et description des matériaux
Masse volumique des particules solides	28	
Analyse granulométrique par tamisage	28	
Sédimentométrie	10	
Limites d'Atterberg	10	
Valeur au Bleu	18	
Analyse pour déchets inertes (ISDI)	10	Pollution
Teneur en matière organique	8	Propreté des matériaux en vue d'un réemploi
Essai Proctor	10	Conditions de réemploi des matériaux (Optimum Proctor) + Utilisation comme données d'entrée pour essais de Casagrande grande boîte
Essai Casagrande normalisé	4	Détermination des caractéristiques géomécaniques
Essai Casagrande grande dimension	3	Détermination des caractéristiques géomécaniques
Essai œdométrique	2	Détermination des caractéristiques géomécaniques pour évaluation du tassement

Tableau 34 : Reconnaissances géotechniques – Phase laboratoire – Programme prévisionnel.

Résultats :

Les résultats seront exploités dans le rendu d'étude G2PRO.

Ceux-ci pourront être complétés par d'éventuelles nouvelles reconnaissances en fonction de l'avancement des études et des besoins identifiés au stade Projet (PRO).

ANNEXE

Annexe 1 : Modélisation hydraulique – Lignes d’eau projet

Annexe 2 : Profil 507RD – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 3 : Profil 373RD – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 4 : Profil 341RD – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 5 : Profil 1285RG – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 6 : Profil 774RG – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 7 : Profil 465RG – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 8 : Profil 426RG – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 9 : Profil P1RG – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 10 : Profil 115RG – Confortement – Modélisation Talren

Annexe 11 : Cadastre

Annexe 12 : Reconnaissances géotechnique 2020/21 – Localisation des sondages

Annexe 13 : Etude de sensibilité – Modélisation Talren

L'énergie au cœur des territoires

2 rue André Bonin
69316 LYON CEDEX 04 - FRANCE
Tél. : +33 (0) 472 00 69 69

cnr.tm.fr

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

