

# ETUDE DE DANGER DES DIGUES DE LA LEYSSE ET DE L'HYERES

# Rapport de diagnostic SE2





Page 1/64 Juin 2016

# **ETUDE DE DANGER DES DIGUES DE LA LEYSSE ET DE** L'HYERES

### Rapport de diagnostic SE2

DI-ECS 2016-182-00 Juin 2016

INTERLOCUTEUR DI	Sophie Trossat - 04 26 23 17 79
	CNR Ingénierie DI-ECS 2 rue André Bonin, 69316 Lyon cedex 04

MAITRE D'OUVRAGE	CHAMBERY METROPOLE - Direction de la gestion des cours d'eau et protection contre les crues					
ADRESSE	350 Quai Charles Ravet, 73000 Chambéry					
INTERLOCUTEUR						
RÉFÉRENCE DU CONTRAT						
NIVEAU DE CONFIDENTIALITÉ		CONFIDENTIEL		INTERNE	$\boxtimes$	PUBLIC

CONTRÔLE QUALITÉ	NOM	DATE	SIGNATURE
RÉALISÉ PAR	Joël RECCO	Juin 2016	The
VÉRIFIÉ PAR	Sophie TROSSAT	Juin 2016	-
APPROUVÉ PAR	Sophie TROSSAT	Juin 2016	a

HISTORIQUE DU DOCUMENT					
INDICE	DATE	DÉSIGNATION DE LA RÉVISION			
-00	01/06/2016	Version initiale			

### SOMMAIRE

1 OBJET DU DOCUMENT	11
2 DESCRIPTION DES OUVRAGES	12
2.1 Vue d'ensemble	12
2.2 Inspection visuelle	15
3 ANALYSE DES DONNÉES	16
3.1 Analyse structurelle et topographique	
3.1.1 SE 2.1	
3.1.2 SE 2.2 aval	
3.1.3 SE 2.3	22
3.2 Campagne géophysique	
3.2.1 SE 2.1	
3.2.2 SE 2.2 aval	24
3.2.3 SE 2.3	24
3.3 Reconnaissances géotechniques	25
3.3.1 SE 2.1	25
3.3.2 SE 2.2 aval	25
3.3.3 SE 2.3	27
4 HYPOTHÈSES HYDRAULIQUES	
4.1 Hydrologie du secteur	
4.1.1 Analyse des crues	
4.1.2 Crues récentes et désordres associés	
4.2 Niveaux en amont de la digue	
4.3 Niveaux de saturation en aval de la digue	
	21
5 STABILITE AU GLISSEMENT – DIGUES EN TERRE	
5.1 SE 2.1	
5.1.1 Coupes etudiees	
5.1.2 Donnees geolecinniques retenues	
5.1.3 Resultats des calculs	
5.1.4 Conclusion – Stabilite du glissement	
5.2 SE 2.2 dVdl	
5.2.1 Coupes eludices	
5.2.2 Donnees geolechniques recentes	
5.2.5 Resultuts des culculs	
5.2.4 Conclusion - Stubilite du glisserilent	40
5.3 J. Coune étudiée	
5.3.1 Coupe etables	
5 3 3 Résultats des calculs	
5.3.4 Conclusion – Stabilité au alissement	
0 ENKACINEIVIENT DES AKBRES DANS LA DIGUE	41
7 SATURATION DES DIGUES	43
7.1 Calculs	
7.1.1 SE 2.1	43
7.1.2 SE 2.2 aval	43
7.1.3 SE 2.3	44
8 ÉROSION INTERNE – DIGUES EN TERRE	44
8.1 Définition	
8.2 Méthodologie et profils types	

8.3 Érosion par suffusion	
8.3.1 Méthodes d'évaluation	46
8.3.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion par suffusion du système d'endiguement 2	47
8.4 Érosion de contact	50
8.4.1 Méthodes d'évaluation	50
8.4.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion de contact du système d'endiguement 2	51
8.5 Érosion de conduit	52
8.5.1 Méthode d'évaluation	52
8.5.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion de conduit	52
8.6 Critère de Lane	54
8.7 Claquage hydraulique	56
8.8 Érosion régressive	57
8.8.1 Méthodes d'évaluation	57
8.8.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion régressive	57
8.9 Synthèse de l'érosion interne	57
9 Erosion externe du talus amont	
9.1 Affouillement	
9.1.1 Système 2.1	60
9.1.2 Système 2.2 aval	60
9.1.3 Système 2.3	60
9.2 Erosion externe du talus amont	60
9.2.1 Système 2.1	61
9.2.2 Système 2.2 aval	61
9.2.3 Système 2.3	62
	62
10 SYNTHESE	62
10 SYNTHESE 10.1 Système 2.1	
10 SYNTHESE   10.1 Système 2.1   10.2 Système 2.2 aval   10.3 Système 2.3	

### **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Zone protégée et écoulements – SE 2	12
Figure 2 : Système 2.1 - digue RD de la Leysse	13
Figure 3 : Système 2.2 aval - Digue RD de la Leysse	14
Figure 4 : Système 2.3 – Digue RD du bras de décharge de la Leysse	15
Figure 5 : Profil topographique – système 2.1 – PKL 8.83 – STTP60	17
Figure 6 : Profil topographique – système 2.1 – PKL 8.91 – STTP57	17
Figure 7 : Profil topographique – système 2.1 – PKL8.88 – STTP59	18
Figure 8 : Profil topographique secteur Jean Lain – système 2.2 aval – PKL5.444 – PM720	19
Figure 9 : Profil topographique secteur rond-point Villarcher – système 2.2 aval – PKL4.981 – PM1	30019
Figure 10 : Profil topographique secteur Villarcher - système 2.2 aval – PKL4.653 – PM1600	20
Figure 11 : Profil topographique secteur double digue - système 2.2 aval – PKL4.208 – PM2050	20
Figure 12 : Profil topographique secteur Double Digue – système 2.2 aval – PKL4.145 – PM2130	21
Figure 13 : Profil topographique secteur Tremblay – système 2.2 aval – PKL3.543 – PM2680	21
Figure 14 : Profil topographique système 2.3 – CD112.5 – PKBDL0.005 – PM2450	23
Figure 15 : Profil géotechnique (Geotech1) – SE 2.1	25
Figure 16 : Profil géotechnique (Geotech2) – SE 2.1	25
Figure 17 : Profil géotechnique (Geotech1) – Secteur topographique Bras de décharge de la Ley	sse – SE 2.3 28
Figure 18 : Hydrogramme de la Leysse et ces principaux affluents pour la crue de 1990	29
Figure 19 : Geotech1 – STTP57 – PKL8.91 - Modèle TALREN	32
Figure 20 : Geotech1 – STTP59 – PKL8.88 – Modèle TALREN	33
Figure 21 : Geotech2 – STTP57 – PKL8.91 – Modèle TALREN	33
Figure 22 : Geotech2 – STTP59 – PKL8.88 – Modèle TALREN	33
Figure 23 : Geotech1 – secteur Jean Lain PKL5.444 - Modèle TALREN	35
Figure 24 : Geotech2 – secteur Rond-Point Villarcher PKL4.981 – Modèle TALREN	36
Figure 25 : Geotech3 – secteur Villarcher PKL4.208 – Modèle TALREN	36
Figure 26 : Geotech3 - secteur Villarcher PKL4.653 – Modèle TALREN	36
Figure 27 : Geotech4 – secteur Tremblay PKL3.543 – Modèle TALREN	27
Figure 28 : Geotech5 – secteur Rond-Point Villarcher PKL4.981 – Modèle TALREN	37
Figure 28 : Geotech5 – secteur Rond-Point Villarcher PKL4.981 – Modèle TALREN Figure 29 : Geotech6 – secteur Villarcher PKL4.208 – Modèle TALREN	37 37
Figure 28 : Geotech5 – secteur Rond-Point Villarcher PKL4.981 – Modèle TALREN Figure 29 : Geotech6 – secteur Villarcher PKL4.208 – Modèle TALREN Figure 30 : Geotech6 – secteur Villarcher PKL4.653 – Modèle TALREN	37 37 37

Figure 32 : Mécanismes d'initiation d'érosion interne	45
Figure 33 : courbes granulométriques – système 2.2 aval	48
Figure 34 : Claquage hydraulique - Configuration requise	56
Figure 35 : Explication de la formule - Profondeur d'affouillement	59

### LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : tableau de description des sous-systèmes	11		
Tableau 2 : Désordres observés – Système 2.1	15		
Tableau 3 : Désordres observés – Système 2.2 aval	16		
Tableau 4 : Désordres observés – Système 2.3	16		
Tableau 5 : Caractéristiques profils types – Système 2.1	18		
Tableau 6 : Caractéristiques profils types – Système 2.2 aval	22		
Tableau 7 : Caractéristiques profil type – Système 2.3	23		
Tableau 8 : Profil géotechnique (Geotech1) – secteur topographique Jean Lain – SE 2.2 aval	26		
Tableau 9: Profil géotechnique (Geotech2) – Secteur topographique Rond-Point Villarcher –	SE 2 26	2.2	aval
Tableau 10 : Profil géotechnique (Geotech3) – Secteur topographique Villarcher – SE 2.2 aval	26		
Tableau 11 : Profil géotechnique (Geotech4) – Secteur topographique Tremblay – SE 2.2 aval	26		
Tableau 12: Profil géotechnique (Geotech5) – Secteur topographique Rond-Point Villarcher –	SE 2 26	2.2	aval
Tableau 13 : Profil géotechnique (Geotech6) – Secteur topographique Villarcher – SE2.2 aval	26		
Tableau 14 : Caractéristiques mécaniques des sols – Système d'endiguement 2.2 aval	27		
Tableau 15 : Niveau d'eau en amont de la digue – système 2.1	30		
Tableau 16 : Niveaux d'eau en amont de la digue – système 2.2 aval	30		
Tableau 17 : Niveau d'eau en amont de la digue – système 2.3	30		
Tableau 18 : Niveau de la nappe en aval de la digue – système 2.1	31		
Tableau 19 : Niveau de la nappe en aval de la digue – système 2.2 aval	31		
Tableau 20 : Niveau aval de la digue – système 2.3	31		
Tableau 21 : Coefficients partiels et de modèle – ELU stabilité d'ensemble (glissement)	32		
Tableau 22 : Récapitulatif des profils types à étudier – système 2.1	32		
Tableau 23 : Caractéristiques mécaniques des sols retenus pour les calculs – système 2.1	34		
Tableau 24 : Coefficients de sécurité calculés - Etude de la stabilité au glissement - Système 2.1	34		
Tableau 25 : Récapitulatif des profils types à étudier – système 2.2 aval	35		
Tableau 26 : Caractéristiques mécaniques des sols retenus pour les calculs – système 2.2 aval	39		
Tableau 27 : Coefficients de sécurité calculés - Etude de la stabilité au glissement - système 2.2 av	val40		
Tableau 28 : Récapitulatif des profils types à étudier – système 2.3	40		
Tableau 29 : Caractéristiques mécaniques des sols retenus pour les calculs – système 2.3	41		
Tableau 30 : Coefficient de sécurité calculés – Etude de la stabilité au glissement – système 2.3	41		
Tableau 31 : Référencement de la végétation (Arbeausolutions) – système 2.1	42		

Tableau 32 : Référencement de la végétation (Arbeausolutions) – système 2.2 aval	42
Tableau 33 : Référence de la végétation (Arbeausolutions) – Système 2.3	42
Tableau 34 : Temps avant saturation de la digue – écoulement à travers des digues – S2.1	43
Tableau 35 : Temps avant saturation de la digue – écoulement à travers des digues – S2.2 aval	44
Tableau 36 : Temps avant saturation de la digue – écoulement à travers la digue – S2.3	44
Tableau 37 : Sensibilité à la suffusion des différents sols étudiés – Système 2.2 aval	49
Tableau 38 : Sensibilité à l'érosion de conduit – système 2.2 aval	51
Tableau 39 : Réseau présent sur le système 2.1	52
Tableau 40 : réseaux présent sur le système 2.2 aval	53
Tableau 41 : réseau présent sur le système 2.3	54
Tableau 42 : sensibilité au critère de Lane – système 2.1	55
Tableau 43 : sensibilité au critère de Lane – système 2.2 aval	55
Tableau 44 : sensibilité au critère de Lane – système 2.3	55
Tableau 45 : Synthèse de l'érosion interne – Système2.1	58
Tableau 46 : Synthèse de l'érosion interne – Système 2.2 aval	58
Tableau 47 : Synthèse de l'érosion interne – Système 2.3	59
Tableau 48 : Profondeur des fonds mobilisés par l'écoulement – Système 2.1	60
Tableau 49 : Profondeur des fonds mobilisés par l'écoulement – Système 2.2 aval	60
Tableau 50 : Profondeur des fonds mobilisés par l'écoulement – Système 2.3	60
Tableau 51 : Caractéristiques théoriques des enrochements de protection du talus amont - systèr	ne 2.161
Tableau 52 : Caractéristiques théoriques des enrochements de protection du talus amont – sys	tème 2.2 aval 61
Tableau 53 : Caractéristiques théoriques des enrochements de protection du talus amont - systèr	ne 2.362
Tableau 54 : Synthèse des risques de ruptures – système 2.1	62
Tableau 55 : Synthèse des risques de ruptures par tronçons – système 2.2 aval	63
Tableau 56 : Synthèse des risques de ruptures – système 2.3	63

### **DOCUMENTS ASSOCIES**

- [DA1] Diagnostic initial de sécurité valant VTA Etat des lieux hiérarchisation et plan de gestion Visite CNR/Arbeausolutions pour Chambéry Métropole DI-CEN 2015-237-01 mai 2015
- [DA2] Rapport d'étude géophysique IMG 15G038 2015/2016
- [DA3] Rapport d'étude géotechnique C.15.52066 Hydrogéotechnique 2016
- [DA4] Diagnostic de la végétation Arbeausolutions 2015

### **GLOSSAIRE, NOTATIONS**

#### Termes d'analyse

Anomalie : Évènement qui indique un comportement ou une situation anormale ou inattendue.

**Auscultation :** Surveillance et suivi dans le temps, à l'aide d'instruments de mesure, de divers paramètres de comportement de l'ouvrage, de sa fondation et de son environnement, sur une longue période de la vie de l'ouvrage (exemple : niveau piézométrique, mouvement, jaugeage).

**Incident (déf. procédure CSO P053) :** Est considéré comme incident sur un ouvrage de génie civil, toute anomalie suspectée ou avérée relative à la géométrie ou au comportement de l'ouvrage.

#### Termes de conception

**Corps de digue :** Ensemble des différents matériaux (sables et graviers, limons ...) constituant la digue, inclus dans la forme trapézoïdale de l'ouvrage.

**Clés :** Masque de sables graviers de bonnes caractéristiques mécaniques disposés soit sur la partie amont du noyau de digue, soit sur la partie aval de digue, dont les fonctions ont un double objectif de protection mécanique et filtre.

**Noyau :** partie centrale interne de la digue, constitué par un matériau relativement peu perméable, permettant de rabattre la ligne de charge et limiter les débits de percolation à travers l'ouvrage.

#### Termes de contrainte

**Vitesse d'entraînement critique :** Vitesse d'écoulement à partir de laquelle une particule de sol peut être détachée mécaniquement de ses voisines sous l'effet d'une circulation d'eau.

**Charge restante :** Charge piézométrique mesurée dans le pied de l'ouvrage par rapport à la charge entre le plan d'eau (PE) et le niveau du contre-canal (CC), en équilibre avec la nappe phréatique. Elle peut être exprimée sous la forme d'un pourcentage de la charge globale et définie de la manière suivante :

(Haval – Hcontre-canal) / (HPE amont – Hcontre-canal) x 100

#### Termes de désordre/constat

**Résurgence :** Apparition dans le talus de digue aval d'un écoulement aérien issu de circulations d'eau souterraines sous ou dans l'ouvrage hydraulique

**Colmatage :** Obturation progressive, totale ou partielle, des circulations d'eau transitant à travers ou à la surface d'un élément de drainage (clé drainante, drain, ...) d'un ouvrage hydraulique.

**Entraînement des fines :** migration de particules de matériaux extraits du noyau ou de la fondation de la digue ; l'une des manifestations physiques du phénomène d'érosion interne.

Loupe de glissement (d'arrachement, de solifluxion): petite masse glissée de terrain formant grossièrement une demi-sphère convexe vers le bas et dégageant une niche d'arrachement.

**Affaissement :** Dépression ténue, plus ou moins circulaire pouvant être observée sur les parements ou la crête de digues, avec ou sans lien avec un phénomène d'érosion

**Décrochement** : Plan souvent vertical le long duquel deux compartiments de sol coulissent l'un par rapport à l'autre.

**Trou :** Dépression marquée, plus ou moins circulaire pouvant être observé sur les parements ou la crête de digues, avec ou sans lien avec un phénomène d'érosion.

### **1 OBJET DU DOCUMENT**

Conformément à l'arrêté du 16 Juin 2009, fixant des prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques, le service Infrastructures et Equipements Hydrauliques de la direction de l'ingénierie (DI-IEH), réalise, pour le compte de Chambéry Métropole, le diagnostic des digues de la Leysse et de l'Hyères. Cette protection, est située sur différentes communes de Savoie (73). Le linéaire d'étude est constitué de :

- La digue en rive gauche de la Leysse en amont de Chambéry (73), dénommée SE3.1
- La digue en rive droite de la Leysse en amont de Chambéry (73) et constituée par les systèmes SE1.1, SE1.2 et SE1.3,
- La digue en rive gauche de la Leysse en aval de Chambéry (73) constituée par les systèmes SE 4.2, SE4.3 et SE 5,
- La digue en rive droite de la Leysse en aval de Chambéry (73) constituée par les systèmes SE2.1, SE2.2 aval et SE2.3,
- La digue en rive gauche de l'Hyères (73) constitué par les systèmes SE4.1 et SE4.2.

Ce document a pour objet d'évaluer les différents risques d'instabilités du système d'endiguement rive droite de la Leysse en aval de Chambéry sur le système 2. Le tableau suivant décrit les limites de chaque sous-tronçon constituant le système d'endiguement 2. La cartographie suivante précise la localisation de ces sous-tronçons.

	Description								
Système de digue	Dénomination	N° tronçon	Début	Fin	Linéaire total (km)	hauteur digue maxi (m)			
2	Leysse RD de la confluence Leysse/Hyères	Leysse RD de	Leysse RD de	SE 2.1	200m aval confluence Leysse/Hyères	410m aval confluence Leysse/Hyères	0.21	1.5	
		SE 2.2 aval	1150m aval confluence Leysse/Hyères	100m aval pont Tremblay	4.5	4			
	Bourget	SE 2.3	Bras de décharge en aval du pont Tremblay	Bras de décharge au droit de la D1211	2.64	1			

Tableau 1 : tableau de description des sous-systèmes



Figure 1 : Zone protégée et écoulements - SE 2

### **2 DESCRIPTION DES OUVRAGES**

### 2.1 Vue d'ensemble

#### Digue RD de la Leysse S2.1

Le système d'endiguement de **la VRU**, est classé sous le système 2.1 et se situe sur la commune de Chambéry en Savoie (73). Il se situe en rive droite de 200m en aval de la confluence Leysse Hyères à 410m en aval de cette même confluence, entre les PK 8.97 et PK 8.76 (linéaire de 210m). Ce tronçon a 2 principaux profils topographiques principaux décrit dans la partie suivante.



Figure 2 : Système 2.1 - digue RD de la Leysse

• Digue RD de la Leysse S2.2 aval

Le système d'endiguement 2.2 aval se situe en rive droite de la Leysse, sur les communes de Chambéry, la Motte Servolex et Voglans en Savoie (73). Il se situe 1150 m en aval de la confluence Leysse Hyères et 100m en aval du pont du Tremblay, entre les PKL 8.0 et PKL 3.5 (linéaire de 4.5 km). Cependant seul la partie en aval du pont de l'A41 sera traité (du PKL6.3 au PKL 3.5 soit un linéaire de 2.8km), la partie en amont a déjà été étudié. Ce tronçon est découpé en plusieurs sous-tronçons décrit dans la partie suivante.



Figure 3 : Système 2.2 aval - Digue RD de la Leysse

• Digue RD de la Leysse S2.3

Le système d'endiguement du bras de décharge est classé sous le système 2.3, et se situe sur les communes de la Motte Servolex et du Bourget de Lac en Savoie (73). Il se situe rive droite du bras de décharge de la Leysse depuis l'aval du pont du Tremblay jusqu'à l'amont immédiat de la RD 1211, entre les PKBDL 2.5 et PKBDL 0 (linéaire de 2.5 km).



Figure 4 : Système 2.3 – Digue RD du bras de décharge de la Leysse

Le compte-rendu de la VTA de 2015 ([DA1]) ainsi que les fiches de synthèse de chacun des linéaires expliquent en détails les caractéristiques géométriques ainsi que le revêtement des talus.

### 2.2 Inspection visuelle

La dernière visite technique approfondie a été réalisée en mai 2015. Ci-après sont listés les différents désordres observés.

• SE 2.1					
Secteur Concerné	Localisation	Désordre			
Système 2.1	Talus	Présence d'arbres de tailles adultes, risque d'arrachement, embâcles			
	amont	resence d'arbres de talles addites, risque d'arrachement, embacies			
	tème 2.1 Talus aval Crête	raide par endroit			
		entaille local du talus, tenu par un muret en béton			
		passage étroit sur une quinzaine de mètre			
		conduite de distribution de gaz dans l'axe de l'ouvrage			

Tableau 2 : Désordres observés – Système 2.1



#### • SE 2.2 aval

Secteur Concerné	Localisation	Désordre
		Végétation importante, arbres morts, souches
	Talus	pente très raide
	amont	érosion importante
Suctions 2.2		Affaissement du talus par endroit
aval		fluage/solifluxion
	Talus aval	pente raide
		Végétation importante, arbres morts, souches
	Crôto	piste cyclable
	Ciele	dévers marqué, fissures longitudinales sur l'enrobé de la piste

Tableau 3 : Désordres observés – Système 2.2 aval

#### SE 2.3

Secteur Concerné	Localisation	Désordre
	talus amont	talus localement un peu raide
		très légère érosion superficielle
Système		talus localement un peu raide
2.3	talus aval	très légère érosion superficielle
		piétinement d'animaux
	crête	piétinement d'animaux

Tableau 4 : Désordres observés – Système 2.3

Tous les désordres énoncés ci-dessus sont cartographiés dans le compte-rendu de la VTA de 2015.

### **3 ANALYSE DES DONNÉES**

Le but de cette partie est d'analyser les différentes données disponibles concernant les digues auscultées afin d'en connaître la composition interne. Cette analyse mène à la définition de profils types représentatifs des différents faciès de digue rencontrés. Ces profils sont utilisés par la suite dans des calculs de stabilité.

### 3.1 Analyse structurelle et topographique

### 3.1.1 SE 2.1

D'un point de vue topographique, on distingue deux structures du talus amont très différentes. Sur la partie amont du secteur entre les PM0 et PM175 se trouvent des blocs pluri-décimétriques non liés en base et affleurant localement sur les parois de la digue. Sur la partie aval entre les PM 175 à PM 240, la digue est soutenue par un empierrement sur l'intégralité de sa hauteur. Ce dernier profil (Figure 5) est plus stable grâce à ces enrochements, d'autant plus que la largeur de crête est importante (5 à 6m), il ne sera pas étudié en stabilité.



Figure 5 : Profil topographique - système 2.1 - PKL 8.83 - STTP60

Les profils critiques qui sont étudiés se situent donc sur la partie amont. Hormis le fait que le talus amont ne soit pas enroché, deux profils se distinguent, l'un avec une large crête, et l'autre avec une crête beaucoup plus faible et des pentes de talus aval plus importantes. Le premier profil étudié dispose d'une large crête, mais d'une pente du talus amont très importante. La relève topographique ne permet pas d'identifier le niveau du terrain neutre, mais celui-ci se situe 1.5m plus bas avec une pente relativement douce.



Figure 6 : Profil topographique - système 2.1 - PKL 8.91 - STTP57

Le second profil est lui caractérisé par sa faible crête. Là non plus la relève topographique ne nous permet pas d'identifier le terrain neutre, mais il se situe 1.5m plus bas avec une pente élevée de quasi 1/1.



Figure 7 : Profil topographique – système 2.1 – PKL8.88 – STTP59

<u>Récapitulatif des principales caractéristiques géométriques :</u>

Nom de la digue ou du tronçon de digue	Longueur du tronçon (m)	Pente Talus amont (H/V)	Pente talus aval (H/V)	Hauteur par rapport TN aval (m)	Largeur en crête (m)	Protection amont	PK début	PK fin
S2.1 amont	175	3/2 à 1/1	de 3/1 à 1/1 muret bétonné entaille la digue localement	1.5 à 2 m	1à6	enrochement en partie inférieur	9	8.82
S2.1 aval	240	3/2 à 1/2	de 3/1 à 1/1 muret bétonné entaille la digue localement	1.5 à 2 m	3 à 6	enrochement	8.82	8.58



### 3.1.2 SE 2.2 aval

Ce système d'endiguement concerne la digue en rive droite de la Leysse sur 2.8km. La digue composant ce système d'endiguement peut alors être divisée en 5 secteurs d'un point de vue topographique. Ces tronçons sont les suivants :

 <u>Secteur Jean Lain :</u> Ce premier secteur à proximité du concessionnaire Jean Lain jusqu'au rond-point de Villarcher se situe entre les PKL 6.2 et PKL 5.1. La largeur de crête est d'environ 5 à 6m, et la hauteur de digue de 3m. Les caractéristiques géométriques sont résumées dans le Tableau 6. Le profil le plus défavorable vis-à-vis des pentes de talus et de largeur de crête sur ce secteur est le suivant :



Figure 8 : Profil topographique secteur Jean Lain – système 2.2 aval – PKL5.444 – PM720

Secteur rond-point Villarcher : Cette digue constitue un point critique du linéaire de l'endiguement puisqu'à ce niveau les pentes amont et aval des talus sont très raides, de plus la largeur de crête est elle aussi très étroite. Le secteur se situe entre les PKL5.1 et PKL4.9. Au droit de Villarcher, le tracé de la rivière effectue un virage d'un angle d'environ 60°. La digue étant située dans l'extrados du virage, c'est donc une zone où l'érosion externe peut être très importante. Les profils topographiques et le diagnostic de sécurité permettent de mettre en évidence les caractéristiques géométriques résumées dans le Tableau 6. Le profil le plus défavorable vis-à-vis des pentes de talus et de la largeur en crête sur ce tronçon est le suivant :



Figure 9 : Profil topographique secteur rond-point Villarcher – système 2.2 aval – PKL4.981 – PM1300

 <u>Secteur Villarcher</u>: Le troisième secteur, celui de Villarcher présente des caractéristiques également spécifiques avec des fortes pentes de talus mais il présente une largeur de crête plus importante. Il se situe entre les PKL4.9 et PKL4.2. Deux profils topographiques extrêmes sont retenus, l'un pour la pente du talus amont l'autre pour celle du talus aval :



Figure 10 : Profil topographique secteur Villarcher - système 2.2 aval - PKL4.653 - PM1600



Figure 11 : Profil topographique secteur double digue - système 2.2 aval - PKL4.208 - PM2050

 <u>Secteur double digue :</u> Le quatrième secteur est présent sur une petite section entre les PKL4.2 et PKL4, et est spécifique car il présente une double digue. De par sa forme, ce secteur présente moins de danger que les précédents. Les profils topographiques et le diagnostic de sécurité permettent de mettre en évidence les caractéristiques présentées dans le Tableau 6.



Figure 12 : Profil topographique secteur Double Digue – système 2.2 aval – PKL4.145 – PM2130

 <u>Secteur Tremblay</u>: Le cinquième et dernier secteur présente un profil de digue large avec des pentes plus faibles que les secteurs précédent. Le profil le plus défavorable, vis-à-vis des pentes de talus et de la largeur en crête sur ce tronçon est le suivant :



Figure 13 : Profil topographique secteur Tremblay - système 2.2 aval - PKL3.543 - PM2680

<u>Récapitulatif des principales caractéristiques géométriques :</u>

Nom de la digue ou du tronçon de digue	Longueur du tronçon (m)	Pente Talus amont (H/V)	Pente talus aval (H/V)	Hauteur par rapport TN aval (m)	Largeur en crête (m)	Protection amont	PKL début (PM)	PKL fin (PM)
Secteur Jean Lain	1100	3/2 à 1/1	1/1	3	5 à 6	protection non visible à l'exception de quelques enrochements en pieds	6.2 (80)	5.1 (1150)
Secteur rond-point de Villarcher	200	1/1 à subvertical	1/1	3	3	protection non visible à l'exception de quelques enrochements en pieds	5.1 (1150)	4.9 (1350)
Secteur Villarcher	700	3/2 à subvertical	3/2	2	8 à 10	protection non visible à l'exception de quelques enrochements en pieds	4.9 (1350)	4.2 (2050)
Secteur double digue	200	3/2	3/2 à 1/1	2	15	protection non visible à l'exception de quelques enrochements en pieds	4.2 (2050)	4 (2250)
Secteur Tremblay	600	3/2	3/2	2	10 à 15	protection non visible à l'exception de quelques enrochements en pieds	4 (2250)	3.4 (2850)

Tableau 6 : Caractéristiques profils types – Système 2.2 aval

### 3.1.3 SE 2.3

Ce système d'endiguement est un peu particulier car il concerne la rive droite du bras de décharge de la Leysse. Ce tronçon n'est donc pas tout le temps en eaux (sauf la partie la plus en aval, proche du lac) mais seulement lorsque le niveau de la Leysse est trop important et que les vannes en amont sont ouvertes pour soulager le débit de la Leysse. Cette digue est longue 2.5 km et on identifie un seul secteur d'un point de vue topographique. C'est le profil le plus défavorable décrit ci-dessous qui sera étudié.

• Profil topographique : Ce profil se situe au PKBDL 1.16. La largeur de crête est de l'ordre de 4m avec une hauteur par rapport au terrain neutre de 1.5m



Figure 14 : Profil topographique système 2.3 – CD112.5 – PKBDL0.005 – PM2450

•	Réca	pitulatif	des	princi	pales	caractéristique	es g	géométriques
---	------	-----------	-----	--------	-------	-----------------	------	--------------

Nom de la digue ou du tronçon de digue	Longueur du tronçon (m)	Pente Talus amont (H/V)	Pente talus aval (H/V)	Hauteur par rapport au TN aval (m)	Largeur en crête (m)	Protection amont	PKBDL début (PM)	PKBDL fin (PM)
Bras de décharge	2500	3/2 Local. 1/1	3/2 Local. 1/1	1.5 à 2	3 à 4	pas de protection	2.5 (0)	0 (2500)

Tableau 7 : Caractéristiques profil type – Système 2.3

### 3.2 Campagne géophysique

Une investigation géophysique a été réalisée du 25 au 31 aout 2015 afin de déterminer les couches de matériaux constitutifs de la digue d'une manière continue et de repérer les zones d'anomalies susceptibles d'échapper à la campagne de sondages géotechniques ponctuelle. Les résultats de cette campagne permettent de :

- reconnaître le zonage de la digue grâce aux premières identifications de différentes couches de matériaux constitutifs de la digue ;
- cibler les zones nécessitant des reconnaissances complémentaires ;
- cerner les caractéristiques des matériaux de la digue en corrélation avec les résultats des autres sondages géotechniques.

### 3.2.1 SE 2.1

Sur ce système d'endiguement, 1 panneau de tomographie électrique (panneaux électriques) a été réalisé à la maille 2.5m pour un linéaire total de 240ml :

• 1 profil longitudinal couvrant tout le tronçon 2.1 de 240m.

L'implantation détaillée des profils est présenté dans le rapport [DA2].

- <u>Geotech1 : PM0 à PM240</u> : Le corps de la digue est moyennement résistif de type sablo-graveleux, les fondations sont-elles moins résistives de type limon sableux ;
- <u>Geotech2 : PM95</u> : Ce profil décrit une anomalie au PM95 où la digue est peu résistive en son sommet, puis très peu résistive dans ses fondations.

Les anomalies sont définies comme correspondant à des variations brutales de résistivité de la digue ainsi que des facies électriques différents de ceux décrit ci-dessus. Celles-ci traduisent l'hétérogénéité de la digue.

### 

### 3.2.2 SE 2.2 aval

Sur ce système d'endiguement, 6 panneaux de tomographie électrique (panneaux électriques) ont été réalisé à la maille 2.5 m pour un linéaire total de 3100 ml :

- 1 profil longitudinal couvrant tout le tronçon 2.2 aval sur 2950 ml
- 1 profil transversal au droit du PM 395 pour le tronçon 2.2 aval sur un linéaire de 30 ml.
- 1 profil transversal au droit du PM 1435 pour le tronçon 2.2 aval sur un linéaire de 30 ml.
- 1 profil transversal au droit du PM 1935 pour le tronçon 2.2 aval sur un linéaire de 30 ml.
- 1 profil transversal au droit du PM 2300 pour le tronçon 2.2 aval sur un linéaire de 30 ml.
- 1 profil transversal au droit du PM 2800 pour le tronçon 2.2 aval sur un linéaire de 30 ml.

L'implantation détaillée des profils est présentée dans le rapport [DA2].

- <u>Geotech1 : PM0 à PM1300</u> : La digue présente une couche résistive en crête de 2 à 3m d'épaisseur correspondant à un sol grossier (graviers, cailloux), ensuite une couche moins résistive de 2 à 3m également composé de matériaux plus fin (limons) et ensuite des sols de fondations résistifs.
- <u>Geotech2 : PM1300 à PM2020</u> : La digue présente une couche résistive en crête de 2 à 4m d'épaisseur, ensuite le reste des fondations est faiblement à très faiblement résistif (limons ou argiles)
- <u>Geotech3 : PM2020 à PM2105</u> : Le corps de digue présente des matériaux peu résistifs (sable, limon), les fondations sont-elles plus résistives (gravier).
- <u>Geotech2 : PM2105 à PM2750</u> : mêmes caractéristiques que PM1300 à PM2020.
- <u>Geotech4 : PM2750 à PM2950</u> : Le corps de digue est résistif (enrochements, gravier) de 4 à 6m et ensuite des fondations toujours résistive mais un peu moins (matériaux sableux)

### 3.2.3 SE 2.3

Sur ce système d'endiguement, un profil Electromagnétique a été réalisé sur un linéaire de 2300ml (entre PKBDL 2.5 et PKBDL 0.2) soit sur la quasi-totalité du système :

• 1 profil longitudinal couvrant tout le tronçon 2.3 sur 2300ml

L'implantation détaillée des profils est présentée dans le rapport [DA2].

 <u>Geotech1 : PM0 à PM2500</u> : D'après l'étude électromagnétique on distingue clairement un profil type pour la composition de la digue, avec le corps de digue plus résistif constitué de sable ou de galets, et des fondations elles moins résistives de type limons ou argile. Il y a parfois des portions où le sommet de la digue semble plus résistif ou inversement que sur le reste de la section, mais cela reste très local.



### 3.3 Reconnaissances géotechniques

### 3.3.1 SE 2.1

Aucun sondage de géotechnique n'a été effectué sur ce système d'endiguement. Toutes les caractéristiques de sols qui seront prises pour la suite des études sont estimées à partir de la géophysique, et des sondages géotechniques effectués à proximité sur le système 2.2, les couches de sols sélectionnées sont les suivantes :

Profondeur	deur couche géologique		
0 - 2.5 m	Graves sablo-limoneuse gris	gáonhusiguo	
2.5 - 7m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	geophysique	

Figure 15 : Profil géotechnique (Geotech1) – SE 2.1

Profondeur	couche géologique	Source
0 - 1 m	Graves sablo-limoneuse gris	
1 - 5 m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	géophysique
5 - 7 m	argiles limoneuses grises	

Figure 16 : Profil géotechnique (Geotech2) - SE 2.1

### 3.3.2 SE 2.2 aval

Les résultats de l'étude géophysique ont permis d'orienter les types et la localisation des sondages ainsi que les essais à mener. Les travaux de reconnaissance sur la Leysse et l'Hyères ont été réalisés entre octobre 2015 et mars 2016. Les reconnaissances concernant le SE 2.2 aval comprennent :

- six sondages carottés descendus de 7 à 10 m (SC1) de profondeur ;
- deux sondages au pénétromètre dynamique descendus à 7 m de profondeur ou au refus ;
- un sondage destructif.

Les travaux d'essais en laboratoires ont été réalisés entre février et mars 2016. Ils comportent :

- 16 analyses granulométriques ;
- 13 analyses sédimentométriques. 15 analyses demandés, mais les analyses du SC2 couche de graves sablo-limoneuse de 4.4 à 5.5m et SC5 couche de sable limoneux à cailloutis et cailloux de 1.5 à 2.1m n'ont pas été effectués à cause de la granulométrie trop importante.
- 7 analyses de cisaillements. 8 analyses demandés mais la couche de limon sableux fin beige du SC5 n'est pas exploitable car pas assez de quantité de sol pour faire l'essai.

Tous les résultats des reconnaissances, comprenant notamment le tableau des essais réalisés pour chaque carotte, sont donnés dans le document référencé [DA3].

#### 3.3.2.1 Granulométrie et étude des carottes

Suivant l'analyse des reconnaissances géophysiques, la digue du système 2.2 aval s'établit en 4 tronçons représentée par 4 profils géotechniques type distincts. Les sondages carottés SC1 et SC2 ont été réalisés sur le <u>premier profil (Geotech1)</u>, le <u>second profil (Geotech2)</u> a été établi grâce au SC5. Le <u>profil numéro 3 (Géotech3)</u> n'a pu faire l'objet de sondage carotté sur sa section du fait de la présence de réseaux. Son profil type a été reconstitué grâce à l'étude géophysique et aux sondages carottés effectués à proximité. Le SC6 a lui été réalisé sur le <u>quatrième tronçon (Géotech4)</u>.

Les SC3 et SC4 se trouvent également sur le deuxième tronçon de digue, mais ils correspondent à des profils particuliers qui présentent les anomalies de structure de la digue.

A partir de ces sondages carottés ainsi que de l'étude géophysique, 2 autres profils sont identifiés. Les profils <u>Geotech5 (PM1310 à PM1325)</u> et <u>Geotech6 (PM1935)</u> représentant des anomalies dans la composition des digues (profils géotechnique particulier) sont étudiés.

L'étude du système d'endiguement est donc divisée en 6 profils.

### 

#### Conclusion :

D'un point de vue géotechnique et géophysique six profils types sont proposés pour ce système. Ces profils types sont les suivants :

Profondeur	couche géologique	Source
0 - 1.5 m	Graves sablo-limoneuse gris	
1.5 - 3.5 m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	SC1/SC2
3.5 - 7.5 m	Graves sablo-limoneuse gris	

Tableau 8 : Profil géotechnique (Geotech1) - secteur topographique Jean Lain - SE 2.2 aval

Profondeur	couche géologique	Source
0 - 0.6 m	Graves sablo-limoneuse gris	
0.6 - 2.1 m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	SC5
2.1 - 6.6 m	Argile limono graveleuse gris/vert	

Tableau 9 : Profil géotechnique (Geotech2) - Secteur topographique Rond-Point Villarcher - SE 2.2 aval

Profondeur	couche géologique	Source
0 - 2 m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	
2 - 6 m	Graves sablo-limoneuse gris	Cáonhysique
6 - 8 m	Sable fin marron beige à cailloutis et cailloux	Geophysique

Tableau 10 : Profil géotechnique (Geotech3) – Secteur topographique Villarcher – SE 2.2 aval

Profondeur	couche géologique	Source
0 - 2 m	Graves sablo-limoneuse gris	
2 - 4 m	Sable fin marron beige à cailloutis et cailloux	SC6
4 - 6 m	Sable Gris/gris vert	

Tableau 11 : Profil géotechnique (Geotech4) - Secteur topographique Tremblay - SE 2.2 aval

Profondeur	couche géologique	Source	
0 - 2 m	argiles limono graveleuse gris/vert	Céonhysique	
2 - 6 m	Graves sablo-limoneuse gris	Géophysique	

Tableau 12 : Profil géotechnique (Geotech5) - Secteur topographique Rond-Point Villarcher - SE 2.2 aval

Profondeur	couche géologique	Source
0 - 1 m	Graves sablo-limoneuse gris	
1 - 3 m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	
3 - 4.5 m	Graves sablo-limoneuse gris	SC4
4.5 - 6.5 m	Limon sableux fin beige à cailloutis et cailloux	

Tableau 13 : Profil géotechnique (Geotech6) - Secteur topographique Villarcher - SE2.2 aval

Tous les profils géotechniques correspondent à la lithologie se situant en arrière de la couche en enrochements, coté protégé. Il convient donc d'ajouter les enrochements conformément aux profils en travers géophysiques relevés, sur le talus amont des profils type pour l'étude de stabilité, hormis pour le profil Géotech4 qui se situe sur le secteur du Tremblay au droit duquel aucun enrochement n'est pas observé.



Pour les profils Geotech3 et Geotech5, la lithologie de la digue n'étant pas basée sur des sondages carottés, une attention particulière sera apportée à l'interprétation des résultats des calculs de stabilité.

#### 3.3.2.2 <u>Pénétromètre</u>

Deux essais pénétrométriques ont été effectués sur le tronçon Geotech2, au PM 2255 et PM2665. Le premier essai reprend bien la lithologie observée par les essais géophysiques avec une couche résistante sur le sommet de digue puis des fondations plus molles de type sable ou limon. Le second essai ne reprend pas aussi bien les observations et décris une succession de couches dures et molles en crête et dans ses fondations, alors que la géophysique indique une crête avec des fondations faiblement à très faiblement résistives.

#### 3.3.2.3 Sondage destructif

Un unique sondage destructif a été effectué au PM 2255 au même point que le sondage pénétrométrique. Une première couche de sable est identifié en crête de digue, avec ensuite des fondations moins résistives type limoneuse, ce qui correspond aux observations du pénétromètre et de la géophysique.

#### 3.3.2.4 Essais de cisaillement - Caractéristiques mécaniques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des sols fins constituant le corps de digue ont été évaluées par des essais de cisaillements à la boite de Casagrande. Ces essais permettent de mesurer les paramètres intrinsèques effectifs des sols testés et seront utilisés lors des modélisations de stabilité.

Sondages	Profondeur (m)	couche géologique	cohésion (c' en kPa)	angle de frottement (en °)	Poids volumique (ɣ en kN/m3)
SC1	3.9	limon sableux	8	34.7	20.5
SC2	1.85	limon sableux gris à cailloutis et cailloux	6	33	19.7
SC2	4.75	Grave sablo-limoneuse gris	6	37	22.4
SC3	6.3	Argile limono graveleuse gris, vert	15	26	19.9
SC4	3.8	limon sableux gris à cailloutis et cailloux	12	32	20.2
SC6	1.65	sable fin marron beige à cailloutils et cailloux	17	27	19.5
SC6	6.5	Sable gris foncé à cailloutis et cailloux	3	29	21.2

Les essais de cisaillement direct réalisés sont synthétisés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Caractéristiques mécaniques des sols – Système d'endiguement 2.2 aval

#### 3.3.3 SE 2.3

Les résultats de l'étude géophysique ont permis d'identifier les couches de sols et d'orienter les types et la localisation des sondages ainsi que les essais possible de mener. Il a finalement été décidée de ne pas réaliser de sondage carotté car cette digue est faiblement sollicité par l'eau et donc moins sensible au phénomène d'érosion.

Les travaux de reconnaissance sur la Leysse et l'Hyères ont été réalisés entre octobre 2015 et mars 2016. Les seuls reconnaissances concernant le SE 2.3 comprennent :

- Un sondage tarière descendus à 7m de profondeur ;
- Un sondage au pénétromètre dynamique descendu à 7 m de profondeur ;

Aucun essai en laboratoire n'a été réalisé car aucun sondage carotté n'a été demandé.

Tous les résultats des reconnaissances, comprenant notamment le tableau des essais réalisés pour chaque carotte et les emplacements des sondages, sont donnés dans le document référencé [DA3].

#### 3.3.3.1 Granulométrie et étude des carottes

Aucun sondage carotté n'a été effectué sur ce tronçon de digue. Les caractéristiques des sols sont donc établies à partir de l'étude géophysique et de l'essai pénétrométrique et de tarière décrit dans les parties suivantes, la composition de sols retenue est la suivante :

Profondeur	couche géologique	Source
0 - 1 m	sable limoneux à cailloutis et cailloux	pénétromètre,
1 - 7 m	Argile limono graveleuse gris/vert	tarière, géophysique

Figure 17 : Profil géotechnique (Geotech1) – Secteur topographique Bras de décharge de la Leysse – SE 2.3

#### 3.3.3.2 <u>Pénétromètre</u>

Un sondage pénétrométrique a été réalisé au PM2240, au même niveau que le sondage par tarière. Les résultats obtenus ne sont pas conforme à ce que l'on peut attendre d'après la géophysique. En effet, on retrouve bien une couche résistive, mais celle-ci se situe à environ 2.5m de profondeur alors qu'elle devrait se situer en crête de digue, tandis qu'en crête de digue les matériaux sont relativement peu résistif d'après le sondage pénétrométrique. Des fondations plus peu résistives sont cependant retrouvées comme attendu.

#### 3.3.3.3 <u>Tarière</u>

Un sondage par tarière a été réalisé au même endroit que le sondage pénétrométrique. Ce sondage indique sur la globalité de l'échantillon analysé des matériaux de type argileux, avec cependant présence de quelques cailloutis sur la couche supérieure de la digue, ce qui confirme la résistivité plus importante de la géophysique. On ne retrouve pas la partie plus résistante du sondage pénétrométrique, mais bien les fondations faiblement résistive argileuses.

### 4 HYPOTHÈSES HYDRAULIQUES

### 4.1 Hydrologie du secteur

#### 4.1.1 Analyse des crues

La Leysse est un affluent de type fluvio-nival. Son débit moyen est relativement stable tout au long de l'année hormis en été où une baisse notable est observée. Ses crues se produisent généralement en hiver avec les épisodes de pluie intense mais peuvent aussi être marquées en fin de printemps, à la fonte des neiges. L'Hyères, affluent de la Leysse, est aussi de type fluvio-nival. En partie du fait de la petite taille de son bassin versant, ce cours d'eau réagit très rapidement aux précipitations avec des temps de réponse pouvant être de deux heures. Le graphique suivant présente les hydrogrammes de la crue de 1990 de la Leysse au pont du Tremblay extraits de la base de données HYDRO, de l'Hyères et de l'Albanne, ses deux affluents principaux.



Figure 18 : Hydrogramme de la Leysse et ces principaux affluents pour la crue de 1990

#### 4.1.2 Crues récentes et désordres associés

Depuis 1980, les plus fortes crues observées sont celles de février 1990 et décembre 1991, résultant de fortes précipitations. L'évènement de novembre 1992, d'intensité moindre, s'est caractérisé par des précipitations soutenues sur 3 mois précédant l'évènement.

La loi d'ajustement de Gumbel a permis d'estimer la période de retour de la crue de 1990 :

- Période de retour d'environ 50 ans sur la Leysse amont et sur l'Hyères ;
- Période de retour d'environ 30 ans au pont Tremblay.

Lors de la crue de 1990 une brèche s'est formée au droit du Pont Tremblay, en lieu et place des vannes d'entrée du bras de décharge.

### 4.2 Niveaux en amont de la digue

Dans le cadre de la présente étude, et compte tenu des dernières recommandations (juin 2010) pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs), les scénarii hydrauliques suivants ont été considérées :

- Conditions hydrauliques normale d'exploitation (Q<sub>10</sub>)
- Conditions hydrauliques en situation exceptionnelle de crue (Q<sub>100</sub>) ;
- Conditions hydrauliques en situation extrême de crue (limite avant la surverse, point bas du tronçon étudié).

Pour chacun des linéaires étudiés, la cote en amont de la digue est déterminée grâce au modèle hydraulique Telemac2D calculant les niveaux pour chacune des situations. Les cotes prises en compte correspondent aux valeurs prises au droit de chaque profil topographique considéré comme le plus défavorable. Ces niveaux sont présentés dans les tableaux suivants pour les différents systèmes :

nom du profil topographique	PKL	cote radier (mNGF)	Cote Q10 (mNGF)	Cote Q100 (mNGF)	Cote limite surverse* (mNGF)
S2.1 STTP57	8.91	254.78	257.76	258.99	259.76
S2.1 STTP59	8.88	254.38	257.15	258.38	259.55

Tableau 15 : Niveau d'eau en amont de la digue - système 2.1

Nom du profil topographique	PKL	Cote radier (mNGF)	Cote Q10 (mNGF)	Cote Q100 (mNGF)	Cote limite surverse* (mNGF)
Jean Lain	5.444	242.54	245.95	247.04	247.43
Rond-Point Villarcher	4.981	241.1	244.55	245.60	245.9
Villarcher 1	4.208	239.05	242.54	243.42	243.87
Villarcher 2	4.653	240.16	243.65	244.71	245.27
Tremblay	3.543	237.62	240.57	241.97	242.04

Tableau 16 : Niveaux d'eau en amont de la digue - système 2.2 aval

Nom du profil topographique	PKLBD	Cote radier (mNGF)	Cote Q10 (mNGF)	Cote Q100 (mNGF)	Cote limite surverse* (mNGF)
S2.3	1.16	234.44	235.5	236.3	236.97

Tableau 17 : Niveau d'eau en amont de la digue – système 2.3

\*La cote prise en compte dans le modèle TALREN sera inférieure de 0.05m à celle indiquée pour le bon fonctionnement du calcul.

### 4.3 Niveaux de saturation en aval de la digue

Aucun piézomètre n'est disponible sur les linéaires de digues étudiés. Pour l'étude de stabilité, le niveau de saturation coté protégé sera pris au pied du talus aval.

nom du profil topographique	PKL	Cote niveau de nappe aval (mNGF)
S2.1 STTP57	8.91	258.22
S2.1 STTP59	8.88	258.26

Tableau 18 : Niveau de la nappe en aval de la digue – système 2.1

nom du profil topographique	PKL	Cote niveau de nappe aval (mNGF)
Jean Lain	5.444	244.28
Rond-Point Villarcher	4.981	243.16
Villarcher 1	4.208	241.75
Villarcher 2	4.653	240.93
Tremblay	3.543	239.88

Tableau 19 : Niveau de la nappe en aval de la digue – système 2.2 aval

nom du profil topographique	PKLBD	cote niveau de la nappe aval (mNGF)
S2.3	1.16	235.3

Tableau 20 : Niveau aval de la digue – système 2.3

### **5 STABILITÉ AU GLISSEMENT – DIGUES EN TERRE**

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

Il est à noter que la méthode des coefficients partiels a été utilisée. D'après cette méthode la sécurité des calculs résides dans les points décrits ci-dessous :

- Les valeurs caractéristique des c',  $\phi$  ' et poids volumique sont divisées par des coefficients partiels (Tableau 21 suivant l'eurocode 7) ;
- L'application d'un coefficient sur le modèle ;
- Les coefficients partiels dépendent des situations (normale, transitoire, exceptionnelle, extrême, accidentelle);
- Le coefficient de sécurité requis doit être supérieur ou égal à 1,0.

Les coefficients de sécurité partiels utilisés sont conformes aux « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai ».

	Situation	Coefficient partiel sur le poids volumique	Coefficient partiel sur la cohésion (c') et tanφ	Coefficient de modèle
а	Normale d'exploitation (Q10)	1,00	1,25	1,20
b	Exceptionnelle de crue (Q100)	1,00	1,10	1,20
С	Extrême de crue (Extrême)	1,00	1,00	1,10

Tableau 21 : Coefficients partiels et de modèle – ELU stabilité d'ensemble (glissement)

Ces coefficients sont importants pour la partie calculs 5.1.3.

### 5.1 SE 2.1

### 5.1.1 Coupes étudiées

D'après les analyses topographiques et géophysiques, les profils types à étudier sont les suivants.

Système d'endiguement	Tronçon géotechnique	PM (m)	Secteur topographique	Commentaires
2.1	Cootoch1	0 à 240 S2.1 STTP57 Profil =	S2.1 STTP57	Drofilture
	Geolechi		Profilitype	
	Castada 2	05	S2.1 STTP57	Drofil on é sifi sus
	Geolechz	95	S2.1 STTP59	Profil specifique

Tableau 22 : Récapitulatif des profils types à étudier - système 2.1

La modélisation numérique portera sur 4 profils types à étudier. Les données de sols sont issues des sondages carottés du système 2.2 qui se trouve à proximité.

• Geotech1 : PM 0 à 240 : STTP57



Figure 19 : Geotech1 – STTP57 – PKL8.91 - Modèle TALREN

• Geotech1 : PM 95 : STTP59



Figure 20 : Geotech1 - STTP59 - PKL8.88 - Modèle TALREN

• Geotech2 : PM 0 à 240 : STTP57



Figure 21 : Geotech2 – STTP57 – PKL8.91 – Modèle TALREN

• Geotech2 : PM 95 : STTP59



Figure 22 : Geotech2 – STTP59 – PKL8.88 – Modèle TALREN

Profondeur	Description	γ (kN/m3)	c' (kPa)	φ' (°)	
-	enrochement	20	0	45	
Geotech1					
0 à 2.5m	Graves sablo-limoneuse gris	22.4	0	37	
2.5 à 7m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	19.751	2	33	
Geotech2					
0 à 1m	Graves sablo-limoneuse gris	22.4	0	37	
1 à 5m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	19.8	2	33	
5 à 7m	argiles limoneuses grises	19.9	5	26	

### 5.1.2 Données géotechniques retenues

Tableau 23 : Caractéristiques mécaniques des sols retenus pour les calculs - système 2.1

Les profils présentant des enrochements en pied, ceux qui ont été repéré lors de la VTA.

Les cohésions retenues sont bien inférieures à celles évaluées par les essais de cisaillement. Ceci s'explique par le fait que les essais à la boite, du fait de la difficulté de drainage, peuvent être surévalués. Afin de rester cohérent et dans un objectif sécuritaire, les cohésions sont pris égal à 0 pour les sols graveleux, 2 pour les sables limoneux et 5 pour les limons argileux et argiles.

#### 5.1.3 Résultats des calculs

Les résultats du calcul du coefficient de stabilité sont présentés dans le tableau suivant.

Profil	Profil	סעו	DM		Talus		
Géotechnique	topographique	PKL PIVI	Q10	Q100	Extrême	amont	
Geotech1	STTP57	8.91	65	1.45	1.65	1.51	0.86
Geotech1	STTP59	8.88	92	1.03	1.15	0.99	1.02
Geotech2	STTP57	8.91	65	1.6	1.7	1.55	0.93
Geotech2	STTP59	8.88	92	1.08	1.22	1.02	1.05

Tableau 24 : Coefficients de sécurité calculés - Etude de la stabilité au glissement – Système 2.1

Les calculs de stabilité révèlent que pour le profil STTP57, le talus amont est sensible au glissement lors de décrue rapide quel que soit le profil géotechnique. Ce résultat n'est pas surprenant car ce profil type a été sélectionné en raison de sa forte pente amont. Son talus aval est lui stable grâce à l'importante crête de digue et les faible pentes.

Le profil STTP59 est lui stable sur son talus amont. Le talus aval est instable seulement pour un cas de crue extrême et avec le profil Geotech1, pour tous les autres cas il est stable.

### 5.1.4 Conclusion – Stabilité au glissement

Le système d'endiguement est stable au phénomène de glissement au niveau du talus aval, et peut apparaitre seulement dans les cas extrêmes. En ce qui concerne le talus amont, l'instabilité peut être présente sur les profils les plus défavorables. Ce phénomène est donc à surveiller et il peut être nécessaire de reprendre les parties les plus défavorables.



### 5.2 SE 2.2 aval

### 5.2.1 Coupes étudiées

L'analyse des données disponibles (topographiques, géotechniques, géophysiques) a permis de définir les profils types représentatifs des différents tronçons de la digue (profils géotech 1 à 4) et de faire ressortir des zones potentiellement instables (profils géotech 5 et 6). Ainsi, des calculs de stabilité au glissement sont menés sous Talren pour chaque profil géotechnique identifié, et ainsi déterminer la capacité de la digue à résister au glissement.

Système d'endiguement	ystème Tronçon PM (m) Jiguement géotechnique		Secteur topographique	Commentaires
	Geotech1	0 à 1300	Jean Lain	Profil type
	Geotech2	1300 à 2020 + 2105 à 2750	Rond-Point Villarcher	Profil type
	Geotech3	2020 à 2105	Villarcher	Profil type réparti sur 2 profils topo différents
2.2 aval	Geotech4	2750 à 3000	Tremblay	Profil type
	Geotech5	1320	Rond-Point de Profil spécifique	
	Geotech6	1935	Villarcher	Profil spécifique réparti sur 2 profils topo différents

Tableau 25 : Récapitulatif des profils types à étudier - système 2.2 aval

La modélisation numérique portera alors sur 8 profils de digue à étudier (profils différent suivant la topographie et la géotechnique)

Les profils en travers types utilisés sont les suivants :

• Geotech1 : PM0 à PM1310 (secteur Jean Lain)



Figure 23 : Geotech1 – secteur Jean Lain PKL5.444 - Modèle TALREN

• Geotech2 : PM1325 à PM2020 + PM2105 à PM2750 (secteur Rond-Point Villarcher)



Figure 24 : Geotech2 – secteur Rond-Point Villarcher PKL4.981 – Modèle TALREN

• Geotech3 : PM2020 à PM2105 (secteur Villarcher)







Figure 26 : Geotech3 - secteur Villarcher PKL4.653 – Modèle TALREN

Geotech4 : PM2750 à PM3000 (secteur Tremblay)

Figure 27 : Geotech4 – secteur Tremblay PKL3.543 – Modèle TALREN

• Geotech5 : PM1320 (secteur Rond-Point Villarcher)



Figure 28 : Geotech5 – secteur Rond-Point Villarcher PKL4.981 – Modèle TALREN

• Geotech6 : PM1935 (secteur Villarcher)



Figure 29 : Geotech6 – secteur Villarcher PKL4.208 – Modèle TALREN



### 5.2.2 Données géotechniques retenues

Le tableau suivant récapitule les compositions de sols retenues. Celles-ci se basent sur les essais pratiqués ainsi que sur des valeurs types. Les valeurs de la cohésion ont été minimisées vis-à-vis des essais de cisaillement pour raison de sécurité.

Profondeur	Description	γ (kN/m3)	c' (kPa)	φ' (°)	
-	enrochement	20	0	45	
Geotech1 - Jean	n Lain				
0 à 1.5m	Graves sablo-limoneuse gris	22.4	0	37	
1.5 à 3.5m	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	19.8	2	33	
3.5 à 7.5m	Graves sablo-limoneuse gris	22.4	0	37	
Geotech2 - Ron	d-Point Villarcher				
0 à 0.6m	Grave limono-sableuse gris	22.4	0	37	
0.6 à 2.1m	sable limoneux à cailloutis et cailloux	19.8	2	33	
2.1 à 6.6m	Argile limono graveleuse gris/vert	19.9	5	26	
Geotech3 - Villa	archer				
0 à 2m	sable limoneux à cailloutis et cailloux	19.8	2	33	
2 à 6m	Grave limono-sableuse gris/brun	22.4	0	37	
6 à 8m	Sable fin marron beige à rare cailloutis et cailloux	19.5	5	27	
Geotech4 - Tre	mblay				
0 à 2m	Divers sablo/graveleux	22.4	0	37	
2 à 4m	Sable fin marron beige à cailloutis et cailloux	19.5	5	27	
4 à 6m	Sable Gris/gris vert	21.2	3	39	
Geotech5 - Ron	d-Point Villarcher				
0 à 2m	argiles limoneuses grises	19.9	5	26	
2 à 6m	Grave limono-sableuse gris/brun	22.4	0	37	
Geotech6 - Villa	archer				
0 à 1m	Graves sablo-limoneuse gris	22.4	0	37	
1 à 3m	Sable limoneux à cailloutis et cailloux marron	19.8	2	33	
3 à 4.5m	Graves sablo-limoneuse gris	22.4	0	37	
4.5 à 6.5m	Limon sableux fin beige à cailloutis et cailloux	20.2	2	32	

Tableau 26 : Caractéristiques mécaniques des sols retenus pour les calculs - système 2.2 aval

Certains profils possèdent une protection du talus amont (enrochements, perrés ...). Pour la plupart des cas, elles n'ont pas été repérées lors de la VTA, mais les sondages géophysiques en coupe montrent clairement leur présence sauf pour le secteur du Tremblay.

Les cohésions retenues sont bien inférieures à celles évaluées par les essais de cisaillement. Ceci s'explique par le fait que les essais à la boite, du fait de la difficulté de drainage, peuvent être surévalués. Afin de rester cohérent et dans un objectif sécuritaire, les cohésions sont pris égal à 0 pour les sols graveleux, 2 pour les sables limoneux et 5 pour les limons argileux et argiles.

### 5.2.3 Résultats des calculs

Le détail des résultats du calcul du coefficient de stabilité est présenté dans le tableau suivant.



Profil	secteur	DVI	DNA			Talus	
Géotechnique	topographique	PKL		Q10	Q100	Extrême	amont
Géotech1	Jean Lain	5.444	720	1.06	1.06	1.2	1.14
Géotech2 Rond-point Villarcher		4.981	1300	1.17	1.19	1.28	1.05
Cáotach2	Villarcher 1	4.208	1840	1.57	1.69	1.93	0.84
Geolecns	Villarcher 2	4.653	1600	0.99	1.04	1.16	0.84
Geotech4	Tremblay	3.543	2680	1.44	1.64	1.96	1.44
Geotech5	Rond-point Villarcher	4.981	1300	1.2	1.22	1.33	0.97
Contractor	Villarcher 1	4.208	1840	1.36	1.46	1.67	0.83
Geolecho	Villarcher 2	4.653	1600	0.98	1.02	1.12	0.9

Tableau 27 : Coefficients de sécurité calculés - Etude de la stabilité au glissement - système 2.2 aval

Les calculs de stabilité révèlent que pour la quasi-totalité des profils (sauf celui de Jean Lain et du Tremblay) les talus amont sont sensibles au glissement. Cela est cohérent avec les VTA, les pentes de talus amont sont très fortes et semble avoir été fortement érodé. En ce qui concerne les talus avals, malgré des crêtes de digues étroites et des pentes par endroit forte ils sont en majorité stables. Seul le profil de Villarcher avec les compositions de sol Geotech3 et Geotech6 est instable, ce qui est cohérent par rapport aux pentes très fortes relevées sur le secteur. A noter que l'instabilité est visible pour la Q10 car les coefficients de sécurité requis pour l'ouvrage sont supérieurs du fait de la fréquence plus importante des crues.

### 5.2.4 Conclusion - Stabilité au glissement

Les tronçons de digues instables au glissement d'après les calculs effectués avec le logiciel TALREN 4, suivant la constitution des digues et leur géométrie sont :

- Géotech3 Villarcher 1 : Talus amont ;
- Geotech3 Villarcher 2 : Talus amont et talus aval lors de Q10 ;
- Geotech5 Rond-Point Villarcher : Talus amont ;
- Geotech6 Villarcher 1 : Talus amont ;
- Geotech6 Villarcher 2 : Talus amont et talus aval Q10.

Le système d'endiguement 2.2 aval est donc sensible au phénomène de glissement et plus particulièrement sur la partie amont de la digue.

### 5.3 SE 2.3

### 5.3.1 Coupe étudiée

D'après les analyses topographiques et géophysiques, il y a un seul profil à étudier pour tout le tronçon.

Système d'endiguement	Tronçon géotechnique	PM (m)	Secteur topographique	commentaire
2.3	Geotech1	0 à 2500	S2.3	Profil type

Tableau 28 : Récapitulatif des profils types à étudier – système 2.3

La modélisation numérique est le suivant :



• Geotech1 : PM0 à PM 2500



Figure 31 : Geotech1 – système 2.3 – PKBDL 1.16 – PM1350 – Modèle TALREN

### 5.3.2 Données géotechniques retenues

Seulement 2 couches de sols sont retenues pour décrire ce système. Aucun sondage carotté n'a été effectué sur ce système, les sols sont alors choisies à partir de la géophysique, des essais pénétrométriques et tarière. Les caractéristiques des sols sont elles établies à partir des SC à proximité du système 2.2.

Geotech1									
Profondeur	Description	γ (kN/m3)	c' (kPa)	φ' (°)					
0 à 1m	sable limoneux à cailloutis et cailloux	19.8	2	33					
1 à 7m	Argile limono graveleuse gris/vert	19.9	5	26					

Tableau 29 : Caractéristiques mécaniques des sols retenus pour les calculs – système 2.3

### 5.3.3 Résultats des calculs

Profil	secteur	secteur PKBDL		ur PKBDL PM			Talus amont	
Géotechnique	topographique	TROOL		Q10	Q100	Extrême		
Geotech1	S2.3	1.16	1350	1.78	1.91	2.09	2.16	

Tableau 30 : Coefficient de sécurité calculés - Etude de la stabilité au glissement - système 2.3

### 5.3.4 Conclusion – Stabilité au glissement

Conclusion : D'après les calculs de stabilités effectués, il n'y a aucun risque au glissement, les coefficients sont tous bien supérieur à 1.

### **6 ENRACINEMENT DES ARBRES DANS LA DIGUE**

Une expertise a été réalisée par Arbeausolutions (Réf.[DA4]) sur les linéaires de digue concernés par ce diagnostic.

Les conclusions portent sur cinq types de risques que comporte la présence de végétation sur les digues :

- Erosion interne : la présence de systèmes racinaires dans la digue augmente le risque d'érosion de conduit (voir paragraphe 8.4.2.3).
- Erosion externe : phénomène d'affouillement dû à la formation de courants tourbillonnaires induits par la présence de souches/arbres sur le talus cote amont ; la présence d'arbres penchés accompagne le risque d'arrachement du parement amont ; la présence de racines pouvant détériorer le revêtement du parement amont.
- Instabilité en crue : arrachement d'un arbre pouvant porter atteinte à la géométrie de l'ouvrage et causer sa ruine ; chute d'un arbre dans le cours d'eau créant un embâcle pouvant modifier l'écoulement.
- Instabilité à la décrue : la détérioration du revêtement du parement amont par les systèmes racinaires entraine une infiltration d'eau saturant le corps de l'ouvrage ; le poids des arbres sur un ouvrage en terre saturé.

CNR INGÉNIERIE

• Surverse : chute d'un arbre en crête créant un point bas sur l'ouvrage ; embâcle mettant en charge l'ouvrage (hausse du niveau de l'eau).

Afin de synthétiser les données, les Tableau 31, Tableau 32 et Tableau 33 localisent et priorisent la végétation à risque suivant les systèmes.

	nombre d'arbres								
	bon état sanitaire	malade	gros	mort	penché	souche			
coté rivière	87	1	16	2	5	4			
coté terre	0	0	0	0	0	0			

Tableau 31 : Référencement de la végétation (Arbeausolutions) - système 2.1

Présence d'arbres pouvant entrainer des instabilités seulement sur le côté amont.

	nombre d'arbres							
	bon état sanitaire	malade	gros	mort	penché	souche		
coté rivière	507	0	27	0	12	19		
coté terre	286	3	27	0	12	3		

Tableau 32 : Référencement de la végétation (Arbeausolutions) - système 2.2 aval

La végétation est très dense sur le système d'endiguement 2.2 aval, beaucoup d'arbres en mauvais états sont présent sur le côté amont de la digue.

	nombre d'arbres								
	bon état sanitaire	malade	gros	mort	penché	souche			
coté rivière	4	0	0	0	1	0			
coté terre	0	0	0	0	0	0			

Tableau 33 : Référence de la végétation (Arbeausolutions) – Système 2.3

La digue du système 2.3 ne présenta pas d'arbres de grosses dimensions qui peuvent poser problème, il est cependant composé de nombreuses ronces et arbustes ce qui est moins problématique à l'érosion de conduit par exemple.

### **7 SATURATION DES DIGUES**

### 7.1 Calculs

La durée de la crue de projet Q100 ans est de 12 heures (0.5 jours). On peut approximer les conditions d'écoulement dans le corps de digue avec la loi de Darcy.

On retiendra que :

Loi de Darcy v = k x i

avec

- v : vitesse de l'eau,
- i : gradient hydraulique
- k : coefficient de perméabilité du sol

Or v = L/Dt, et i = Dh / L

(L : trajet de l'eau dans le sol, Dt : durée du trajet, Dh : différence de charge hydraulique)

Donc Dt = L /  $(k \times i) = L^2 / (k \times Dh)$ 

Les valeurs de perméabilité sont évaluées en fonction du matériau type constituant les digues.

### 7.1.1 SE 2.1

Les deux profils géotechniques présente des caractéristiques similaires dans le corps de la digue avec des matériaux à prédominances sablo-graveleuse.

profil géotechnique	secteur topographique	L (m)	H (m)	type de sol	Perméabilité (m/s)	t (s)	t (j)
Geotech1 Geotech2	S2.1 STTP57	9.8	0.77	sable/gravier	0.01	1.25E+04	0.14
	S2.1 STTP59	4.8	0.12	sable/gravier	0.01	1.92E+04	0.22

Tableau 34 : Temps avant saturation de la digue - écoulement à travers des digues - S2.1

En comparaison à la durée de montée d'une crue centennale (0.5 jour), les digues ont le temps d'atteindre le niveau de saturation. Cependant ces valeurs sont à prendre avec précaution car il n'y a pas de sondages sur ce système d'endiguement, les sols étant estimé d'après la géophysique et les SC du 2.2. De plus, les valeurs de perméabilité retenues sont surement surévaluées car bien supérieures à celles mesurées par essais Lefranc.

### 7.1.2 SE 2.2 aval

Le tableau suivant récapitule les durées d'écoulement nécessaires à l'établissement du régime permanent au sein des différentes digues étudiées :

profil géotechnique	secteur topographique	L (m)	H (m)	type de sol	Perméabilité (m/s)	t (s)	t (j)
Geotech1	Jean Lain	16	3	limon sableux	1.00E-04	8.53E+05	9.88
Geotech2	Rond-point Villarcher	12	2.5	sable limoneux	1.00E-04	5.76E+05	6.67
Gootoch?	Villarcher 1	12.5	1.8	sable limoneux	1.00E-04	8.68E+05	10.05
Geoleciis	Villarcher 2	21	3.8	gravier	1.00E-01	1.16E+03	0.01
Geotech4	Tremblay	17	2.1	sable/gravier	1.00E-02	1.38E+04	0.16
Geotech5	Rond-point Villarcher	12	2.5	argile	1.00E-07	5.76E+08	6666.67
Gaotach6	Villarcher 1	12.5	1.8	sable limoneux	1.00E-04	8.68E+05	10.05
Geotecno	Villarcher 2	21	3.8	sable	1.00E-02	1.16E+04	0.13

Tableau 35 : Temps avant saturation de la digue – écoulement à travers des digues – S2.2 aval

On en déduit que les digues composées de matériaux grossiers peuvent être saturées très rapidement. Par mesure de sécurité, les valeurs de perméabilité sont retenues en fonction de la couche constituant la majorité du corps de la digue, ce qui ne reflète pas la totalité de la digue. A noter que les coefficients de perméabilité retenus sont bien supérieurs à ceux mesurés par les essais Lefranc. Ainsi, les perméabilités et donc les temps de saturations surévalués.

Les digues qui seront potentiellement saturées par une crue sont celles de Villarcher 2 au PKL4.653 avec les profils Geotech3 et 6 ainsi que le profil du Tremblay avec la composition Geotech4. Les autres digues ne sont pas saturées par le passage d'une crue.

1.1.3 JL Z.J	7.1	.3	SE	2.3
--------------	-----	----	----	-----

secteur topographique	PKLBD	L (m)	H (m)	type de sol	Perméabilité (m/s)	t (s)	t (j)
S2.3	1.16	11.8	1.1	sable limoneux	1.00E-04	1.27E+06	14.65

Tableau 36 : Temps avant saturation de la digue – écoulement à travers la digue – S2.3

La digue est composé de matériaux fin, et est faiblement en charge même lors de crue centennale, le temps de saturation est donc important sur ce système et la digue n'est pas entièrement saturée lors du passage d'une crue centennale.

### 8 ÉROSION INTERNE – DIGUES EN TERRE

### 8.1 Définition

L'analyse de l'érosion interne présentée dans ce diagnostic fait référence aux éléments connus à ce jour, notamment au dernier bulletin de l'ICOLD (01/2013) et le guide ERINOH (07/2014). Ce phénomène est, en effet, encore mal connu et fait l'objet de nombreux projets de recherche et développement actuellement en cours.

Il existe quatre mécanismes d'érosion interne (Figure 32) :

- La suffusion opère lorsque la fraction fine a la capacité de circuler au travers de la structure porteuse d'un sol.
- L'érosion de contact s'opère lorsque les conditions de filtre entre deux couches de sol ne sont pas respectées. Une circulation d'eau à l'interface entre les deux couches de sol pourra emporter les particules fines ;
- L'érosion de conduit consiste à l'érosion des parois d'un défaut préexistant dans l'ouvrage ;

• L'érosion régressive (de surface ou de conduit) est l'entrainement de particules à partir de l'exutoire qui crée une cavité qui va progresser vers l'amont, soutenue par un toit constitué d'un couche imperméable ;

Erosion interne de co	nduit ou de fissure	<u>Erosion interne régr</u> locale au fond	<u>essive</u> (généralisée ou d'un conduit)
	Entraînement des particules des lèvres de la fissure ou de la surface de la cavité sous l'action de l'écoulement de l'eau		Entraînement des particules sous une surface cohésive ou rigide à l'exutoire de l'écoulement souterrain d'abord à la paroi aval et ensuite au fond du conduit creusé de l'aval vers l'amont
Erosion intern	e de contact	<u>Suffusion</u> , (suffosion) d'un sol ou éro	ou instabilité interne sion volumique
	Entrainement des particules d'un sol fin le long de son contact avec un sol grossier par l'écoulement traversant le sol grossier		Entraînement des particules fines libres de se mouvoir à travers les vides des particules grossières d'un sol à la granulométrie discontinue

Figure 32 : Mécanismes d'initiation d'érosion interne

Les deux premiers phénomènes se développent le long de zones de faiblesses (interface sol/ Génie Civil, racines, terriers). Une fois le processus initié son évolution et ses conséquences dépendent des conditions hydrauliques (vitesse, charge) et des paramètres physiques de l'eau (température, viscosité).

Pour l'initiation des deux derniers phénomènes deux conditions doivent être remplies :

- la condition géométrique : les pores du sol les plus grossiers ne doivent pas retenir les particules les plus fines (règle des filtres);
- la condition hydraulique : la vitesse de circulation doit être suffisante pour arracher et entrainer les particules.

### 8.2 Méthodologie et profils types

Tout comme pour l'analyse de stabilité au glissement, les profils types de digues identifiés au paragraphe 5.1 sont testés aux différents mécanismes d'érosion interne.

Les quatre risques d'érosion interne sont évalués indépendamment les uns des autres :

- Pour chaque couche de matériaux identifiée en ce qui concerne la suffusion ;
- A l'interface entre les couches pour l'érosion de contact ;
- Au droit des singularités pour ce qui concerne l'érosion de conduit ;
- Grâce à la capacité d'un sol à développer un conduit pour l'érosion régressive.

Les mécanismes d'initiation sont calculés à partir de critères géométriques et sont ensuite croisés aux données hydrauliques et à la cohésion des matériaux.

Enfin un tableau permettra de croiser ces risques entre eux et de les confronter à la géométrie des digues afin de cerner les zones les plus sensibles si elles existent.

### 

La sensibilité à l'érosion interne sera traitée grâce aux feuilles de calculs proposées par le CACOH, celles-ci se basent sur les rapports de l'ICOLD<sup>1</sup> et d'ERINOH<sup>2</sup>.

### 8.3 Érosion par suffusion

#### 8.3.1 Méthodes d'évaluation

La suffusion entraine l'érosion sélective des particules les plus fines à travers la matrice constituée d'éléments plus grossiers formant le squelette du sol. Ce phénomène se développe au sein d'une masse de sol dont la granulométrie n'assure pas l'autofiltration. Pour l'initiation d'érosion interne par suffusion les conditions suivantes doivent être satisfaites :

- Les dimensions des particules fines doivent être inférieures à celle du matériau constituant la matrice principale du sol examiné ;
- La quantité des particules fines doit être inférieure à celle nécessaire pour remplir les vides du squelette solide de la matrice du sol examiné ;
- La vitesse d'écoulement doit être significative afin d'imposer aux particules fines une contrainte plus importante que la contrainte appliquée par le sol environnant.

Les essais granulométriques des sols de la digue permettent une première évaluation de leur sensibilité à l'érosion par suffusion (condition géométrique).

Les méthodes suivantes sont proposées dans la feuille de calcul du CACOH :

- Méthode de Kezdi ;
- Méthode de Sherard ;
- Méthode de Kenney & Lau ;
- Méthode de Kenney and Lau fusionnée avec celle de Kezdi (Li and Fannin);
- Méthode de Burenkova
- Probabilité de Wan et Fell

La routine utilise la synthèse de Chapuis (1992) pour simplifier l'interprétation des trois premiers critères cités ci-dessus. Celle-ci consiste à étudier la pente de la courbe granulométrique.

Chacun des critères étudiés caractérise l'échantillon comme « stable » si celui-ci l'est pour la majorité des granulométries de l'échantillon, dans le cas contraire il est « instable ». Lorsqu'il n'est pas possible de trancher, l'échantillon est « non concluant ».

Nous obtenons alors 6 classifications (une pour chaque critère étudié) pour un même échantillon. Avec ces 6 classifications, nous procédons de la même manière pour conclure sur la stabilité de l'échantillon. Si 4 critères ou plus déterminent l'échantillon comme « stable » alors il est conclu comme « stable », de même pour « instable ». L'échantillon est classé « non concluant » lorsque :

- Il comporte 3 critères « stables » et 3 critères « instables » ;
- Il comporte 2 critères ou plus classés « non concluant ».

Lorsque les particules grossières sont noyées parmi les particules fines, le sol n'est plus sensible à la suffusion. Le phénomène de suffusion est constaté pour un pourcentage limite de particules fines compris entre 20% (granulométrie étalée) et 35% (granulométrie étroite), au-delà, la fraction fine forme la matrice du sol.

**C** INGÉNIERIE

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> CIGB ICOLD, Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundation, Bulletin 1xx, Internal erosion processes and engineering assessment, 22 January 2013.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> DEROO L. FRY J.-J. Projet national ERINOH Thème H Erosion interne – Approches et besoins en matière d'ingénierie, Juillet 2014.

# 8.3.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion par suffusion du système d'endiguement 2

#### 8.3.2.1 Système 2.1

Le risque d'érosion par suffusion ne peut être appréhendé par les méthodes classiques granulométriques sur ce secteur du fait de l'absence de reconnaissance géotechnique.

Cependant grâce à l'étude géophysique réalisée et en fonction des SC réalisés à proximité sur le système 2.2 aval, la composition des sols est estimée. Les sols sélectionnés tels que graves sablo-limoneuse et argile limono graveleuse sont stables d'après les calculs. Pour ce qui est de la couche de limon sableux gris, elle est inexploitable à cause de son faible taux de récupération (les caractéristiques des sols étudiés sont décrites dans la partie suivante Système 2.2 Aval).

Conclusion : Il n'y a pas de sondage carotté sur ce système d'endiguement, il n'est donc pas possible de conclure rigoureusement sur la suffusion. Mais d'après les sondages à proximité le système est stable à ce phénomène.

#### 8.3.2.2 Système 2.2 Aval

Les échantillons analysés lors des essais granulométriques sont ceux des sondages SC1, SC2, SC3, SC4, SC5 et SC6. Ci-après les courbes granulométriques obtenues.



Figure 33 : courbes granulométriques - système 2.2 aval

Il y a en totalité 16 granulométries effectuées.

Grâce à cette comparaison des granulométries, 3 types de sols sont identifiables. Nous remarquons 7 sols avec une granulométrie fine de type limon ou argile. Ensuite 6 sols avec des caractéristiques intermédiaires et 2 couches de sols aux caractéristiques plus grossières composées essentiellement de graves. En ce qui concerne la stabilité à la suffusion, ces caractéristiques sont liées. Les sols principalement composés de fines (sols composant les couches du SC1 hormis les graves sableuses grises, le sable fin marron beige SC6, limon sableux gris SC4, limon sableux fin beige SC5, Argile limono graveleuse gris/vert SC3) sont stable puisque les plus grosses particules sont noyées dans une matrice de particules fines.

Les sols les plus grossiers constitués de graves (grave sableuse gris SC1, grave sablo-limoneuse SC2) sont eux aussi stable puisque leur pourcentage de particules fines est très faible, la matrice est donc essentiellement grossière.

### 

Les sols intermédiaires sont d'après les calculs, quant à eux tous instables. Ils disposent en effet de particules plus fines et de particules plus grossières et le mouvement de ces particules fines est probable. Cependant pour beaucoup de ces sols le pourcentage de récupération est faible et il n'est pas possible de conclure. De plus, certains sols ont un pourcentage de particules fines faibles (<20%), et ne font donc pas parti des sols sensibles à la suffusion.

La sensibilité à la suffusion est d'autant plus forte si les sols considérés sont en charge. Pour une crue Exceptionnel centennale c'est toujours le cas, pour une crue décennale il peut s'agir de la moitié de la couche de sol.

Sondage	Echantillon	Profondeur (m)	% de récupération	en charge Q10	en charge Q100	% de particules fines (<0.08mm)	Stabilité à la suffusion	profil géotechnique associé
	Graves sableuse gris	2.4 à 2.9	100	oui	oui	9	stable	Geotech1
	sable fin à limon	2.9 à 3.4	100	oui	oui	45	stable	Geotech1
SC1	Limon sableux	3.4 à 4.4	100	oui	oui	54	stable	Geotech1
	Sable limono argileux	5 à 5.4	100	sous lit de rivière	sous lit de rivière	63	stable	Geotech1
sca	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	1.20 à 2.50	30	50 % de la digue	oui	25	instable	Geotech1, 2, 3
302	Graves sablo-limoneuse gris	4.40 à 5.50	40	oui	oui	8	stable	Geotech1, 2, 3, 4, 5, 6
	sable limoneux à cailloutis et cailloux	1.0 à 2.0	80	50 % de la digue	oui	19	stable	Geotech2
SC3	Sable gris à cailloutis et cailloux	4.0 à 4.7	100	oui	oui	17	stable	Geotech2
	Argile limono graveleuse gris/vert	6.09 à 6.24	85	sous lit de rivière	sous lit de rivière	75	stable	Geotech2, 5
	Sable limoneux à cailloutis et cailloux marron	1.4 à 2.5	50	oui	oui	31	instable	Geotech6
SC4	limon sableux gris à cailloutis et cailloux	3.6 à 4	90	oui	oui	60	stable	Geotech6
	Limon sableux fin beige à cailloutis et cailloux	5.5 à 7	90	sous lit de rivière	sous lit de rivière	16	stable	Geotech6
SCE	sable limoneux à cailloutis et cailloux	1 à 2.5	50	50 % de la digue	oui	20	non concluant	Geotech2
305	Limon sableux fin beige à cailloutis et cailloux	3.05 à 3.32	100	oui	oui	75	stable	Geotech2
	Sable fin marron beige à cailloutis et cailloux	1 à 2	100	50 % de la digue	oui	50	stable	Geotech4, 3
SC6	Sable gris foncé à cailloutis et cailloux	6 à 7	75	sous lit de rivière	sous lit de rivière	27	instable	Geotech4

Tableau 37 : Sensibilité à la suffusion des différents sols étudiés – Système 2.2 aval

Beaucoup d'échantillons ont un pourcentage de récupération faible (<90%), une partie de l'échantillon n'est pas exploité et les analyses granulométriques sont donc faussées. Il n'est donc pas possible de déterminer la stabilité pour un certain nombre d'échantillon.



#### Conclusion :

- SC1 : Les 4 couches de sols étudiés sont exploitables car le pourcentage de récupération de chacune d'elle est de 100%. 3 des 4 échantillons sont stables car le pourcentage de particules fine est supérieur à 35%, la matrice est donc composé de fines. L'autre échantillon est composé d'une matrice grossière, et donc stable également.
- SC2 : Les 2 échantillons prélevés ont un pourcentage de récupération bien trop faible pour être exploitable ;
- SC3 : l'échantillon de sable limoneux à cailloutis et cailloux qui constituent le corps de la digue est instable. Les 2 autres échantillons sont eux stable ;
- SC4 : l'échantillon de sable limoneux est instable, mais son pourcentage de récupération est très faible. Les deux autres couches qui sont composés de limon sont eux stable ;
- SC5 : le premier échantillon n'est pas concluant à cause de son faible taux de récupération, l'échantillon prélevé plus en profondeur est lui stable grâce à sa matrice de particules fines ;
- SC6 : échantillon stable avec une matrice principalement composée de fines.

Le risque de suffusion est difficile à estimer car les couches sujet à ce phénomène ont un faible taux de récupération. Ce phénomène est cependant à surveiller sur ce système d'endiguement.

#### 8.3.2.3 Système 2.3

Le risque d'érosion par suffusion ne peut être appréhendé par les méthodes classiques granulométriques sur ce secteur du fait de l'absence de reconnaissance géotechnique.

Il a été mis en évidence dans la partie précédente que pour une crue centennale la digue n'est pas saturé, ce qui réduit considérablement le risque de suffusion sur ce tronçon. De plus le lit de la rivière est en eau seulement lorsque la Leysse est en situation de crue.

### 8.4 Érosion de contact

#### 8.4.1 Méthodes d'évaluation

L'érosion de contact est induite par le détachement progressif de particules à l'interface entre deux milieux de granulométries différentes soumis à un écoulement parallèle. Ainsi, une fois que le phénomène d'érosion de contact se déclenche, les fines à l'interface entre les deux couches sont détachées et transportées à travers les pores d'une couche de gravier ou sable grossier. Ce phénomène induit un lessivage des particules les plus fines du sol.

Le critère utilisé est la règle de filtre de Terzaghi, retenue dans la routine élaborée par le CACOH, et qui consiste à dire que :

- Si le rapport du diamètre D<sub>15</sub> des matériaux grossiers sur le diamètre d<sub>85</sub> des matériaux fins est inférieur ou égal à 4, la migration des particules fines dans la porosité du sol grossier est impossible, quel que soit la charge hydraulique.
- Si ce rapport (D<sub>15</sub>/d<sub>85</sub>) est compris entre 4 et 20, le risque d'érosion de contact est lié également à la charge hydraulique, l'évaluation de ce risque est alors plus complexe.
- Si le rapport est supérieur à 20, le contraste granulométrique est suffisamment grand pour que les particules fines ne ressentent plus l'influence géométrique des grains grossiers. L'érosion des particules fines est alors fonction de la vitesse d'écoulement dans le sol.

Cette méthode d'évaluation du risque d'érosion de contact est applicable dans la configuration « sol grossier sur sol fin », dans le cas inverse, « sol fin sur sol grossier », la même règle de filtre est appliquée. Cependant, concernant la condition hydraulique d'initiation, peu de données expérimentales sont disponibles, les formules proposées dans la routine sont donc à prendre avec précaution.

# 8.4.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion de contact du système d'endiguement 2

#### 8.4.2.1 Système 2.1

De la même manière que pour la suffusion, aucun sondage carotté n'ayant été effectué il faut se référer aux caractéristiques de sols du système 2.2. Les risques d'instabilités à l'érosion de contact sont décrits dans la partie suivante Système 2.2 aval. Pour ce tronçon 2.1, seule l'interface « sable limoneux à cailloutis et cailloux / argile limoneuse grises » présente un risque, cependant cette interface se situe sous le terrain naturel.

#### Conclusion : Le risque d'érosion de contact est faible sur le système d'endiguement 2.1.

#### 8.4.2.2 Système 2.2 aval

L'érosion de contact a été considérée par rapport aux profils géotechniques établis pour les modèles simplifiés TALREN. Le tableau ci-dessous reprend tous les cas où il y a une couche de sol grossier avec une couche de sol plus fine.

Profil géotechnique	Echantillon	Туре	Profondeur (m)	D15 (mm)	d85 (mm)	D15/d85	Sensibilité à l'EC
Geotech1	Graves sablo-limoneuse gris	sol grossier	0 à 1.5	0.4	-	0.024	Nullo
SC2, SC1	Limon sableux gris à cailloutis et cailloux	sol fin	1.5 à 3.5	-	17	0.024	Nulle
	Grave limono-sableuse gris/brun	sol grossier	0 à 0.6	0.4	-	0.020	Nulle
Geotech2	sable limoneux à cailloutis et cailloux	sol fin	0.6 à 2.1	-	20		
SC5	sable limoneux à cailloutis et cailloux	sol grossier	0.6 à 2.1	0.07	-	7.0	
	Limon sableux fin beige à cailloutis et cailloux	sol fin	2.1 à 6.6	-	0.01	7.0	Oui
	sable limoneux à cailloutis et cailloux	sol fin	0.6 à 2.1	-	20		
Geotech3	Grave limono-sableuse gris/brun	sol grossier	0 à 0.6	0.4	-	0.020	Nulle
Aucun SC	Grave limono-sableuse gris/brun	sol grossier	0 à 0.6	0.4	-	2.0	Nullo
	Sable fin marron beige à cailloutis et cailloux	sol fin	2 à 4	-	0.2	2.0	Nulle
Geotech4	Divers sablo/graveleux	sol grossier	0 à 2	0.4	-	2	Nullo
SC6	Sable fin marron beige à cailloutis et cailloux	sol fin	2 à 4	-	0.2	2	Nulle
Geotech5	argiles limoneuses grises	sol fin	2.1 à 6.6	-	0.01		
profil particulier aucun SC	Grave limono-sableuse gris/brun	sol grossier	0 à 0.6	0.4	-	40	Oui
	Graves sablo-limoneuse gris	sol grossier	0à1	0.4	-	0.01	Nulle
Geotech6	Sable limoneux à cailloutis et cailloux marron	sol fin	1à3	-	40	0.01	Nulle
SC4	Graves sablo-limoneuse gris	sol grossier	3 à 4.5	0.4	-	0.022	Nullo
	Limon sableux fin beige à cailloutis et cailloux	sol fin	4.5 à 6	-	18	0.022	Nulle

Tableau 38 : Sensibilité à l'érosion de conduit – système 2.2 aval

La plupart des couches de sols ne sont pas **sensibles à l'érosion de conduit**. Le profil geotech2 est sujet à ce phénomène. Le profil 5 est lui très sensible à ce phénomène puisque d'après le profil type, 2 couches de **CONR** INGÉNIERIE

granulométrie très différentes sont en contacts. Ce résultat est à relativiser sachant qu'aucun sondage carotté n'a pu être réalisé à cet endroit et le profil type géotechnique a été établit à partir des reconnaissances géophysiques.

En conclusion, les sols testés sont stables vis-à-vis de l'érosion de contact. Sur le profil géotech5, une vérification avec un sondage serait nécessaire pour conclure sur l'instabilité du profil.

#### 8.4.2.3 Système 2.3

Nous n'avons pas de sondage carotté concernant le système d'endiguement 2.3, et donc pas d'informations pour conclure sur la sensibilité à l'érosion de contact. Cependant le sondage au pénétromètre dynamique et le sondage par tarière nous indiquent que la structure du sol est faiblement différente entre le corps de la digue (majoritairement sableuse) et ses fondations (majoritairement limoneuses), ce qui **réduit le risque d'instabilité de digue à cause de l'érosion de contact.** 

### 8.5 Érosion de conduit

### 8.5.1 Méthode d'évaluation

Ce phénomène est par définition lié à une anomalie ponctuelle, géologique ou géométrique, ou à un défaut de réalisation. Il peut se développer dans les sols cohésifs ou dans des sols contenant suffisamment de fines pour qu'un conduit puisse se former sans s'effondrer.

Les anomalies qui pourraient entraîner une érosion de conduit sont :

- Des ouvrages traversant (buses, aqueduc, ...)
- Une végétation dense et imposante
- Des terriers d'animaux

La présence d'ouvrages maçonnés au travers de la digue entraine des défauts associés :

- A l'interface ouvrage/digue : des tassements différentiels peuvent potentiellement influer sur l'état de contrainte dans le remblai (zone de remblai déconfiné autour de l'ouvrage maçonné)
- A des défauts dans l'ouvrage traversant (fissure, fuites...)

#### 8.5.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion de conduit

La localisation de l'ensemble des ouvrages traversant l'endiguement est présenté dans le rapport de la VTA de 2015.

#### 8.5.2.1 Système 2.1

PKL	réseau Iongitudinale	réseau traversant	catégorie	type	diamètre	écoulement	utilisation
8.9	-	FD 200	RHF Réseau Hydraulique Fermé	CON CONduite d'eau	200	PRE sous PREssion	EDI Eau de Distribution
8.8		conduite de gaz DN400	RTE Réseau de Télécom et d'Energie	GDF	250	-	-

#### Les réseaux sur le système d'endiguement 2.1 sont présentés dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Réseau présent sur le système 2.1

Il y a présence de système(s) traversant le corps de la digue pouvant créer l'érosion de conduit. Il faudrait avoir l'information sur la profondeur de ceux-ci pour conclure plus précisément. La présence d'arbres de grande dimensions favorise également l'érosion de conduit, cependant il n'a a pas de végétation sur le talus amont, le système racinaire n'est pas traversant.



Conclusion : Le risque d'instabilité à l'érosion de conduit est présent, mais relativement faible. Le critère de Lane, calculant la stabilité à l'érosion interne en fonction de la géométrie de la digue et des gradients hydrauliques s'appliquant sur l'ouvrage, permettra de conclure définitivement sur le risque d'instabilité à l'érosion interne.

PKL	réseau Iongitudinale	réseau traversant	catégorie	type	diamètre	écoulement	utilisation
4.4	-	branchement poteau incendie	RHF Réseau Hydraulique Fermé	CON CONduite d'eau	-	GRA GRAvitaire	EDI Eau de Distribution
4.2	-	Ø400 (certainement sous le lit de la rivière)	RTE Réseau de Télécom et d'Energie	GDF	400	-	-
4.1 à 7.5	в Ø1200	traversant au PKL 4.1	RHF Réseau Hydraulique Fermé	CON CONduite d'eau	1200	GRA GRAvitaire	EUS Eau Usées, assainissement
5.8 à 7.3	FG300	semi traversant (talus aval) au PKL 5.8	RHF Réseau Hydraulique Fermé	CON CONduite d'eau	300	PRE sous PREssion	EDI Eau de Distribution
4.9 à 5.8	MT 3x240 + 25 Alu	semi traversant (talus aval) au PKL 4.9	RTE Réseau de Télécom et d'Energie	EFT ligne EdF et/ou pTd	-	-	-

#### 8.5.2.2 Système 2.2 aval

Tableau 40 : réseaux présent sur le système 2.2 aval

Sur le système d'endiguement 2.2 aval, peu de réseaux traversant sont présent et ne devrait pas affecter la stabilité de la digue. Cependant des réseaux sont présents dans le corps de la digue longitudinalement, notamment l'émissaire des eaux usées avec un diamètre très important qui peut affecter la stabilité.

La végétation sur cette digue est également très problématique. Une végétation très dense est présente sur les talus amont et aval avec parfois la présence d'arbres de grosses dimensions avec un système racinaire important favorisant l'érosion de conduit.

#### Le système d'endiguement 2.2 aval est donc très sensible à l'érosion de conduit.

8.5.2.3 Systeme 2.3	8.5.2.3	Système 2.3
---------------------	---------	-------------

PKBDL	réseau longitudinale	réseau traversant	versant catégorie type		diamètre	écoulement	utilisation
2.3	-	France Telecom	RTE Réseau de Télécom et d'Energie	EFT ligne EdF et/ou pTd	-	-	-
2.3	-	FD Ø200 FD Ø200 Hydra Fer		CON CONduite d'eau	200	GRA	EDI
0.9	-	MT 3x150 + 25 Alu (1 PQ Ø160)	RTE Réseau de Télécom et d'Energie	EFT ligne EdF et/ou pTd	160	-	-
0	-	France Telecom	RTE Réseau de Télécom et d'Energie	EFT ligne EdF et/ou pTd	-	-	-

Tableau 41 : réseau présent sur le système 2.3

Il y a présence de quelques réseaux traversant sur ce système d'endiguement qui peuvent favoriser le risque d'érosion de conduit, mais puisque la digue est rarement en charge (que lorsque la Leysse est en crue) **ce** risque est limité.

Le risque d'érosion de conduit est d'autant plus limité que la végétation est beaucoup plus faible comparé aux autres systèmes d'endiguement.

### 8.6 Critère de Lane

Le critère de Lane est un critère général pour déterminer la stabilité d'une digue à l'érosion interne. Lorsqu'aucune donnée sur les sols n'est disponible. Ce critère se base plus sur la géométrie des digues.

Lane a défini des règles empiriques en comparant la charge hydraulique au cheminement hydraulique sous l'ouvrage. La constante de Lane est le rapport C (inverse du gradient critique ic) qui se définit de la manière suivante :

 $C = (\Sigma V + 0.33 \Sigma I) / H$ 

Avec :

V : le cheminement vertical

I : le cheminement horizontal

H : la charge sur la digue

Il n'y a pas de risque de Renard si les coefficients atteignent les valeurs suivantes :

Silts – sables fins	C = 8.5
Sables fins	C = 7
Sables et graviers moyens	C = 3.5
Sables, gros graviers et galets	C = 3

### 

nom du profil	PKL	Risque de Renard Q10	Risque de Renard Q100
S2.1 STTP57	8.91	non	non
S2.1 STTP59	8.88	non	non

Tableau 42 : sensibilité au critère de Lane - système 2.1

Le lit de la rivière étant fortement creusé par rapport au terrain naturel, même lors de crues centennales la digue est faiblement en charge, c'est pourquoi le risque de renard est nul pour Q10 et Q100.

Conclusion : Le système d'endiguement 2.1 n'est pas sensible au phénomène d'érosion interne.

nom du profil	PKL	Risque de Renard Q10	Risque de Renard Q100
Jean Lain	5.444	oui	oui
Rond-point Villarcher	4.981	oui	oui
Villarcher 1	4.208	non	oui
Villarcher 2	4.653	non	oui
Tremblay	3.543	non	non

Tableau 43 : sensibilité au critère de Lane – système 2.2 aval

Les profils des digues étant relativement étroit sur le système d'endiguement 2.2 aval, il n'est pas étonnant de voir que la sensibilité est importante pour une crue centennale voire une crue décennale sur certains profils. Il est rappelé que ce critère est très encadrant. Nous retiendrons principalement de ce calcul que le secteur du Tremblay ne présente pas de risque d'instabilité à l'érosion.

nom du profil	PKL	Risque de Renard Q10	Risque de Renard Q100	
S2.3	0.05	oui	oui	

Tableau 44 : sensibilité au critère de Lane – système 2.3

Le profil critique du système d'endiguement 2.3 est sensible au critère de Lane pour des crues décennales et centennales. Il faut cependant rappeler que ce critère est très encadrant, et que cette digue est en charge seulement lors de crues.

### 8.7 Claquage hydraulique

Le claquage hydraulique se produit lorsqu'une couche imperméable, type argile limoneuse, ne permet pas la remontée de la nappe en aval de la digue. Dans ce cas, la charge en aval de la digue devient très importante et des sous pressions peuvent engendrer le claquage hydraulique à l'aval de la digue.



La configuration nécessaire au phénomène de claquage hydraulique est présentée sur la Figure 34.

Figure 34 : Claquage hydraulique - Configuration requise

Sur toutes les configurations étudiées, il n'y a pas de couche d'argile ou de matériaux imperméable en pied de digue au-dessus d'une couche perméable. La configuration la plus souvent présente est une fondation en matériaux fin, mais pas de couche perméable en dessous.

Le risque de phénomène de claquage hydraulique est absent sur l'ensemble des systèmes d'endiguements étudiés.

### 8.8 Érosion régressive

### 8.8.1 Méthodes d'évaluation

Le guide ERINOH précise que l'érosion régressive s'initie sous les conditions suivantes :

- 1. Les matériaux sont pulvérulents (sans cohésion) ;
- 2. Les écoulements diffus (ravinement) débouchent à l'aval, ou débouchent dans un milieu présentant des vides suffisants pour accueillir les particules érodées (rocher fissuré, alluvions grossières...).
- 3. Présence d'un toit (couche d'argile, ouvrage maçonné) claqué par les sous-pressions capable de soutenir le conduit.

L'érosion régressive peut être de surface (ravinement) ou de conduit (initiation du conduit sur le talus aval ou dans un milieu pouvant accueillir les particules érodées).

L'érosion régressive est évaluée seulement sur les secteurs présentant un talus aval.

### 8.8.2 Synthèse des résultats - Sensibilité à l'érosion régressive

#### Erosion régressive de conduit

L'érosion régressive de conduit peut se développer dans un ouvrage composée d'une couche imperméable (argile) reposant sur un sol sableux. Celle-ci s'initie par le claquage de la couche imperméable puis progresse dans le sol sableux vers l'amont sous la condition de la tenue du conduit.

D'après les reconnaissances géotechniques et les profils types réalisés, aucun d'entre eux ne présente une configuration permettant l'initiation d'une érosion régressive de conduit. En effet, comme expliqué pour le claquage hydraulique les sols contenant de l'argile sont en fondation.

Le risque d'érosion régressive de conduit est inexistant sur les linéaires étudiés.

#### Erosion régressive de surface

L'érosion régressive de surface nécessite un écoulement sur le parement aval de la digue pour se développer. Aucun désordre de ce type n'a été repéré lors de la VTA. Le risque d'érosion régressive de surface est à ce jour inexistant.

Il est cependant à surveiller sur le système du bras de décharge car pour un temps de retour de Q100 il y a surverse.

Il convient tout de surveiller tout signe de ravinement sur le talus aval pendant et après une crue mettant en charge la digue.

### 8.9 Synthèse de l'érosion interne

Les résultats des études de chacun des tronçons de digue pour chaque phénomène d'érosion interne sont résumés dans les tableaux suivant.

	Sensibilité à l'érosion interne											
Secteur	profil	РМ	Secteur topographique	Critère de Lane	Suffusion	Erosion de contact	Erosion de conduit	Erosion régressive	Claquage hydraulique	Observations		
Contractor	Controph1	65	S2.1 STTP57		stable	stable stable	stable Inexistant	Inexistant	Inexistant			
Système	Geolechi	92	S2.1 STTP59	stabla						Pas de sondages carottés pour		
2.1 Geote	Castash2	65	S2.1 STTP57	stable						évaluer la composition.		
	Geotecn2	92	S2.1 STTP59									

Tableau 45 : Synthèse de l'érosion interne - Système2.1

		Sensibilité à l'érosion interne												
Secteur	profil	РМ	Secteur topographique	Critère de Lane	Suffusion	Erosion de contact	Erosion de conduit	Erosion régressive	Claquage hydraulique	Observations				
	Geotech1 PM0 SC1, SC2 PM1	PM0 à PM1310	Jean Lain	Instable Q10 Instable Q100	non concluant	Faible	Elevée	Inexistant	Inexistant	Végétation très importante				
	Geotech2 SC5	PM1325 à PM2020 + PM2105 à PM2750	Rond-Point Villarcher	Instable Q10 Instable Q100	Faible à modérée	Modéré	Elevée	Inexistant	Inexistant	Végétation très importante				
	Geotech3	PM2020 à	Villarcher 1	Stable Q10 Instable Q100 Stable	Modérée	Faible	Elevée	Inexistant	Inexistant	Pas de Sondage Carotté donc estimation de				
Aucun SC	Aucunse		Villarcher 2	Q10 Instable Q100						Végétation très importante				
Système 2.2	<b>Geotech4</b> SC6	PM2750 à PM3000	Tremblay	Stable Q10 Stable Q100	Faible	Faible	Elevée	Inexistant	Inexistant	Végétation très importante				
Geotech5 aucun SC Geotech6 SC4	PM1310 à PM1325	Rond-Point Villarcher	Instable Q10 Instable Q100	Faible	Elevée	Elevée	Inexistant	Inexistant	Pas de Sondage Carotté donc estimation de la suffusion Végétation très importante					
	Geotech6	DM1025	Villarcher 1	Stable Q10 Instable Q100		Eaible	Elováo	Inovistant	Inovistant	Végétation				
	LINIT222	Villarcher 2	Stable Q10 Instable Q100	MODELEE	ומוטופ	LIEVEE	mexistant	mexistant	importante					

Tableau 46 : Synthèse de l'érosion interne – Système 2.2 aval



Sensibilité à l'érosion interne										
Secteur	Localisation	РМ	critère de Lane	Suffusion	Erosion de contact	Erosion de conduit	Erosion régressive	Claquage hydraulique	Observations	
Système 2.3	Bras de décharge Leysse RD	0 à 2500	Instable Q10 Instable Q100	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Pas de sondages carottés donc estimation de la structure des sols	

Tableau 47 : Synthèse de l'érosion interne - Système 2.3

### 9 Erosion externe du talus amont

### 9.1 Affouillement

L'étude de l'affouillement du lit de la rivière, pouvant impacté le pied de digue amont, nécessite la connaissance de la lithologie du lit de la rivière.

Afin d'évaluer l'épaisseur des fonds perturbés par l'écoulement, la relation suivante est utilisée :

$$Y = 0.73 \times \frac{q^{2/3}}{d_{50}^{1/6}}$$
(1)

Avec : q débit réduit (=débit/largeur cours d'eau) en  $m^3/s$ ,  $d_{50}$  diamètre moyen en m.



Fig. 6 : Fonds non perturbés en période de crue

Figure 35 : Explication de la formule - Profondeur d'affouillement

Cette formule n'est à priori pas adaptée pour le calcul d'affouillement sur un tronçon homogène de cours d'eau. En effet, celle-ci s'applique pour le calcul au droit d'un rétrécissement. Les résultats ci-après sont donc à considérés avec précaution.

nom du profil	PKL	d50 (m)	Q10 (m3/s)	hauteur d'eau HQ10 (m)	Affouillement Q10 (m)	Q100 (m3/s)	hauteur d'eau HQ100 (m)	Affouillement Q100 (m)			
S2.1 STTP57	8.91	0.05	168	3.06	1.93	340	4.19	2.68			
S2.1 STTP59	8.883	0.05	168	2.93	1.61	340	4.09	3.11			

### 9.1.1 Système 2.1

Tableau 48 : Profondeur des fonds mobilisés par l'écoulement – Système 2.1

Les calculs ont été menés en considérant un diamètre moyen des particules composant le lit de la rivière de 5 cm. D'après les résultats, l'affouillement est compris entre 2.68 et 3.11m au maximum qui sont des valeurs très élevées. Dans les faits, l'armage de la Leysse permet de réduire ce phénomène. De plus, la formule utilisée s'applique majoritairement au droit des ponts. Nous retiendrons en moyenne un affouillement d'environ 1.5 m voire 2 m.

nom du profil	PKL	d50 (m)	Q10 (m3/s)	hauteur d'eau HQ10 (m)	Affouillement Q10 (m)	Q100 (m3/s)	hauteur d'eau HQ100 (m)	Affouillement Q100 (m)
Jean Lain	5.444	0.05	180	3.41	1.62	290	4.51	1.47
Rond-point Villarcher	4.981	0.05	180	3.45	1.78	290	4.50	1.53
Villarcher 1	4.208	0.05	180	3.49	1.91	290	4.37	2.02
Villarcher 2	4.653	0.05	180	3.49	1.72	286	4.55	1.25
Tremblay	3.543	0.05	190	2.96	1.45	356	4.35	0.64

#### 9.1.2 Système 2.2 aval

Tableau 49 : Profondeur des fonds mobilisés par l'écoulement – Système 2.2 aval

D'après les calculs, l'affouillement sur la Leysse est de 2.02m au maximum. L'armage de la Leysse permet de réduire ce phénomène, nous retiendrons en moyenne un affouillement d'environ 1 m voire 1.5 m.

Remarque : Au niveau du Tremblay le débit est beaucoup plus important par rapport aux sections en amont, cela est dû à l'apport d'une autre rivière, le « ruisseau des marais ».

#### 9.1.3 Système 2.3

nom du profil	PKBDL	d50 (m)	Q10 (m3/s)	hauteur d'eau HQ10 (m)	Affouillement Q10 (m)	Q100 (m3/s)	hauteur d'eau HQ100 (m)	Affouillement Q100 (m)
S 2.3	0.05	0.05	23.2	2.34	0	56	4.08	0

Tableau 50 : Profondeur des fonds mobilisés par l'écoulement – Système 2.3

Ce système étant un bras de décharge et non la rivière, même en période de crue les vitesses sont très faibles, d'autant plus que le lit de ce bras est large. Les affouillements calculés sont nuls, il n'y a aucun risque.

### 9.2 Erosion externe du talus amont

Les cours d'eau étudiés sont de type fluvial à forte pente, les vitesses d'écoulement sont donc importantes et le transport solide bien présent. C'est pourquoi, le revêtement du parement amont des digues subît de fortes sollicitations.

La VTA a mis en évidence des érosions du talus amont et les fortes pentes de celui-ci.

La formule d'Isbach, accompagnée de la correction de Lane permet de caractériser les enrochements nécessaires à la protection du talus amont des digues. A noter que la correction de Lane est applicable seulement si l'angle d'équilibre du talus est inférieur à l'angle d'équilibre limite du sol. Or les talus étant fortement érodés, et la présence de gabions par endroit définit un angle d'inclinaison très important, parfois plus important que l'angle d'équilibre théorique du sol. Nous avons pris comme hypothèse 45° comme angle d'équilibre du sol angle ce qui est adapté pour les enrochements et une masse volumique de ceux-ci de 2600kg/m<sup>3</sup>. Pour les cas où la pente du talus est plus importante que l'angle limite, nous prendrons un angle du talus de 44° sachant qu'il faudra ainsi surestimer les valeurs d'enrochements.

L'étude concerne les valeurs au droit des profils topographiques critiques. Les cas spécifiques (virage prononcé du cours d'eau, aval d'un pont) seront évoqués lors de l'avant-projet. Les résultats sont résumés dans les tableaux suivant.

#### 9.2.1 Système 2.1

nom du profil	PKL	vitesse majorée Q10 (m/s)	vitesse majorée Q100 (m/s)	Poids moyen d'un enrochement W50 (kg)	Taille théorique d'un enrochement (m)
S2.1 STTP57	8.91	3.612	4.44	939 (Q10) / 3240 (Q100)	0.77 (Q10) / 1.16 (Q100)
S2.1 STTP59	8.883	3.84	4.452	271 (Q10) / 659 (Q100)	0.53 (Q10) / 0.7 (Q100)

Tableau 51 : Caractéristiques théoriques des enrochements de protection du talus amont - système 2.1

Conclusion : Sur ce tronçon, les vitesses d'écoulement sont très importantes ce qui implique ces fortes valeurs de poids et tailles d'enrochements. Pour le profil topographique avec un angle de talus important (STTP57) les valeurs sont très imposantes, il semble donc nécessaire d'adoucir la pente par endroit.

#### vitesse vitesse majorée majorée Poids moyen d'un Taille théorique d'un nom du profil PKL Q100 (m/s) Q10 (m/s) enrochement W50(kg) enrochement (m) (x1.2) (x1.2) 5.444 Jean Lain 2.304 3.024 16 (Q10) / 81.8 (Q100) 0.2 (Q10) / 0.35 (Q100) Rond-point Villarcher 4.981 2.52 2.988 615.63 (Q10) / 1711 (Q100) 0.67 (Q10) / 0.95 (Q100) Villarcher 1 4.208 3.432 4.164 2477 (Q10) / 7901 (Q100) 1.1 (Q10) / 1.5 (Q100) Villarcher 2 4.653 2.736 3.156 91.48 (Q10) / 215.49 (Q100) 0.37 (Q10) / 0.48 (Q100) Tremblay 3.543 2.532 3.384 75.05 (Q10) /427.61 (Q100) 0.5 (Q10) / 0.6 (Q100)

### 9.2.2 Système 2.2 aval

Tableau 52 : Caractéristiques théoriques des enrochements de protection du talus amont – système 2.2 aval

#### Conclusion :

- Jean Lain : La taille et le poids des enrochements est faible sur ce secteur car la pente du talus amont n'est pas très importante ;
- Rond-point Villarcher : Les vitesses relevées sont plus faible sur cette section, mais les pentes de talus étant très importante il faut des enrochements de poids et de tailles importants. Sur ce secteur-là se trouve des gabions, ce qui justifie la pente importante ;
- Villarcher 1: D'après les relèves topographiques, la pente du talus est très importante et supérieur à 45°. Le critère de Lane ne peut donc pas être évalué c'est pourquoi le poids et la taille des enrochements sont sous-estimés. Il faut noter que sur ce secteur la vitesse est également très importante, de l'ordre de 4 m/s. Les enrochements à retenir doivent donc être très imposant ;
- Villarcher 2 : Il faut sélectionner pour ce secteur des enrochements de 215kg de diamètre 50cm ;

### 

- Tremblay : Malgré les pentes de talus plus faible, il convient de choisir des enrochements assez importants, d'autant plus que d'après la géophysique ce secteur de digue n'a pas été protégé par des enrochements.

#### 9.2.3 Système 2.3

nom du profil	PKBDL	vitesse majorée Q10 (m/s)	vitesse majorée Q100 (m/s)	Poids moyen d'un enrochement W50 (kg)	Taille théorique d'un enrochement (m)
S2.3	0.05	0.32	0.41	< 1 kg	< 1 kg

Tableau 53 : Caractéristiques théoriques des enrochements de protection du talus amont - système 2.3

Conclusion : comme expliqué précédemment pour le calcul d'affouillement, les vitesses sont très faibles. Il n'est donc même pas nécessaire d'enrocher ce système.

### **10 SYNTHESE**

Les synthèses graphiques des études sont également disponibles en Annexe.

Concernant tous les linéaires de digue étudiés, la végétation est actuellement très importante et doit être limitée sur les digues. Un déboisage est nécessaire, accompagné de dessouchages.

### 10.1 Système 2.1

respect de la stabilité vis-à-vis du phénomène de											
profil géotechnique	secteur topographique	Glissement talus amont	Glissement talus aval	Erosion Interne	Erosion Externe						
Castashi	STTP57	instable décrue rapide	stable	stable	instable						
Geotech1	STTP59	stable	stable Q10, Q100 instable Qext	stable	instable						
Geotech2	STTP57	instable décrue rapide	stable	stable	instable						
	STTP59	stable	stable	stable	instable						

Tableau 54 : Synthèse des risques de ruptures - système 2.1

Le système d'endiguement est stable au phénomène de part ces topologies, mais aussi grâce à la faible mise en charge de la digue, et ce même pour des crues centennales. Au contraire il est instable à l'érosion externe, en effet sur ce tronçon les vitesses d'écoulements sont très rapides et les pentes de talus parfois raides ce qui nécessite de lourds enrochements sur les talus mais aussi des renforcements dans le lit pour éviter un trop fort affouillement.

Concernant les glissements de talus, du côté aval le risque est très faible. Il y a un risque seulement pour les crues extrêmes dans le cas du premier profil géotechnique et sur le profil STTP59. Sur le talus amont, le profil STTP57 avec les pentes critiques est instable aux décrues rapides.

### 10.2 Système 2.2 aval

		respect de la	stabilité vis-	à-vis du phénomène de	
profil géotechnique	secteur topographique	Glissement talus amont	Glissement talus aval	Erosion Interne	Erosion Externe
Geotech1	Jean Lain	stable	stable Q10 stable Q100	non stable à l'érosion de conduit	instable
Geotech2	Rond-Point Villarcher	stable	stable Q10 stable Q100	non stable à l'érosion de conduit et risque de suffusion	instable
Geotech3	Villarcher	instable	instable Q10 stable Q100	non stable à l'érosion de conduit	instable
Geotech4	Tremblay	stable	stable Q10 stable Q100	stable au critère de Lane	instable
Geotech5	Rond-Point Villarcher	instable	stable Q10 stable Q100	non stable à l'érosion de conduit et de contact	instable
Geotech6	Villarcher	instable	instable Q10 stable Q100	non stable à l'érosion de conduit et risque de suffusion	instable

Tableau 55 : Synthèse des risques de ruptures par tronçons – système 2.2 aval

Le système d'endiguement présente sur la quasi-totalité de son linéaire des risques de ruptures. Qu'il s'agisse d'érosion interne, externe ou de stabilité au glissement l'état actuel des digues, de pas leur géométrie et leur constitution présentent un risque de rupture important en cas de crue décennale ou centennale.

### 10.3 Système 2.3

respect de la stabilité vis-à-vis du phénomène de					
profil géotechnique	secteur topographique	Glissement talus amont	Glissement talus aval	Erosion Interne	Erosion Externe
Geotech1	S2.3	stable	stable	stable	stable

Tableau 56 : Synthèse des risques de ruptures - système 2.3

L'étude au glissement des talus amont et aval n'a pas été effectué, mais le système est stable aux phénomènes d'érosion interne et externe et il n'y a aucun risque de glissement des talus amont et aval d'après l'étude 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 !

