

ÉTUDE DE DANGERS DU SYSTÈME DE PROTECTION DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE – CHARRIN CONTRE LES INONDATIONS DE LA LOIRE

Rapport d'étude

Juin 2017



BRL ingénierie

1105, avenue Pierre Mendès France BP 94001
30 001 Nîmes Cedex 5
Tel : +33 4 66 87 50 85- Fax : +33 4 66 87 51 09 –
mail : brlingenierie@brl.fr
www.brl.fr/brli

PROJET	N	800730	Intitulé	Etudes de dangers des digues domaniales de classe B et C de la Loire
Maitre d'ouvrage			DDT 58	
Date de création du document			Mai 2015	
Contact			Marie-Christine GERMAIN	
Titre du document			Étude de dangers du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin – rapport d'étude	
Référence du document			rapport_EDD_02-Saint-Hilaire-Charrin-v5.docx	
Indice			V5	

Date émission	Indice	Observations	Dressé par	Vérifié et validé par
Août 2015	V1	Chapitre 1 à 7	GRI/AMA	RRE / NSI
Janvier 2016	V2	Chapitre 1 à 9	GRI/AMA	RRE / NSI
Novembre 2016	V3	Prise en compte remarques MOA	GRI/AMA	RRE / NSI
Avril 2017	V4	Prise en compte remarques MOA	GRI/AMA	RRE / NSI
Juin 2017	V5	Chapitre 0 à 9	GRI/AMA	RRE / NSI

ETUDE DE DANGERS DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE ET DE CHARRIN

0. RÉSUMÉ NON TECHNIQUE	1
0.1 Contexte et objectifs de l'étude de dangers	1
0.2 Composition du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	2
0.3 Dangers liés au système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	4
0.4 Niveau de protection et niveau de sûreté du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	4
0.4.1 Objectif de protection historique	5
0.4.2 Niveau de protection apparent	5
0.4.3 Défaillance du système d'endiguement	6
0.4.4 Description du fonctionnement probable du système d'endiguement dans son état actuel	7
0.5 Caractérisation de la gravité du risque associé à la défaillance du système d'endiguement	7
0.5.1 A l'échelle du val	7
0.5.2 A l'arrière immédiat des digues	10
0.6 Mesures de réduction des risques	11
0.6.1 Mesures de gestion du risque	11
0.6.2 Améliorations structurelles et fonctionnelles de la digue	12
0.6.3 Amélioration des connaissances	12
 1. RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS	 13
1.1 Propriétaire des ouvrages	13
1.2 Gestionnaire des ouvrages	13
1.3 Rédacteurs de l'étude de dangers	14
1.4 Classement du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	15
 2. OBJET DE L'ÉTUDE	 16
2.1 Contexte réglementaire	16
2.2 Le périmètre d'étude	16

2.2.1	L'ouvrage de protection et la zone protégée	16
2.2.2	Les zones d'influence ou d'intérêt	17
3.	ANALYSE FONCTIONNELLE DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT	22
3.1	Description de l'ouvrage	22
3.1.1	Principe de discrétisation du système d'endiguement	22
3.1.2	Définition et principales caractéristiques du système d'endiguement étudié	23
3.1.3	Description de l'objectif de protection du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	30
3.1.4	Principaux résultats de l'analyse fonctionnelle hydraulique	39
3.1.5	Principales caractéristiques externes du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	40
3.1.6	Caractérisation géotechnique de la digue et de sa fondation	43
3.1.7	Profils en travers type des ouvrages	51
3.1.8	Anomalies constatées dans le système d'endiguement	52
3.2	Description de l'environnement de l'ouvrage	63
3.2.1	La Loire	63
3.2.2	La rive gauche de la Loire	64
3.2.3	Raccordements amont et aval	64
3.2.4	Inondation du val par remous	66
3.2.5	Affluents et fossés de drainage	67
3.2.6	Remblais dans le val	68
3.2.7	Fonctionnement hydraulique interne du val	68
3.2.8	La zone protégée par le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	68
3.2.9	Estimation des enjeux présents dans la zone protégée	70
3.2.10	Classement des levées du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	73
4.	PRÉSENTATION DE LA POLITIQUE DE PRÉVENTION DES ACCIDENTS MAJEURS ET DU SYSTÈME DE GESTION DE LA SÉCURITÉ	75
4.1	Organisation de la DDT 58	75
4.2	Consignes écrites et mesures de surveillance	75
4.3	Gestion des situations d'urgence	83
4.4	Procédures de connaissance et d'évaluation du risque	85
4.4.1	Etudes de dangers	85
4.4.2	Revue de sûreté	85
4.5	Dossier d'ouvrage	85
4.6	Avis du responsable de l'étude de dangers sur la politique de prévention des risques liés au système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	85

5. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES POTENTIELS DE DANGERS.....	87
5.1 Ouverture d'une brèche partielle ou totale sur un tronçon de la levée	87
5.2 Surverse sans brèche au-dessus de la crête d'un tronçon de levée	87
5.3 Entrée d'eau par les ouvrages hydrauliques traversant la levée	88
5.4 Remontée de nappe dans le val en arrière des levées	88
5.5 Inondation par les affluents et ruissellement urbain	89
5.6 Entrée d'eau par le linéaire non endigué	89
5.7 Remous par la partie aval ouverte au terrain naturel	89
6. CARACTÉRISATION DES ALÉAS NATURELS	91
6.1 Hydrologie : crues de la Loire	91
6.1.1 Présentation	91
6.1.2 Détermination des débits de pointe et des hydrogrammes	92
6.1.3 Prise en compte du risque de rupture de digue en amont ou en aval du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (SHF)	94
6.1.4 Influence de la rupture de barrages en amont	94
6.2 Embâcles et débâcles de glace	95
6.2.1 Conséquences hydrauliques associées à la débâcle	96
6.2.2 Conséquences morphodynamiques associées à la débâcle	96
6.2.3 Conséquences mécaniques associées à la débâcle	96
6.3 Impact du changement climatique	96
6.4 Géologie et morphodynamique de la Loire	98
6.4.1 Contexte géologique	98
6.4.2 Evolutions morphologiques	99
6.4.3 Conséquences et dangers à l'échelle du val	101
6.5 Aléa sismique	101
6.6 Aléa karstique	103
6.7 Synthèse de la caractérisation des aléas naturels	103
7. ETUDE ACCIDENTOLOGIQUE ET RETOUR D'EXPÉRIENCE	105
7.1 Incidents récents	105
7.1.1 Les conséquences de la crue de décembre 2003 sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	105
7.1.2 Les conséquences de la crue de décembre 2003 sur d'autres systèmes d'endiguement de la Loire	105
7.1.3 Les incidents hors crue sur ou à proximité du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	107
7.1.4 Les incidents hors crue sur d'autres systèmes d'endiguement de la Loire	107

7.2	Crues historiques de la Loire au niveau du Val de Saint Hilaire Fontaine	107
7.2.1	Eléments de comparaison des crues de 1846, 1856 et 1866	108
7.3	Etude des brèches historiques	109
7.3.1	Brèches historiques dans le val de Saint Hilaire Fontaine	109
7.3.2	Statistiques globales à l'échelle des 7 vals étudiés	111
7.3.3	Statistiques sur l'ensemble des digues de la Loire	111
7.3.4	Enseignements généraux à l'échelle de l'ensemble des vals	112
7.4	Retour d'expérience sur d'autres systèmes d'endiguement	112
7.4.1	Digues du Vidourle	112
7.4.2	Digues de l'Agly	113
7.4.3	Autres retours d'expérience	115
8.	IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES RISQUES	117
8.1	Description de la méthodologie employée pour l'analyse des risques	117
8.1.1	Démarche générale	117
8.1.2	Méthodologie employée pour la caractérisation du potentiel de rupture des tronçons de digues	117
8.1.3	Méthodologie employée pour l'estimation du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement	121
8.2	Détermination des scénarios de défaillance	128
8.2.1	Mode ou circonstances de défaillance de la digue domaniale	128
8.2.2	Rupture de la levée de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin tous modes confondus	144
8.2.3	Hypothèses de surveillance	149
8.3	Estimation du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement du val Saint Hilaire Fontaine	149
8.3.1	Identification et choix des scénarios d'inondation caractérisés en termes de probabilité d'occurrence	149
8.3.2	Intensité et cinétique des scénarios	151
8.3.3	Gravité des scénarios	165
8.3.4	Criticité des scénarios	173
9.	ETUDE DE RÉDUCTION DES RISQUES.....	177
9.1	Bilan du fonctionnement actuel du système d'endiguement	177
9.2	Réduction du risque par des mesures de gestion	177
9.2.1	Mesures relevant du gestionnaire	177
9.2.2	Mesures à mettre en œuvre dans le zone protégée	181
9.3	Réduction du risque par des mesures sur le système d'endiguement	182
9.3.1	Mesures structurelles	183
9.3.2	Mesures fonctionnelles	184
9.3.3	Réflexion sur la ligne de défense principale	186

9.3.4	Travaux à réaliser sur le système de protection de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	190
9.4	Réduction du risque en améliorant les connaissances et les méthodes	195
9.4.1	Amélioration de la connaissance des phénomènes	195
9.4.2	Amélioration de la connaissance des ouvrages	196
9.5	Synthèse des mesures à engager par type de mesure	198
9.5.1	Gestion du risque	198
9.5.2	Amélioration structurelle et fonctionnelle du système de protection	198
9.5.3	Amélioration des méthodes et connaissances	199
9.6	Conclusions sur l'étude de réduction du risque	201

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : zones protégées par le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	2
Figure 2 : composition du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	3
Figure 3 : localisation et typologie de la végétation présente sur le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	4
Figure 4 : lignes d'eau, profils en long de la crête de banquettes, crête de digue et pied de digue	5
Figure 5 : Carte de localisation des scénarios retenus	8
Figure 6 : Carte des hauteurs d'eau maximales – Scénario SHF_2.....	9
Figure 7 : zone protégée et zone de dissipation d'énergie en arrière immédiat des digues	10
Figure 8 : Ouvrages constituant le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	13
Figure 9 : localisation du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin au sein des vals de la Loire moyenne	19
Figure 10 : ligne de défense principale du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	24
Figure 11 : piste en crête de digue vue vers l'aval (végétation dense de part et d'autre)	25
Figure 12 : fossé en eau en pied de talus côté Loire vu vers l'aval	25
Figure 13 : ouvrage traversant sous la digue vue sur la face amont (talus côté Loire)	25
Figure 14 : maison encadrée sur talus côté val de la digue	25
Figure 15 : vue de la digue vers l'aval avec pied de talus en contact avec lit vif de la Loire	26
Figure 16 : renforcement en enrochements libres de la berge (vue vers l'amont)	26
Figure 17 : corps étrangers sur talus côté Loire.....	26
Figure 18 : bâtiment encadré sur talus côté val	26
Figure 19 : ouvrage traversant en aval de la section (vu vers l'aval).....	27
Figure 20 : terminaison de la digue avec raccordement au niveau du TN (vue vers l'aval)	27
Figure 21 : terrier sur talus côté Loire	27
Figure 22 : crête de la digue vue vers l'aval avec sentier	27
Figure 23 : bâtiment en castré sur le bas du talus côté Loire	28
Figure 24 : ornières en amont du renforcement de la crête (vues vers l'amont)	28
Figure 25 : piste en crête avec souche au premier plan (vue vers l'aval).....	28
Figure 26 : végétation généralisée sur les 2 talus de la digue (vue vers l'aval)	28
Figure 27 : glissement du talus côté Loire	29
Figure 28 : bâtiment encadré sur talus côté Loire (vu vers l'aval).....	29
Figure 29 : enrochements libres en protection de la berge de la Loire.....	29
Figure 30 : piste en crête vue vers l'aval.....	29
Figure 31 : Digue fiable	32
Figure 32 : Digue non fiabilisée, non équipée d'un déversoir (cas des levées constituant le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin)	32
Figure 33 : Digue partiellement fiabilisée, équipée d'un déversoir.....	32
Figure 34 : Digue non fiabilisée, équipée d'un déversoir	32
Figure 35 : évolution du profil de la levée de Loire depuis le XVI ^e siècle jusqu'au début du XX ^e siècle (source R. Dion – Le Val de Loire 1934)	33
Figure 36 : Lignes d'eau, profils en long de la crête de banquettes, crête de digue et pied de digue	35
Figure 37 : Charges hydrauliques	37
Figure 38 : vue du glissement depuis le haut du talus côté Loire (section n°5).....	41
Figure 39 : fermeture du chemin en aval de la section n°5 (vue vers l'amont depuis le TN)	41
Figure 40 : Localisation et position des ouvrages hydrauliques dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	42
Figure 41 : découpage du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin en sections géotechniques homogènes	43
Figure 42 : Familles de fonctions géotechniques des composants d'un profil en travers type de digue (source IRSTEA).....	51

Figure 43 : profil en travers type de la levée de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin non renforcée	51
Figure 44 : Localisation et position des canalisations dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	54
Figure 45 : localisation et typologie des ouvrages encastrés dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin en crête et sur le talus côté Loire	56
Figure 46 : localisation et typologie des ouvrages encastrés dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin sur le talus côté val	57
Figure 47 : Localisation et caractérisation de la végétation ligneuse présente sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	58
Figure 48 : Localisation, position et dimension des terriers identifiés sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	59
Figure 49 : Localisation des mouvements de terre recensés sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	61
Figure 50 : Localisation des zones de contact entre les levées et le lit vif le long du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	62
Figure 51 : Localisation des zones humides en pied de talus du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	63
Figure 52 : Extrait du MNT au niveau du raccordement amont du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (levée de Thareau)	64
Figure 53 : Raccordement amont du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin au niveau de la RD979 vu vers l'aval	65
Figure 54 : Extrait du MNT au niveau du raccordement aval du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (levée de Charrin)	65
Figure 55 : vue vers l'aval du chemin en crête qui descend côté val et de l'arrêt de la levée de Charrin	66
Figure 56 : Hauteurs d'eau du remous pour les crues correspondant aux niveaux de protection apparents du val de Saint Hilaire - Charrin	67
Figure 57 : réseau hydrographique (en bleu) et bassin versant (en rouge) des fossés et affluents s'écoulant par le Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	68
Figure 58 : Zones protégées associées au système d'endiguement de Saint Hilaire et Charrin	69
Figure 59 : Proportion de la zone protégée inondée par remous avant surverse	70
Figure 60 : carte d'occupation du sol	71
Figure 61 : diagramme de répartition de l'occupation du sol	71
Figure 62 : schéma des niveaux de surveillance en fonction des niveaux d'eau en cas de crue de la Loire (source : DDT de la Nièvre)	78
Figure 63 : schéma organisationnel du PSL de la Nièvre (source : DDT de la Nièvre)	80
Figure 64 : carte localisant les linéaires sans assise imperméable	89
Figure 65 : position des principaux barrage de la Loire et de ses affluents sur le réseau hydrographique	95
Figure 66 : carte de la sismicité en France	102
Figure 67 : sensibilité à l'aléa karstique des levées de la Loire (source BRGM)	103
Figure 68 : levée de Beffes-Herry - réparations d'urgence lors de la crue de décembre 2003 (crédit photo DREAL Centre-Val de Loire)	106
Figure 69 : Brèche dans la digue de Mauboux à Livry (58) - Crue de 2003 (crédit photo DREAL Centre-Val de Loire)	106
Figure 70 : déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre aujourd'hui (à gauche) et lors de la crue de décembre 2003 (à droite) (image Google Earth – crédit photo DREAL Centre-Val de Loire)	107
Figure 71 : localisation des brèches historiques inventoriées sur le val de Saint Hilaire Fontaine	110
Figure 72 : brèche de Pia sur l'Agly – crue du 6 mars 2013 – (photo : protection civile des Pyrénées-Orientales)	114
Figure 73 : Coupe d'un sand Boil derrière les digues de l'Agly – crue du 6 mars 2013 – (photo : DDT des Pyrénées-Orientales)	114

Figure 74 : Démarche de l'analyse du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement (diagramme IRSTEA)	119
Figure 75 : Exemple de discrétisation de l'espace des évènements et du calcul de la probabilité annuelle d'un scénario de brèche	123
Figure 76 : carte de localisation des tronçons homogènes VTA (rappel)	128
Figure 77 : carte de probabilité annuelle de rupture par surverse	133
Figure 78 : carte de probabilité annuelle de rupture par érosion interne	137
Figure 79 : Arbre de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté val	138
Figure 80 : Arbre de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté rivière	138
Figure 81 : Carte de Probabilité annuelle de rupture par glissement.....	142
Figure 82 : Carte de Probabilité annuelle de rupture par érosion externe	144
Figure 83 : Carte des probabilités annuelles de rupture tous modes confondus avec prise en compte de la remontée de nappe, en l'absence de surveillance	146
Figure 84 : Carte de localisation des scénarios retenus	150
Figure 85 : Carte de localisation des points de référence du val de Saint Hilaire Fontaine	152
Figure 86 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche – Scénario 1	153
Figure 87 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche – Scénario 1.....	153
Figure 88 : Carte des hauteurs d'eau maximales – Scénario 1	154
Figure 89 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine – Scénario 1.....	155
Figure 90 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche – Scénario 2	156
Figure 91 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche – Scénario 2.....	156
Figure 92 : Carte des hauteurs d'eau maximales – Scénario 2	157
Figure 93 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine – Scénario 2.....	158
Figure 94 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche – Scénario 2BIS	159
Figure 95 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche – Scénario 2BIS ...	159
Figure 96 : Carte des hauteurs d'eau maximales – Scénario 3	160
Figure 97 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine – Scénario 2BIS	161
Figure 98 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche – Scénario 3	162
Figure 99 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche – Scénario 3.....	162
Figure 100 : Carte des hauteurs d'eau maximales – Scénario 4	163
Figure 101 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine – Scénario 3....	164
Figure 102 : zone de destruction du bâti en arrière des levées	165
Figure 103 : Carte des aléas – Scénario 1	166
Figure 104 : Carte des aléas – Scénario 2.....	168
Figure 105 : Carte des aléas – Scénario 2BIS.....	169
Figure 106 : Carte des aléas – Scénario 3.....	171
Figure 107 : Fonctionnement hydraulique pour une crue d'occurrence 10 ans de la Loire.....	187
Figure 108 : Fonctionnement hydraulique pour une crue d'occurrence 20 ans de la Loire et la rupture du scénario 2	187
Figure 109 : limnigrammes comparant en plusieurs points l'évolution des niveaux en situation avec transparence, en situation actuelle sans défaillance et en situation avec la brèche SHF3.....	188
Figure 110 : Carte d'aléa pour la situation avec mise en transparence de la digue (T=20 ans) ...	189
Figure 111 : Carte d'en synthèse des travaux à réaliser sur le système d'endiguement	194

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : comparatif des sections retenues dans le cadre de la présente étude de dangers avec celui retenu dans le cadre de l'arrêté de classement.....	30
Tableau 2 : coordonnées X, Y (Lambert 93) des limites amont et aval de la levée de Thareau	30
Tableau 3 : coordonnées X, Y (Lambert 93) des limites amont et aval de la levée de Charrin.....	30
Tableau 4 : récapitulatif des éléments du système d'endiguement ou de son environnement et fonctions hydrauliques associées	40
Tableau 5 - Caractéristiques mécaniques et la perméabilité de ces matériaux	45
Tableau 6 - Caractéristiques mécaniques et la perméabilité des niveaux d'assises peu perméables	47
Tableau 7 - Caractéristiques mécaniques et la perméabilité des alluvions perméables	49
Tableau 8 : Tableau des composants et des fonctions géotechniques du profil en travers type (source IRSTEA)	52
Tableau 9 : Surfaces en hectares et population estimée par commune dans le val de Saint Hilaire Charrin	72
Tableau 10 : caractéristiques des crues moyennes à rares de la Loire au niveau du val de Saint Hilaire Fontaine.....	93
Tableau 11 : caractéristiques des crues fréquentes de la Loire au niveau du val de Saint Hilaire Fontaine.....	93
Tableau 12 : Crues historiques de la Loire à l'échelle de la Jonction à Nevers et à l'échelle de Decize	108
Tableau 13 : Comparaison des niveaux atteints par les crues du 19 ^{ème} siècle au droit des différents vals étudiés	109
Tableau 14 : Brèches historiques recensées sur le val de Saint Hilaire Fontaine	110
Tableau 15 : Brèches historiques recensées sur l'ensemble des 7 vals étudiés.....	111
Tableau 16 : principaux enseignements issus de retours d'expérience issus d'autres systèmes d'endiguement (source DREAL Centre-Val de Loire)	115
Tableau 17 : Qualification des probabilités événementielles utilisées pour caractériser la probabilité de défaillance pour un événement de crue donné.....	122
Tableau 18 : Qualification des probabilités annuelles utilisées pour caractériser les scénarios de défaillance	123
Tableau 19 : Grille de qualification de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau	125
Tableau 20 : Table de correspondance entre aléa et vulnérabilité de la population en danger ...	125
Tableau 21 : Classes de gravité des scénarios d'inondation	126
Tableau 22 : Grille de criticité des scénarios d'inondation	127
Tableau 23 : Hauteur de surverse (+) ou de revanche (-) au droit de la digue (m)	131
Tableau 24 : Probabilité de rupture des profils en travers soumis à la surverse ($\Sigma > 0,10\%$)	132
Tableau 25 : correspondance entre valeur du critère de Bligh (modifié) et probabilité d'apparition d'érosion interne.....	134
Tableau 26 : Probabilité de rupture des profils en travers soumis à l'érosion interne ($\Sigma > 0,10\%$)	135
Tableau 27 : Caractéristiques, désordres et anomalies des profils en travers soumis à l'érosion interne ($\Sigma > 0,10\%$).....	136
Tableau 28 : Probabilités de rupture des profils en travers soumis au glissement côté val ($\Sigma > 0,10\%$).....	140
Tableau 29 : Probabilités de rupture des profils en travers soumis à l'érosion externe hydraulique ($\Sigma > 0,10\%$).....	143
Tableau 30 : Probabilités de rupture des profils en travers soumis à l'érosion externe hydraulique ($\Sigma > 0,10\%$) après intégration du perré au PK1000 et PK1050	143
Tableau 31 : Probabilités de rupture annuelle tous modes confondus des différents profils élémentaires ($\Sigma > 0,10\%$) avec prise en compte de la remontée de nappe	148
Tableau 32 : Tableau de synthèse des scénarios de brèches retenus	150
Tableau 33 (rappel) : Grille de définition de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau	165
Tableau 34 : Nombres d'habitants impactés et en danger – Scénario 1	167

Tableau 35 : Nombres d'habitants impactés et en danger – Scénario 2	168
Tableau 36 : Nombres d'habitants impactés et en danger – Scénario 2BIS	170
Tableau 37 : Nombres d'habitants impactés et en danger – Scénario 3	171
Tableau 38 : Synthèse des niveaux de gravité des différents scénarios	172
Tableau 39 : Synthèse des indices de criticité des différents scénarios.....	173
Tableau 40 : Synthèse globale des résultat	175
Tableau 41 : Nombres d'habitants impactés et en danger avec mise en transparence de la levée de Charrin.....	190

INFORMATION DU LECTEUR ET MISE EN GARDE

Sur la structure de la présente étude de dangers

L'étude de dangers du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est constituée du présent rapport et de ses annexes. Sa structure est imposée par la réglementation en vigueur et s'articule autour de 11 chapitres.

Le chapitre 0 correspond à un résumé non technique de l'étude de danger.

Le chapitre 1 fournit des renseignements d'ordre administratif sur les ouvrages et la présente étude.

Le chapitre 2 regroupe un certain nombre d'éléments de contexte.

Le chapitre 3 décrit les digues et leur environnement et donne une analyse de leur fonctionnement.

Le chapitre 4 présente les éléments de gestion de la sécurité des ouvrages.

Le chapitre 5 identifie et caractérise les potentiels de dangers induits par la présence des digues.

Le chapitre 6 analyse les aléas naturels auxquels sont soumis les ouvrages.

Le chapitre 7 propose un descriptif et une analyse des accidents passés subis par les ouvrages.

Le chapitre 8 constitue le cœur de l'étude de dangers et présente les résultats du diagnostic de rupture ainsi que les conséquences qui découleraient d'une défaillance de l'ouvrage.

Le chapitre 9 fournit différentes propositions permettant de réduire les risques identifiés.

Le chapitre 10 regroupe l'ensemble des cartes illustrant la présente étude de dangers.

0. RÉSUMÉ NON TECHNIQUE

0.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE DE DANGERS

L'étude de dangers du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin a été réalisée par BRLingénierie. Les études de dangers sont des études réglementaires qui s'imposent à tous les propriétaires de digues fluviales ou maritimes protégeant plus de 10 personnes (article R.214-115 du code de l'environnement).

Une étude de dangers a pour objectifs :

- ▶ De préciser le rôle et le fonctionnement du système de digues
- ▶ D'analyser les phénomènes physiques susceptibles de provoquer ou de favoriser une rupture de ces digues
- ▶ De quantifier en termes de probabilité les risques de défaillance des digues correspondants
- ▶ D'analyser les conséquences d'une éventuelle rupture des digues en termes de risques pour les biens et les personnes
- ▶ De proposer des mesures de réduction des risques : mesures structurelles (travaux de renforcement) mais aussi mesures de gestion et mesures fonctionnelles

Le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin s'étend sur environ 8,8 km en rive droite de la Loire, sur les communes de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

La zone protégée par le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, abrite plus d'une trentaine de personnes au total (36).

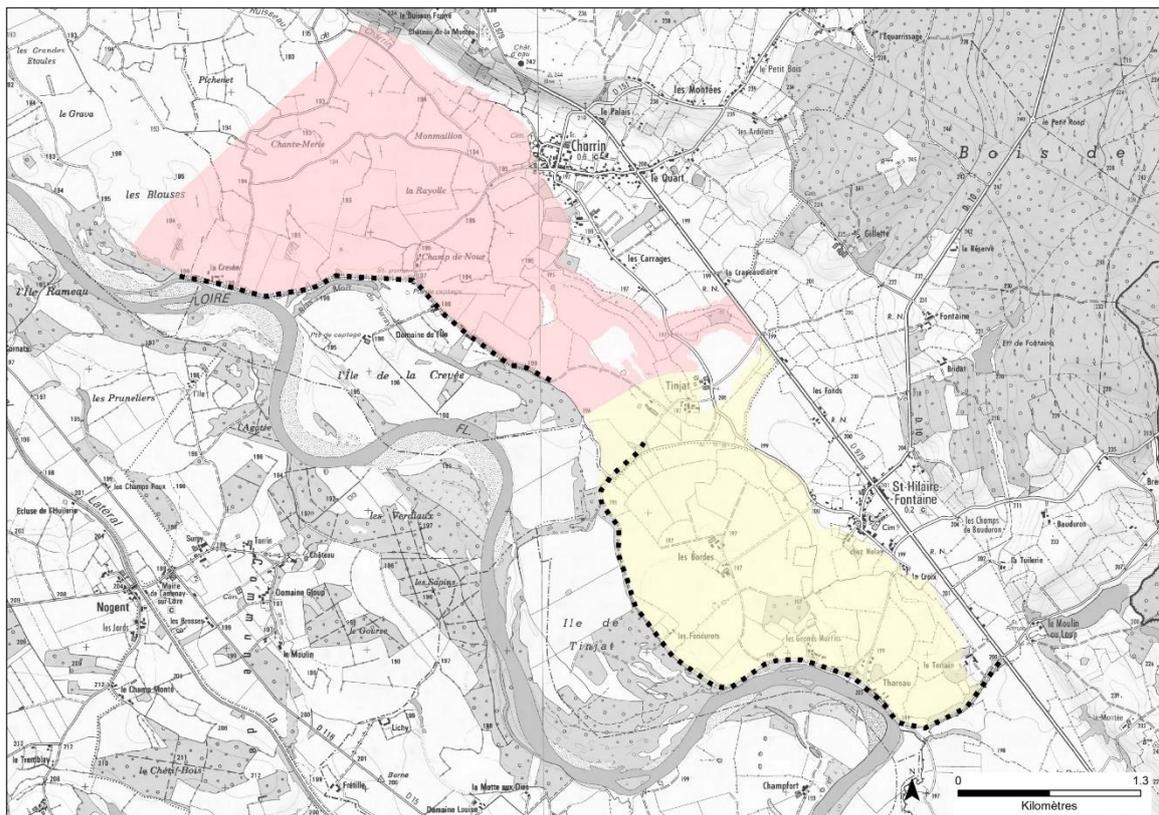


Figure 1 : zones protégées par le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Les levées de Thureau (Saint-Hilaire-Fontaine) et de Charrin ont fait l'objet d'un arrêté préfectoral en date du 10 novembre 2009 classant ces 2 ouvrages en classe C.

0.2 COMPOSITION DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE ET DE CHARRIN

Le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est un système d'endiguement ouvert par l'aval, mais également entre les 2 levées classées.

Il est constitué de :

- La levée de Thureau depuis la route départementale 979, qui assure le raccordement amont du système d'endiguement au coteau et présente un linéaire d'environ 4,6 km ;
- Un raccordement entre la fin de la levée de Thureau et le début de la levée de Charrin (environ 1,2km de long) voit le prolongement du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin au même niveau que le terrain naturel (levée arasée) ;
- La levée de Charrin sur environ 3km de long, avec hauteur de digue dépassant fréquemment 3,0m et ouverte par l'aval.

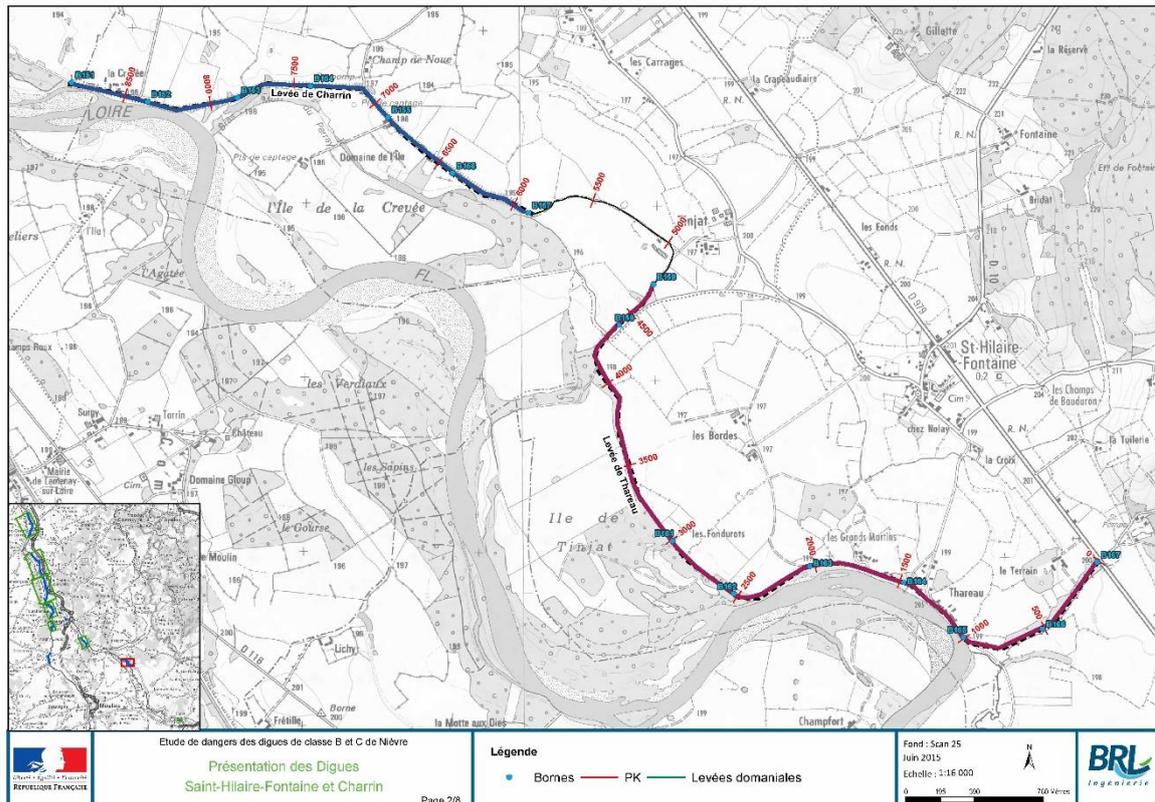


Figure 2 : composition du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

La visite technique approfondie réalisée dans le cadre de la présente étude ainsi que les éléments du dossier d'ouvrage ont permis d'identifier un certain nombre d'anomalies qui fragilisent l'ouvrage en cas de crue :

- Canalisations incluses dans la levée,
- Bâtiments encastres dans la digue,
- Végétation sur et aux abords de la levée,
- Terriers d'animaux fouisseurs,
- Mouvements de terre (glissements – zone de contact avec lit vif).

En l'espèce, le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est notamment caractérisé par la présence d'une végétation clairsemée à généralisée, d'un fossé en pied coté val (pas d'assise imperméable) et par des mouvements de terre importants. De tels désordres constituent des facteurs aggravants sensiblement le risque de rupture par érosion interne.

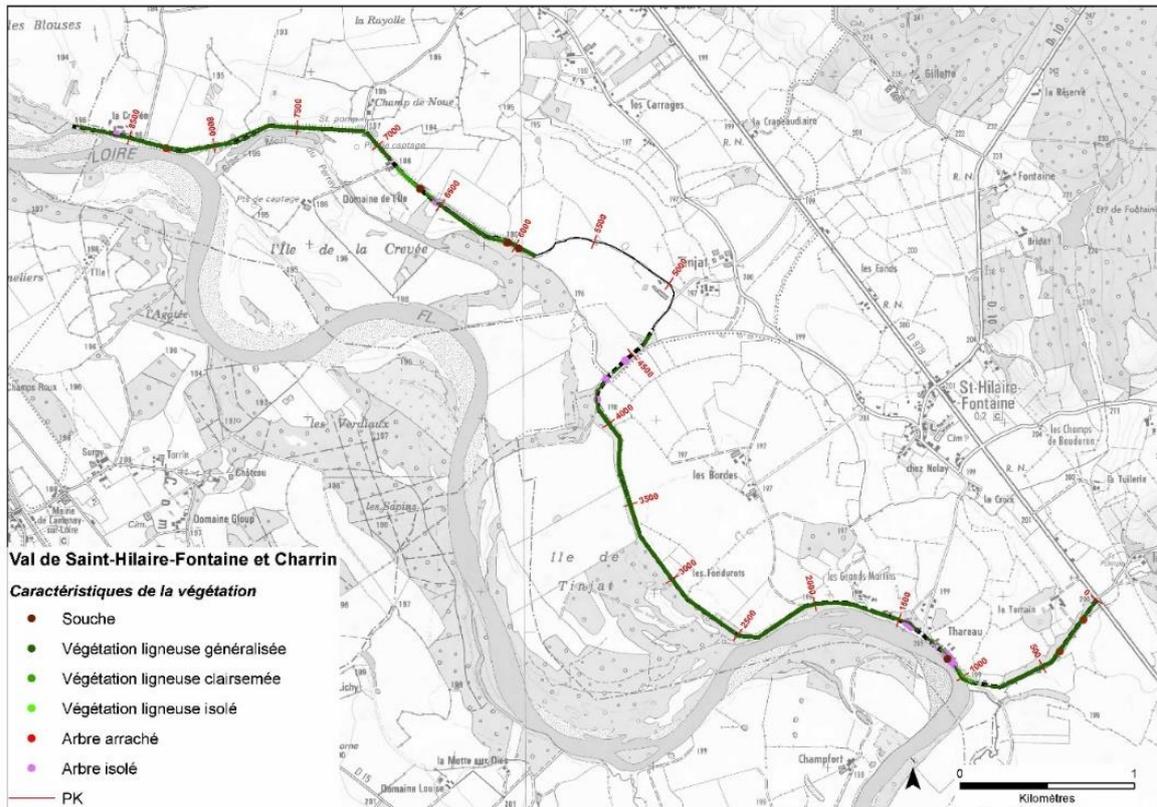


Figure 3 : localisation et typologie de la végétation présente sur le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

0.3 DANGERS LIÉS AU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE ET DE CHARRIN

Les dangers liés au système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin résultent principalement de l'irruption accidentelle d'eau à l'intérieur du val lors d'une crue de la Loire suite à l'ouverture partielle ou totale d'une brèche sur un tronçon d'une des levées.

0.4 NIVEAU DE PROTECTION ET NIVEAU DE SÛRETÉ DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE ET DE CHARRIN

Le niveau de protection correspond au niveau d'eau en Loire au-delà duquel la zone protégée commence à être inondée sans rupture préalable de la digue suite au débordement au-dessus de la crête de digue. Le niveau de protection correspond donc à l'occurrence de la crue de premières surverses.

Le niveau de sûreté se définit comme le niveau d'eau en Loire au-delà duquel la probabilité de rupture de la digue ne peut plus être considérée comme négligeable.

La notion de « niveau de sûreté » renvoie au risque de rupture alors que celle de « niveau de protection » est associée à la surverse. Un système d'endiguement est qualifié de parfaitement fiable si son niveau de sûreté est supérieur à son niveau de protection, c'est-à-dire que la rupture avant surverse est improbable.

Les digues de la Loire ne pouvant en général être considérées comme parfaitement fiables du fait de leur conception et des désordres les affectant, on parlera de « niveau de protection apparent » plutôt que de « niveau de protection » afin de ne pas entretenir l'illusion d'une protection réelle jusqu'à l'occurrence de crue en question.

0.4.1 Objectif de protection historique

Les levées de la Loire ont été érigées de manière progressive et réhaussées suite à chaque crue majeure ayant provoqué leur surverse, dans l'objectif illusoire de les rendre insubmersibles. L'objectif de protection historique a donc sans cesse évolué.

0.4.2 Niveau de protection apparent

Les niveaux d'eau dans le lit endigué de la Loire ont été calculés par l'intermédiaire d'un modèle hydraulique pour 10 occurrences de crues allant de 2 ans à 1 000 ans, soit pour un débit de la Loire à Saint-Hilaire-Fontaine s'échelonnant de 970 m³/s à 5 000 m³/s. Il a été supposé de manière sécuritaire dans les calculs qu'aucune brèche ne se produisait en amont et en aval du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin .

Les niveaux d'eau calculés ont été comparés à l'altimétrie de la crête de l'ouvrage afin de déterminer l'occurrence et la localisation des premières surverses.

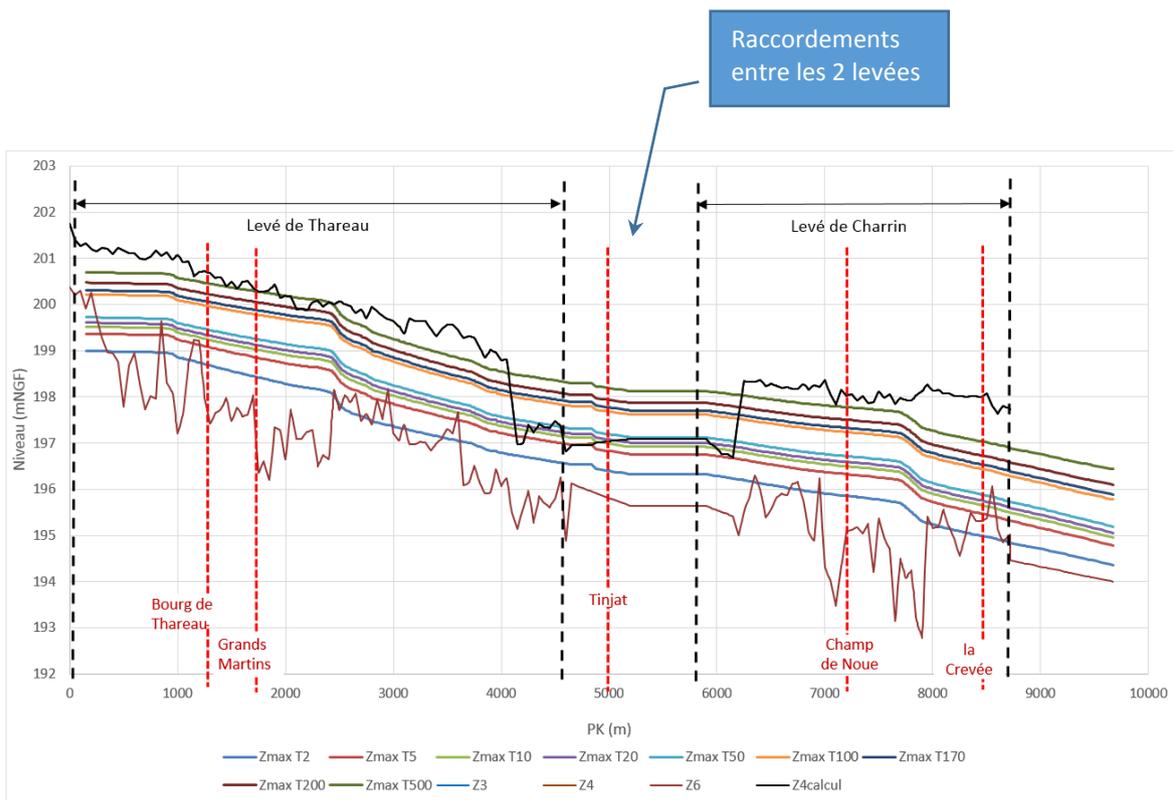


Figure 4 : lignes d'eau, profils en long de la crête de banquette, crête de digue et pied de digue

Compte tenu de la particularité de ce val, il a été défini 2 niveaux de protection apparents du fait de l'ouverture centrale non endiguée entre les levées de Thareau et de Charrin.

Pour le sous-val de Saint-Hilaire-Fontaine (levée de Thareau), les premières inondations par remous s'effectuent à partir de la crue d'occurrence 5 ans (Q5) et la surverse par-dessus l'ouvrage de protection a lieu à partir de Q200. Le niveau de protection apparent de la levée de Thareau correspond à celui atteint par la crue bicentennale (Q200), d'un débit de l'ordre de 3 900m³/s pour une hauteur d'eau à l'échelle de référence de Gilly est de 9,19 m.

Pour le sous-val de Charrin, les premières inondations par remous s'effectuent à partir de la crue d'occurrence 2 ans (Q2) par l'aval et Q10 par l'ouverture en amont de la levée. La surverse par-dessus l'ouvrage de protection a lieu à partir de la crue d'occurrence 500 ans (Q500). Le niveau de protection apparent de la levée de Thareau correspond à celui de la crue décennale (Q10), d'un débit de l'ordre de 1 950m³/s pour une hauteur d'eau à l'échelle de référence de Gilly est de 6,64 m.

0.4.3 Défaillance du système d'endiguement

L'analyse de la défaillance du système d'endiguement considère 5 modes de rupture potentielle de l'ouvrage :

- Rupture liée à la surverse,
- Rupture suite à érosion interne,
- Rupture suite à glissement de talus,
- Rupture suite à érosion externe,
- Rupture suite à soulèvement hydraulique en pied de digue.

L'estimation des probabilités de rupture s'appuie sur une discrétisation de la digue en tronçons élémentaires de 50 m de long caractérisés par leur géométrie (crête de digue, pente des talus, largeur en pied, etc.), les sollicitations hydrauliques (niveaux d'eau en Loire) qui s'y appliquent, les différentes anomalies (végétation, terriers, bâtiments encastrés, canalisations traversantes, etc.) qui s'y rattachent, les caractéristiques géotechniques des matériaux qui le composent et les modalités de gestion en période de crue qui y sont pratiquées.

Les calculs sont effectués pour chacun des 5 modes de rupture précités, pour chaque occurrence de crue et chaque tronçon élémentaire de digue par l'intermédiaire d'un modèle de calcul d'aléa de rupture (« CARDigue »).

Deux principales zones de défaillance potentielles sont notamment mises en évidence au travers de cette analyse :

- Au PK1800 (brèche des grands Martins) où les risques d'érosion interne, de glissement, ainsi que d'érosion externe deviennent non négligeable à partir de Q5,
- Au PK7750 (brèche de la levée de Charrin) où les risques d'érosion interne et de glissement sont non négligeables,

Le niveau de sûreté pour l'ensemble des deux sous-vals correspond à un niveau de la Loire associé à une crue de période de retour 5 ans, soit une hauteur à l'échelle de référence de Gilly de 6,22 m et un débit de 1700 m³/s.

Au-delà de ce niveau, la probabilité de rupture au droit du tronçon élémentaire de digue le plus fragile ne peut plus être considéré comme négligeable.

0.4.4 Description du fonctionnement probable du système d'endiguement dans son état actuel

Comme indiqué précédemment, le risque de défaillance de l'ouvrage ne peut plus être considéré comme négligeable à partir de la crue quinquennale (peu probable à probable selon les scénarios).

Quoi qu'il en soit la Loire commencera à inonder le val par remous dès la Q5, soit par le tronçon situé entre les 2 levées, soit au point bas et en aval de la levée de Charrin.

En conclusion, en l'état actuel, le système d'endiguement présenterait probablement un fonctionnement anormal et préoccupant pour des crues supérieures ou égales à la crue de période de retour 5 ans.

0.5 CARACTÉRISATION DE LA GRAVITÉ DU RISQUE ASSOCIÉ À LA DÉFAILLANCE DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT

0.5.1 A l'échelle du val

L'étude de dangers évalue les conséquences du risque d'inondation dans le val au travers de différents scénarios d'inondation dont les conséquences sont déterminées à partir de simulations réalisées en utilisant des modèles hydrauliques.

Pour chaque scénario de brèches, la gravité de l'inondation du val qui en résulterait est appréciée par l'intermédiaire du nombre de personnes inondées par des niveaux d'eau ou des vitesses d'écoulement susceptibles de porter atteinte à leur intégrité. La criticité du scénario est quant à elle évaluée en croisant sa probabilité de survenance avec la gravité de ses conséquences.

La sélection des scénarios de défaillance répond à des objectifs de représentativité et de diversité des situations pouvant être rencontrées et s'appuie notamment sur :

- Les résultats issus de l'identification des secteurs de défaillance les plus probables,
- La localisation des enjeux,
- Le fonctionnement hydraulique interne de la zone protégée.

Sur cette base, quatre scénarios de brèches ont été simulés et analysés sur le val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

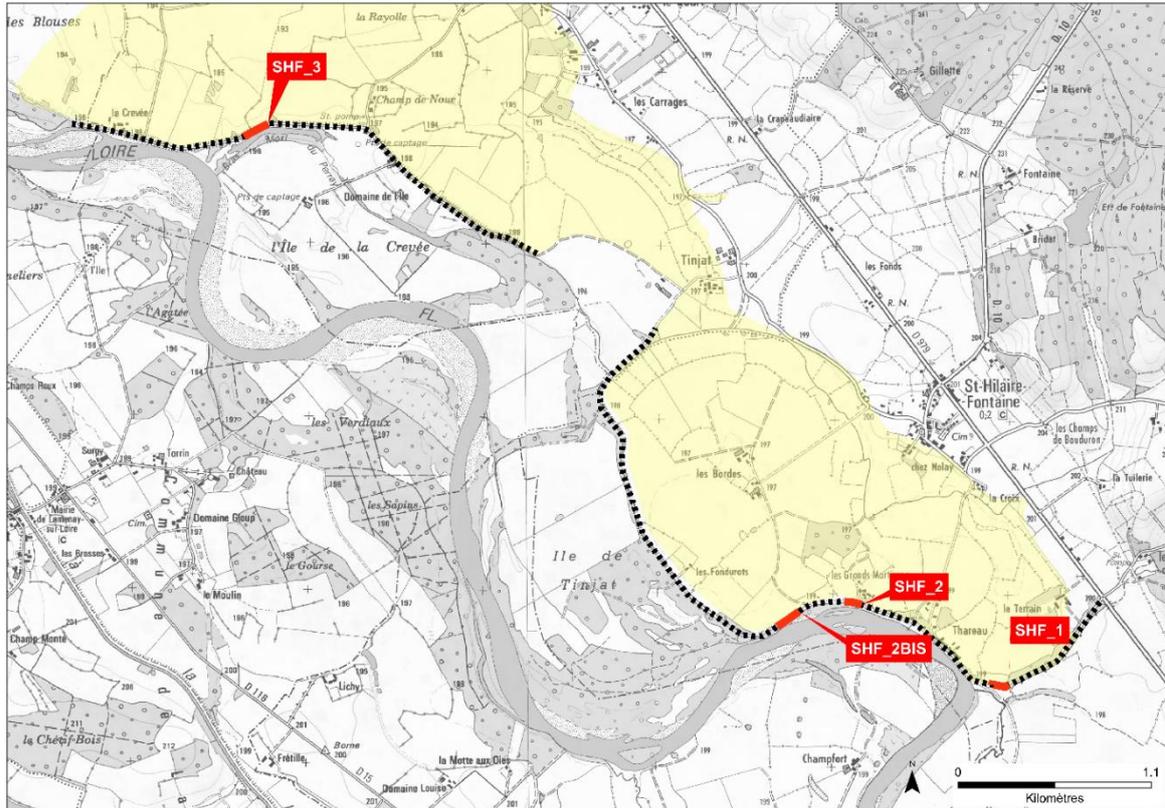


Figure 5 : Carte de localisation des scénarios retenus

Le scénario le plus pénalisant en termes de gravité (enjeux impactés) est le scénario SHF_2 « brèche des Grands Martins entre PK1800 et PK1900 initiée par glissement pour une crue de période de retour 20 ans ».

Dans ce scénario, pour une crue de période de retour 20 ans, les 22 personnes résidant dans le val seraient inondées, dont 1 d'entre elles pourrait être considérée comme en danger du fait des hauteurs d'eau auxquelles elle serait exposée.

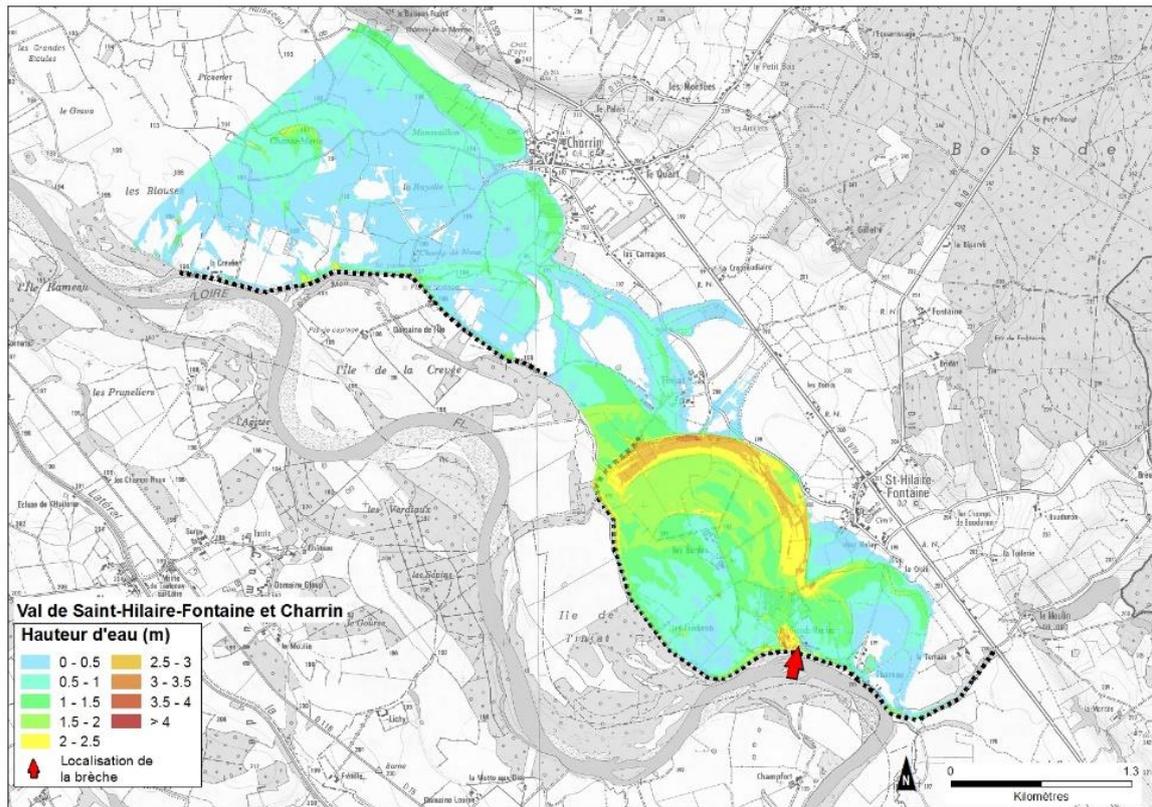


Figure 6 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario SHF_2

Compte tenu de la fréquence probable de défaillance du système d'endiguement et des conséquences humaines que cela engendrerait, le risque de rupture peut être qualifié de « préoccupant ».

0.5.2 A l'arrière immédiat des digues

Au-delà des différents scénarios envisagés et simulés, l'analyse des brèches historiques et des fosses d'érosion associées amène à prendre en compte une zone de dissipation d'énergie en arrière des digues suite à la rupture potentielle de l'ouvrage.

Au regard des observations faites lors des événements historiques, la longueur de cette zone de dissipation peut être estimée à cent fois la différence entre le niveau en Loire associé au niveau de protection apparent et le niveau du terrain naturel dans le val.

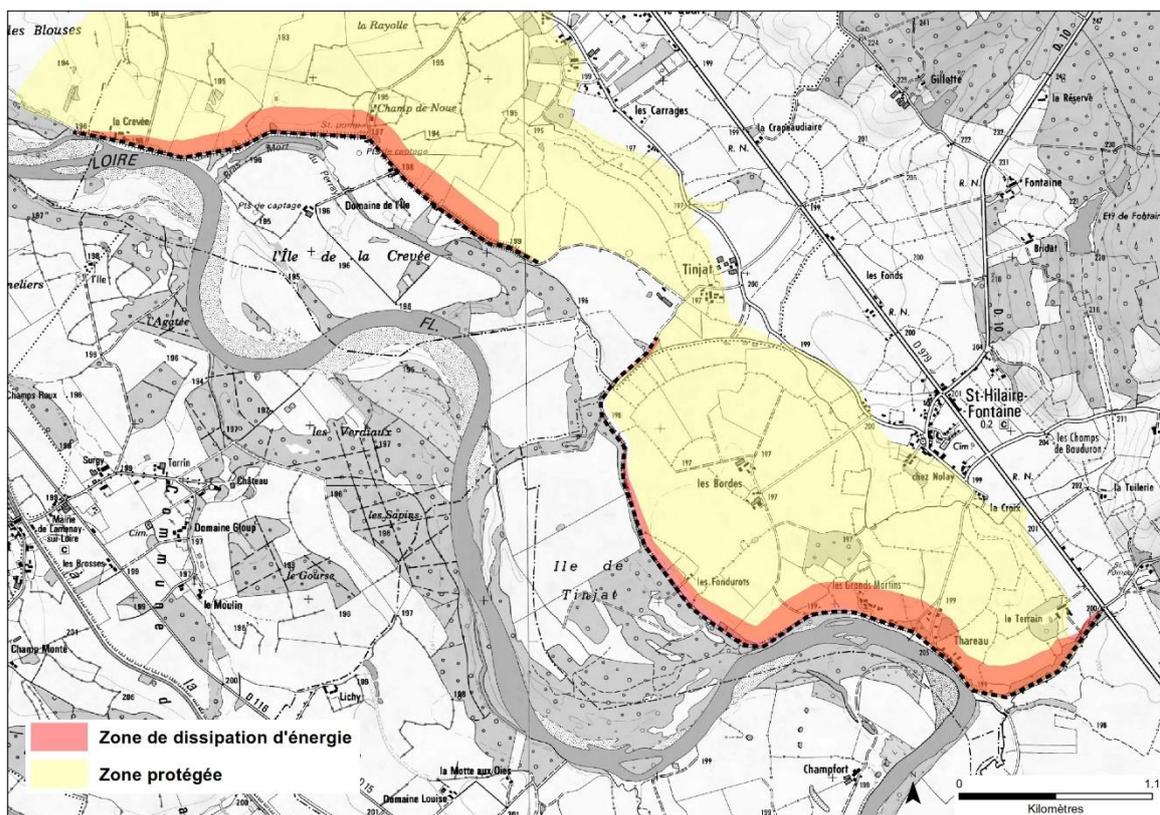


Figure 7 : zone protégée et zone de dissipation d'énergie en arrière immédiat des digues

0.6 MESURES DE RÉDUCTION DES RISQUES

L'étude de dangers du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin a mis en évidence la forte probabilité d'une défaillance des ouvrages dont les conséquences seraient sérieuses, justifiant de fait la mise en place de mesures de réduction des risques.

La définition d'un programme de mesures de réduction des risques s'appuie sur les résultats de l'analyse fonctionnelle du système, du diagnostic d'aléa de rupture et de l'analyse des conditions de propagation de l'onde de rupture. Un tel programme combine :

- Mesures de gestion du risque, c'est-à-dire des mesures préventives et/ou opérationnelles relatives à la limitation des conséquences potentielles d'une défaillance du système d'endiguement,
- Les mesures structurelles et fonctionnelles, basées sur la résorption des anomalies recensées afin d'augmenter le niveau de sûreté et de fiabiliser le système d'endiguement,
- Les mesures relatives à l'amélioration des connaissances, permettant d'affiner le diagnostic réalisé dans le cadre de la présente étude de dangers.

0.6.1 Mesures de gestion du risque

Les résultats de l'étude de dangers doivent être intégrés dans les différents dispositifs existants de gestion du risque pour lesquels ils fournissent des éléments de connaissance complémentaires :

- Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) : l'étude de dangers a mis en évidence le danger que continue de constituer une crue moyenne de la Loire pour les enjeux situés dans le val malgré la présence de la digue ; à l'inverse, elle a permis de mettre en évidence l'aléa supplémentaire que générerait une défaillance de l'ouvrage de protection,
- Plans Communaux de Sauvegarde : les résultats de l'étude de dangers devront être pris en compte dans les PCS existants ou en cours d'élaboration,
- Plan de Surveillance des Levées et consignes écrites : en identifiant les secteurs les plus fragiles, l'étude de dangers constitue une base de travail pour permettre au gestionnaire de prioriser ses actions de surveillance et d'entretien et de mettre en place la logistique (moyens matériels et humains requis, prépositionnement, etc.) afférente à la mise en œuvre d'interventions pour les réparations d'urgence,
- Plan d'évacuation des populations : dans l'attente d'une fiabilisation du système d'endiguement et compte tenu des modalités d'inondation du val en cas de défaillance du système d'endiguement, une évacuation préventive du val doit être envisagée en cas de crue susceptible de conduire à l'ouverture d'une brèche au sein de l'ouvrage de protection.

0.6.2 Améliorations structurelles et fonctionnelles de la digue

Le diagnostic de rupture conduit à proposer un programme de travaux de fiabilisation du système d'endiguement en deux étapes :

- Un ensemble d'interventions prioritaires afin de limiter le risque de rupture avant surverse et permettant ainsi de rehausser le niveau de sûreté de manière sensible ; les principales mesures entrant dans ce cadre sont :
 - o Travaux de confortement :
 - En priorité 1 : pérennisation de l'ouvrage vis-à-vis du risque de glissement et/ou d'érosion interne au PK800 (talus côté val) et au PK1500 (talus côté Loire et val),
 - Reprise des enrochements en protection du talus coté Loire, notamment dans les zones les plus exposées à l'érosion externe (linéaire total de 2 km à reprendre en priorité)
 - o Installation d'une piste en pied de digue coté val par comblement des dépressions (6 points à traiter),
 - o Suppression de la végétation et des désordres sur les tronçons concernés,
 - o Reprise du profil en long de la digue afin d'homogénéiser la crête et d'obtenir une revanche constante (études nécessaires y compris prestations topographiques).
- Un ensemble d'interventions complémentaires permettant d'éviter la défaillance du système d'endiguement après surverse et permettant d'atteindre un niveau de sûreté supérieur au niveau de protection apparent.

0.6.3 Amélioration des connaissances

La présente étude de dangers a mis en évidence les limites des connaissances de certains phénomènes au rang desquels peuvent être rangés les mécanismes d'effondrements karstiques, les mécanismes d'érosion interne, la formation et le développement des brèches, ainsi que les calculs de probabilité de rupture global d'un système d'endiguement.

L'étude de dangers a également mis en évidence les limites relatives à la connaissance des ouvrages eux-mêmes : détection d'anomalies, recherche d'archives sur les modes de réalisation et de mise en œuvre, identification des canalisations traversantes non recensées, etc.

Des études et investigations complémentaires sont en cours ou doivent être lancées afin d'y apporter des éléments de réponse à ces questions.

1. RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

1.1 PROPRIÉTAIRE DES OUVRAGES

Les 2 levées du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin se situent en rive droite de la Loire dans le département de la Nièvre (58).

Les ouvrages constitutifs de ces systèmes d'endiguement et leurs terrains d'assiette sont propriété de l'Etat et font partie du domaine public fluvial.

Le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie est affectataire des levées de la Loire domaniale non navigable.

Le Préfet de la Nièvre, représentant des propriétaires du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, est le porteur de la présente étude des dangers.

1.2 GESTIONNAIRE DES OUVRAGES

Agissant pour le compte du Préfet de la Nièvre, la Direction Départementale des Territoires de la Nièvre (DDT 58) est le gestionnaire des levées domaniales de Thareau et de Charrin.

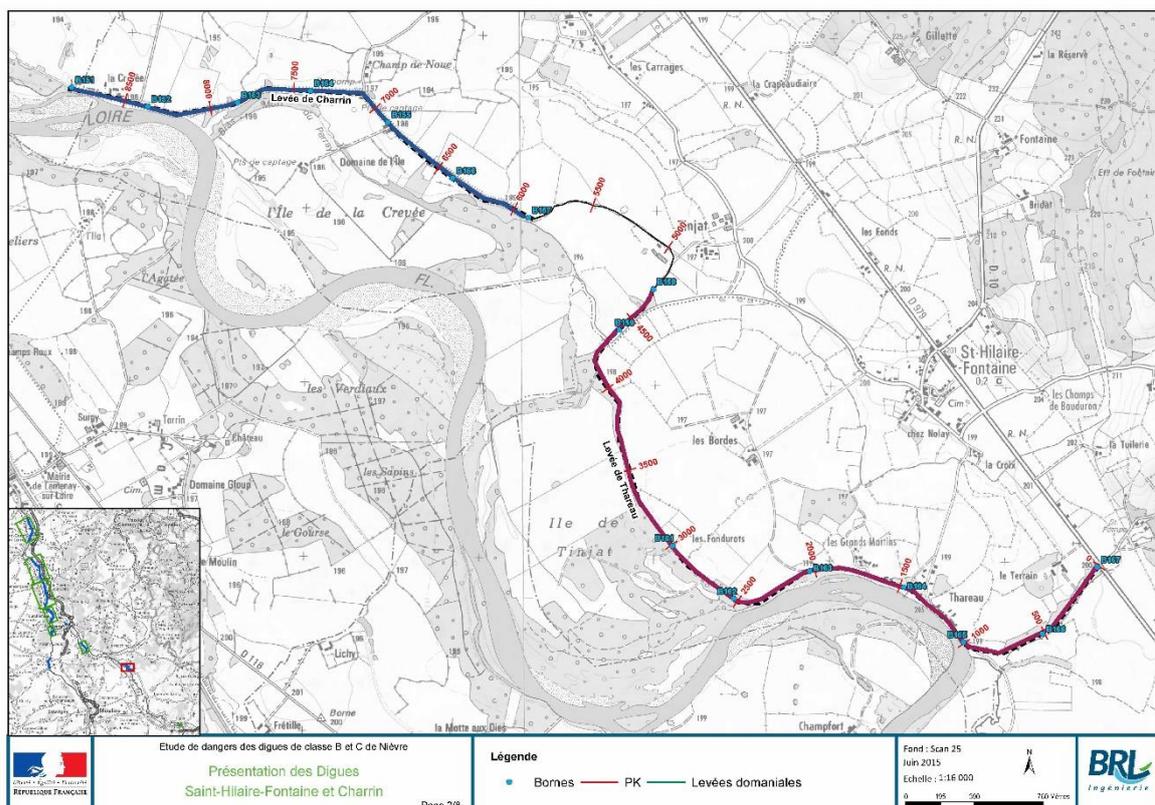


Figure 8 : Ouvrages constituant le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

La DDT 58 a en charge la gestion des levées domaniales sur le linéaire de Loire allant de Iguerande (71) à Belleville-sur-Loire (18), situées dans les départements de Saône-et-Loire, de la Nièvre et du Cher, ainsi que la maîtrise d'ouvrage afférente aux opérations d'entretien et de renforcement des digues et ouvrages encastrés.

La gestion de l'ouvrage consiste notamment en la surveillance de la levée, son entretien et son maintien en bon état ainsi qu'en la conservation du domaine et sa police.

La maîtrise d'ouvrage consiste quant à elle en la conduite des travaux d'entretien et de confortement des digues ainsi que de tous les ouvrages connexes et/ou de nature à influencer leur comportement (cela inclut donc les travaux d'entretien et de restauration des vannes et des clapets mais aussi du lit de la Loire).

Il convient par ailleurs de noter que les terrains d'assiette de la levée peuvent servir à d'autres usages que la seule protection contre les inondations. En l'espèce, voiries publiques, pistes cyclables ou canalisations, empruntent la levée. De tels usages sont autorisés par le gestionnaire sous forme d'autorisations d'occupation temporaire (AOT) du domaine public ou de convention de superposition d'affectation ou de gestion.

1.3 RÉDACTEURS DE L'ÉTUDE DE DANGERS

La présente étude de dangers a été réalisée par BRL ingénierie, bureau d'études agréé au titre du décret du 11 décembre 2007 sous le n° 10a « digues et barrages » par l'arrêté du 7 avril 2011 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques et publié au Journal Officiel de la République française le 13 mai 2011, agrément renouvelé par arrêté le 13 juin 2014 jusqu'au 12 mai 2016.

Elle a été pilotée par Romain RECOUVREUR. Les principaux intervenants et/ou rédacteurs dans la présente étude de dangers sont :

- Nicolas SICART, BRLi (analyse fonctionnelle, diagnostic de rupture et mesures de réduction)
- Gaël RIGAL, BRLi (analyse fonctionnelle, diagnostic de rupture et mesures de réduction)
- Antonin MAZOYER, BRLi (modélisations hydrauliques)
- Vincent CALLAND, BRLi (diagnostic morphodynamique et mesures de réduction associées)
- Jérémy BOSCH, BRLi (diagnostic morphodynamique et mesures de réduction associées)
- Aurélie LETESSIER, GINGER CEBTP de Dijon (diagnostic géotechnique)
- Eric GILBERT, Egeosolutions (étude d'enjeux et évaluation de la gravité des scénarios)

Cette étude de dangers a également bénéficié de la relecture de :

- Anthony ROST, de la DDT 58
- Olivier CORNET, de la DDT 58
- Samuel GUILLOU, de la DDT 58
- Philippe PHILIPPEAU, de la DREAL Centre-Val de Loire

1.4 CLASSEMENT DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE ET DE CHARRIN

La levée de Thareau est située en totalité sur la commune de Saint-Hilaire-Fontaine. Par arrêté préfectoral en date du 10 novembre 2009 (voir annexe 2) et compte tenu des estimations de ses caractéristiques (hauteur maximale et population protégée) disponibles à l'époque, celle-ci a été classée au titre des articles R214-113 et R214-114 du code de l'environnement, en tant que système de digues de classe C (hauteur maximale supérieure à 1 m et population protégée comprise entre 10 et 1 000 personnes).

La levée de Charrin est située sur la commune de Charrin. Par arrêté préfectoral en date du 10 novembre 2009 (voir annexe 2) et compte tenu des estimations de ses caractéristiques (hauteur maximale et population protégée) disponibles à l'époque, celle-ci a été classée au titre des articles R214-113 et R214-114 du code de l'environnement, en tant que système de digues de classe C (hauteur maximale supérieure à 1 m et population protégée comprise entre 10 et 1 000 personnes).

Il est noté que suite au décret paru au JO du 14 mai 2015, le seuil minimum de la population protégée par une digue de classe C a été relevé de 10 à 30 personnes (seuil maximum de cette classe a été également relevé de 1 000 à 3 000 personnes protégées).

2. OBJET DE L'ÉTUDE

2.1 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

La présente étude de dangers du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est réalisée pour satisfaire aux obligations réglementaires (notamment les articles R214-115 à R214-117 du code de l'environnement) auxquelles sont notamment soumises les digues de classe B et C.

Ce document et ses annexes constituent la première étude de dangers de ce système d'endiguement. Sa restitution doit théoriquement intervenir au plus tard le 31 décembre 2014.

Une telle étude « *explicité les niveaux des risques pris en compte, détaille les mesures aptes à les réduire et en précise les niveaux résiduels une fois mises en œuvre les mesures précitées. Elle prend notamment en considération les risques liés aux crues, aux séismes, aux glissements de terrain, aux chutes de blocs et aux avalanches ainsi que les conséquences d'une rupture des ouvrages. Elle prend également en compte des événements de gravité moindre mais de probabilité plus importante tels les accidents et incidents liés à l'exploitation courante de l'aménagement. Elle comprend un résumé non technique présentant la probabilité, la cinétique et les zones d'effets des accidents potentiels ainsi qu'une cartographie des zones de risques significatifs* » (article R214-116 du code de l'environnement).

L'étude de dangers doit également permettre de déterminer le fonctionnement hydraulique du val et le rôle joué par le système d'endiguement.

2.2 LE PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

2.2.1 L'ouvrage de protection et la zone protégée

S'agissant d'ouvrages très anciens, érigés de manière évolutive au fil des décennies voire des siècles, les périmètres du système d'endiguement et les zones protégées correspondantes ne constituent pas des données d'entrée de l'étude mais des résultats de l'analyse fonctionnelle. En l'espèce, la délimitation définie ci-après est différente de celle envisagée au démarrage de la présente étude et de celle faisant l'objet de l'arrêté préfectoral de classement précité.

De manière cohérente avec les résultats de cette analyse, l'ouvrage de protection étudié dans le cadre de la présente étude est constitué :

- De la levée de Thareau en protection amont du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin ;
- De la levée de Charrin, en protection aval du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

Ces 2 levées, historiquement d'un seul tenant, sont séparées par un chemin en terre au même niveau que le terrain naturel (ancienne digue arasée) et se situent sur les communes de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

La zone protégée correspondante correspond aux vals de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin dont le périmètre précis sera fourni ultérieurement dans le cadre de l'analyse fonctionnelle détaillée au chapitre 3.

2.2.2 Les zones d'influence ou d'intérêt

Compte tenu des modalités de gestion du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin et de ses relations avec son environnement (Loire et vals situés à proximité), la présente étude ne se limite pas au seul périmètre de la zone protégée mais s'inscrit à l'échelle plus large de la Loire nivernaise et des différents vals qui y sont présents.

Les fonctionnements hydrauliques des différents vals sont intimement liés au cours d'une crue de la Loire. Il est identifié les vals de Léré, Beffes-Herry, Givry-Cours-les-Barres, Guétin-Bec d'Allier, Nevers (hors zone d'étude), de Luthenay-Uxeloup, de Decize (hors zone d'étude) et enfin de Digoïn.

Ils disposent d'un gestionnaire commun et unique en la personne de la DDT de la Nièvre.



Figure 9 : localisation du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin au sein des vals de la Loire moyenne

C'est notamment à cette échelle que sont traités certains éléments des chapitres 3 et 9.

2.2.2.1 La Loire amont

Le fonctionnement de la Loire amont sera également étudié en aval du barrage de Villerest et jusqu'aux communes de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin. Il est rappelé que le barrage de Villerest a un triple objectif :

- ▶ Soutien d'étiage,
- ▶ Ecrêtement des crues de la Loire amont,
- ▶ Production d'électricité.

L'aval du barrage de Villerest bénéficie de l'écrêtement du débit de crue (jusqu'à 2 000m³/s pour une crue type 1846). Le barrage permet également de retarder la propagation de la pointe de crue vers l'aval du bassin versant.

3. ANALYSE FONCTIONNELLE DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT

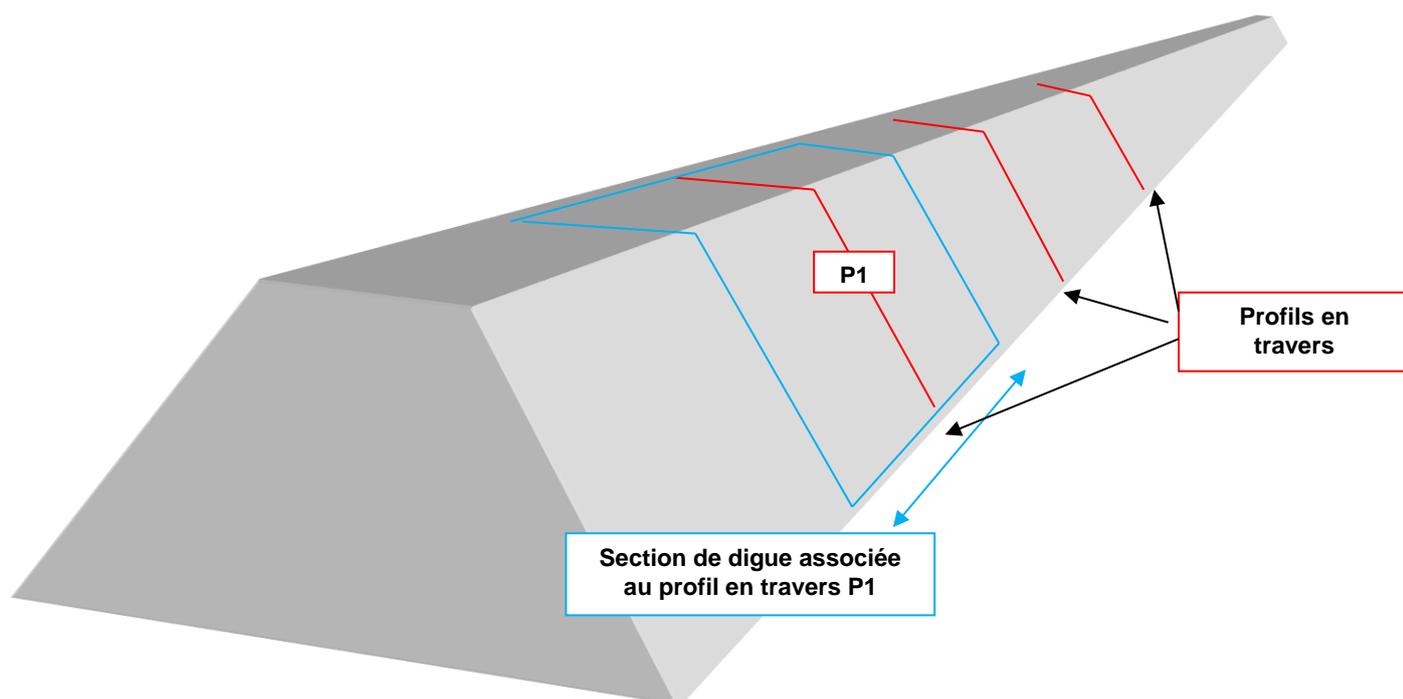
L'analyse fonctionnelle doit permettre d'appréhender le système d'endiguement du point de vue des fonctions de ses composants. Elle doit s'envisager à différentes échelles :

- le système d'endiguement dans son ensemble ;
- les sous-systèmes de digues formant le système d'endiguement (découpage du système d'endiguement en sections), définis par leurs fonctions hydrauliques (digue, passage batardable, etc.) ;
- les composants géotechniques qui constituent la structure des différentes sections de digues (découpage en profils en travers, types de digues) et se définissent par leurs fonctions géotechniques (corps de digue, protection, recharge étanche, drain...).

3.1 DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

3.1.1 Principe de discrétisation du système d'endiguement

Dans la présente étude de dangers, le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est discrétisé en sections de 50 mètres linéaires. Chaque section est rattachée à un profil en travers type (en termes de géométrie et de composants), positionné par défaut au centre de celui-ci, mais pouvant également être légèrement déplacé si cela est jugé pertinent pour améliorer sa représentativité.



Chaque profil en travers est identifié par son numéro et localisé par son PK compté (de manière continue, sans faire abstraction des éventuelles interruptions d'endiguement tels que les rampes et/ou les culées de pont) à partir de l'extrémité amont du système de protection jusqu'à son extrémité aval.

La localisation des profils en travers du système de protection de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est disponible au début du chapitre 10 de la présente étude de dangers.

Les données afférentes à chacun de ces sections de 50 m (caractéristiques géométriques, niveaux de charge hydraulique appliqués, composants géotechniques et renforcements, désordres structurels relevés, modes de surveillance et de gestion et caractéristiques géotechniques) sont détaillés dans l'annexe 3 de la présente EDD.

3.1.2 Définition et principales caractéristiques du système d'endiguement étudié

Le système de protection du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est un système d'endiguement ouvert en aval.

3.1.2.1 Ligne de défense principale

Le système de protection du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est défini par la configuration de sa ligne de défense principale. De premier rang par rapport aux cours d'eau, elle constitue la limite entre les milieux extérieurs cours d'eau (Loire) et la zone protégée. Sa définition résulte d'une analyse conjointe des rédacteurs de la présente étude de dangers et du gestionnaire de l'ouvrage et constitue pour partie un résultat de l'analyse fonctionnelle.

La ligne de défense principale retenue protège le Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin des crues de la Loire sur environ 8,8 km, depuis le remblai de la RD.979 en amont jusqu'en aval de la levée de Charrin, qui se termine brusquement. Elle se caractérise par :

- Plusieurs levées distinctes, de l'amont vers l'aval par :
 - o La levée de Thareau (environ 4,6km de long) ;
 - o La levée de Charrin (environ 3km).

Nota : ces 2 levées étaient historiquement reliées par un ouvrage en remblai, aujourd'hui rabaissé au niveau du terrain naturel sur un linéaire de 1,2km.

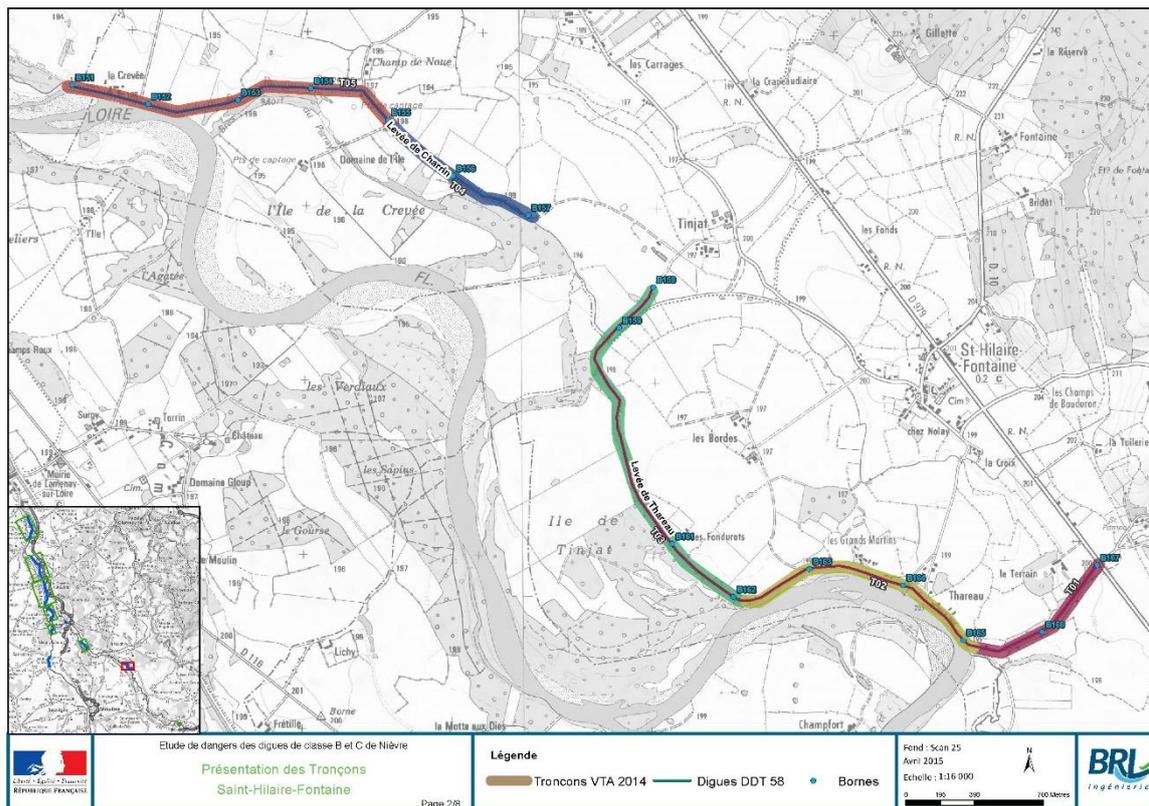


Figure 10 : ligne de défense principale du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Les paragraphes suivants présentent les principales caractéristiques des différentes levées constitutives du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

SECTION N°1 : LEVÉE DE THAREAU DU PK0 AU PK940 (L=940M)

Cette section se caractérise par :

- ▶ Des dimensions de l'ordre de 2,2m de haut, pour 15,8m de large en pied et 4,3m de large en crête,
- ▶ Une végétation ligneuse généralisée sur les 2 talus de la section,
- ▶ Des fossés en eau en pied de talus côté Loire et côté val,
- ▶ Un ouvrage hydraulique traversant (avec clapet anti-retour),
- ▶ Un glissement au niveau du haut du talus côté val,
- ▶ Un bâtiment encastré côté val.



Figure 11 : piste en crête de digue vue vers l'aval
(végétation dense de part et d'autre)



Figure 12 : fossé en eau en pied de talus côté Loire vu vers l'aval



Figure 13 : ouvrage traversant sous la digue vue sur la face amont (talus côté Loire)



Figure 14 : maison encastrée sur talus côté val de la digue

SECTION N°2 : LEVÉE DE THAREAU DU PK940 AU PK2450 (L=1510M)

Cette section est caractérisée par :

- ▶ Un corps de digue plus important : 2,9m de haut en moyenne pour 21,7m de large en pied et 6,4m de large en crête,
- ▶ Un pied de talus en contact avec le lit vif de la Loire sur l'ensemble du linéaire,
- ▶ La présence d'un chemin goudronné en crête de la digue,
- ▶ De nombreux bâtiments encastrés sur le talus côté val,
- ▶ Des renforcements ponctuels de la berge et du bas du talus côté Loire,
- ▶ La présence de nombreux corps étrangers au droit des zones habitées.



Figure 15 : vue de la digue vers l'aval avec pied de talus en contact avec lit vif de la Loire



Figure 16 : renforcement en enrochements libres de la berge (vue vers l'amont)



Figure 17 : corps étrangers sur talus côté Loire



Figure 18 : bâtiment encastré sur talus côté val

SECTION N°3 : LEVÉE DE THAREAU DU PK2450 AU PK4690 (L=2240M)

Cette section est caractérisée par :

- ▶ Une largeur en pied plus faible (15,9m en moyenne), ainsi qu'une réduction de la hauteur (2,2m en moyenne),
- ▶ Une végétation ligneuse généralisée sur les 2 talus de la section,
- ▶ De nombreux terriers, dont certains de grandes dimensions sont traversants,
- ▶ Une crête non circulaire sur environ 1000m (sentier piéton),

- ▶ La présence d'un ouvrage hydraulique traversant avec martelière en aval de la section,
- ▶ Levée ouverte en aval, dont la crête diminue progressivement pour atteindre le niveau du terrain naturel.



Figure 19 : ouvrage traversant en aval de la section (vu vers l'aval)



Figure 20 : terminaison de la digue avec raccordement au niveau du TN (vue vers l'aval)



Figure 21 : terrier sur talus côté Loire



Figure 22 : crête de la digue vue vers l'aval avec sentier

Nota : la section entre les PK4690 et le PK5870 (entre la fin de la levée de Thareau et le début de la levée de Charrin) voit le prolongement du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin au même niveau que le terrain naturel (levée arasée).

SECTION N°4 : LEVÉE DE CHARRIN DU PK5870 AU PK6840 (L=970m)

Cette section est caractérisée par :

- ▶ Une pente H/V avec talus côté val plus raide (2.1 pour 1) que sur talus côté Loire (2.6 pour 1),
- ▶ Une végétation ligneuse généralisée sur les 2 talus de la section,
- ▶ Un renforcement de la crête visible sur un petit linéaire en amont (environ 100m),
- ▶ La présence d'ornières,
- ▶ Des bâtiments encastrés.



Figure 23 : bâtiment en castré sur le bas du talus côté Loire



Figure 24 : ornières en amont du renforcement de la crête (vues vers l'amont)



Figure 25 : piste en crête avec souche au premier plan (vue vers l'aval)



Figure 26 : végétation généralisée sur les 2 talus de la digue (vue vers l'aval)

SECTION N°5 : LEVÉE DE CHARRIN DU PK6840 AU PK8830 (L=1990M)

Cette section est caractérisée par :

- ▶ Une augmentation de la hauteur de digue (environ 3,2m en moyenne au lieu de 2,3m précédemment) et de la largeur en pied (21,5m au lieu de 16,1 précédemment),
- ▶ L'ouverture de l'ouvrage en aval (arrêt brusque de l'ouvrage),
- ▶ Une zone de contact avec le lit vif de la Loire avec talus localement renforcé,
- ▶ Des mouvements de terre importants (notamment glissements sur talus côté Loire),
- ▶ Des zones humides en pied de talus.



Figure 27 : glissement du talus côté Loire



Figure 28 : bâtiment encastré sur talus côté Loire (vu vers l'aval)



Figure 29 : enrochements libres en protection de la berge de la Loire



Figure 30 : piste en crête vue vers l'aval

3.1.2.2 Définition du système d'endiguement

L'analyse du système de protection permet de proposer un découpage en grandes sections de la ligne de défense principale qui tient compte de la propriété des digues. Ce découpage est comparé dans le tableau suivant aux sections décrites dans l'arrêté de classement.

Etude de dangers du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin		Arrêté de classement du 10/11/2009		Commentaire
Sections du système d'endiguement	Linéaire	Sections des levées classées	Linéaire	
Levée de Thareau	4,65 km	Levée de Thareau	4,615 km	
Levée de Charrin	2,96 km	Levée de Charrin	2,57 km	L'ouvrage classé est moins long que celui retenu dans le cadre de l'étude de dangers car il n'inclut pas une partie de la digue surélevé par rapport au TN en amont.

Tableau 1 : comparatif des sections retenues dans le cadre de la présente étude de dangers avec celui retenu dans le cadre de l'arrêté de classement

Les limites géographiques amont et aval précises du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin sont indiquées dans les tableaux suivants :

Limite	Coordonnée X (Lambert 93)	Coordonnée Y (Lambert 93)
Amont	748 817 m	6 628 671 m
Aval	746 270 m	6 630 236 m

Tableau 2 : coordonnées X, Y (Lambert 93) des limites amont et aval de la levée de Thareau

Limite	Coordonnée X (Lambert 93)	Coordonnée Y (Lambert 93)
Amont	745 594 m	6 630 662 m
Aval	742 939 m	6 631 413 m

Tableau 3 : coordonnées X, Y (Lambert 93) des limites amont et aval de la levée de Charrin

3.1.3 Description de l'objectif de protection du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

3.1.3.1 Définition du niveau de protection et de sûreté d'un système d'endiguement

Deux notions importantes en matière de digues et de protection contre les inondations sont à retenir : le niveau de sûreté et le niveau de protection.

Le niveau de sûreté se définit comme le niveau d'eau dans le cours d'eau au-dessus duquel la probabilité de rupture de l'ouvrage ne peut plus être considérée comme négligeable.

Le niveau de protection est le niveau d'eau dans le cours d'eau au-dessus duquel la zone protégée commence à être inondée sans rupture préalable de la digue, par débordement au-dessus du sommet de la digue ou par un déversoir.

La notion de sûreté renvoie au risque de rupture, la notion de protection renvoie au risque de surverse. Dans un système d'endiguement parfaitement fiable, le niveau de sûreté est supérieur ou égal au niveau de protection. Cela revient à dire que la rupture avant surverse est improbable : le risque de rupture n'apparaît que lorsque la lame d'eau déversante atteint une hauteur significative ou, dans le cas de digue équipée d'un déversoir, que ce dernier a atteint sa capacité maximale.

Dans le cas des digues de Loire :

- Le niveau de sûreté se définit donc comme le niveau d'eau dans le lit endigué de la Loire au-dessus duquel la probabilité événementielle de rupture de l'ouvrage ne peut plus être considéré comme négligeable.
- **Dans la présent étude de dangers, le niveau de sûreté du système d'endiguement est défini comme le niveau d'eau pour lequel la probabilité de rupture d'un profil discrétisant la levée est supérieure ou égale à 1%, pour un évènement de crue donné.**
- Le niveau de protection se définit donc comme le niveau d'eau dans le lit endigué de la Loire à partir duquel la zone protégée commence à être inondée sans rupture préalable de la digue par débordement au-dessus du sommet de la digue ou par un déversoir.

Dans le cas des levées de la Loire, le niveau de sûreté est en général inférieur au niveau de protection. Cela signifie donc que le risque de rupture avant surverse ou avant fonctionnement des déversoirs ne peut être considéré comme négligeable et donc de fait que les digues ne peuvent donc être de fait considérées comme parfaitement fiables. **Pour ne pas entretenir l'illusion d'une protection efficace pour un tel niveau d'eau dans le fleuve, on parlera de niveau de protection apparent.**

Les 4 schémas suivants illustrent ces deux notions et les différentes configurations possibles en termes de fiabilité des systèmes d'endiguement.

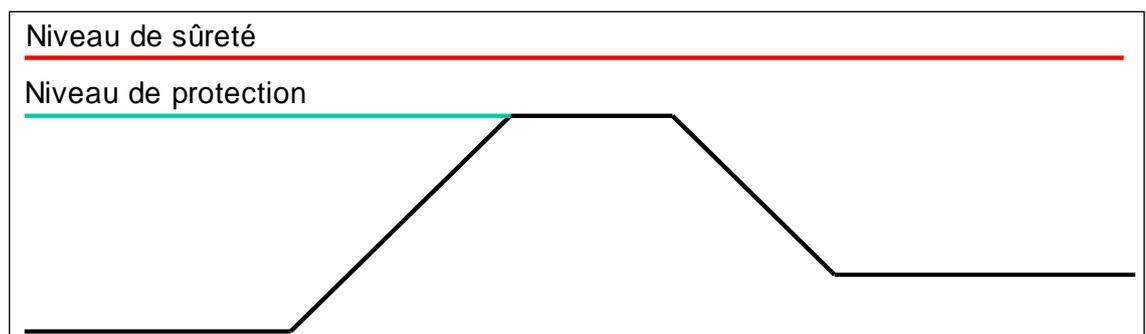


Figure 31 : Digue fiable

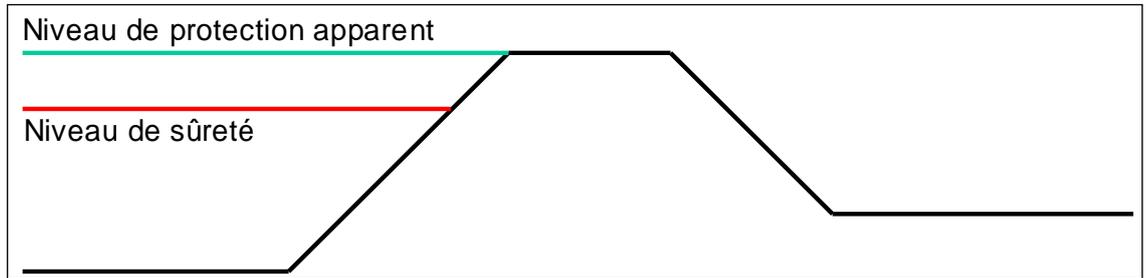


Figure 32 : Digue non fiabilisée, non équipée d'un déversoir (cas des levées constituant le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin)

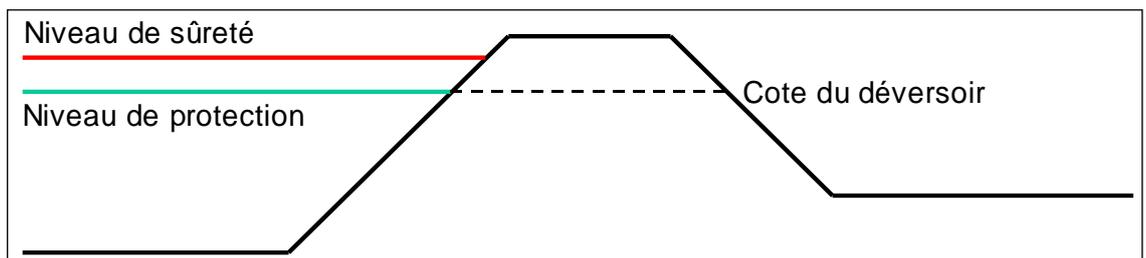


Figure 33 : Digue partiellement fiabilisée, équipée d'un déversoir

Nota : le niveau de sûreté, bien que supérieur au niveau de protection, calé sur la cote du déversoir, reste en-deçà de la crête de la digue.

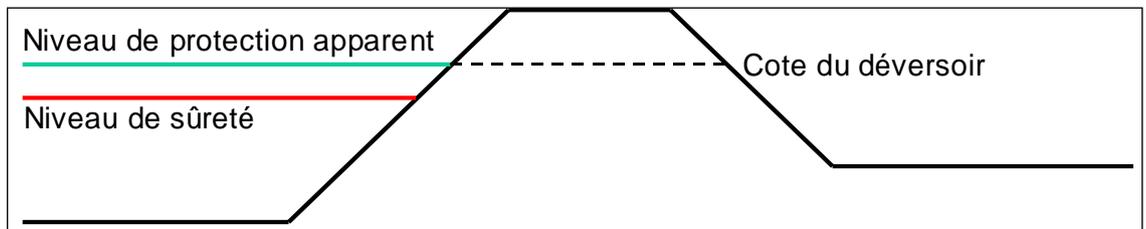


Figure 34 : Digue non fiabilisée, équipée d'un déversoir

Nota : le niveau de protection n'est qu'apparent car le niveau de sûreté lui reste inférieur : il y a risque de rupture avant fonctionnement du déversoir.

3.1.3.2 Objectif de protection historique du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Les ouvrages anciens, tels que les digues de la Loire, n'ont pas été conçus dans les règles de l'art actuelles, où le calcul aux états limites ultimes garantit la résistance d'une digue neuve en tout point jusqu'à la surverse, voire au-delà. Leur conception résulte d'un savoir-faire déterminé par l'expérience et l'observation des phénomènes.

Comme la quasi-totalité des levées de la Loire, les levées constitutives du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin sont des ouvrages très anciens, datant souvent de plusieurs siècles, érigés par exhaussements successifs du remblai de terre (d'où leur nom de « levée ») après chaque crue destructrice (cf. schéma présenté en figure suivante).

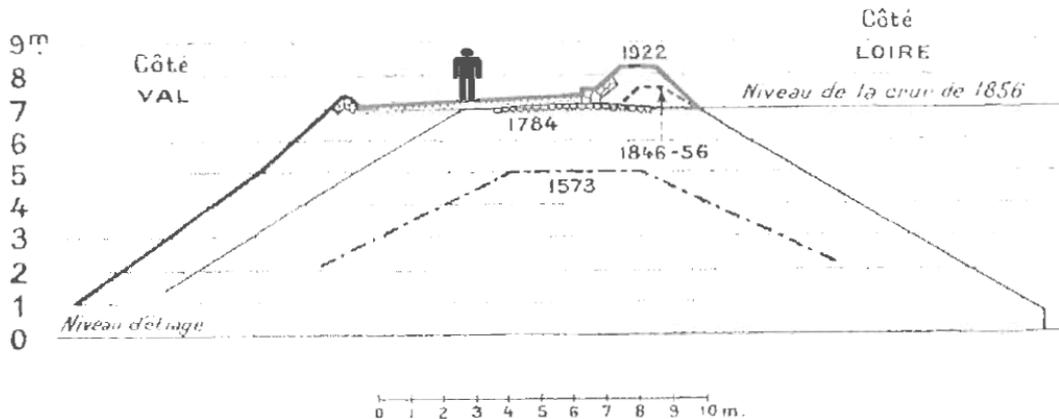


Figure 35 : évolution du profil de la levée de Loire depuis le XVIIe siècle jusqu'au début du XXe siècle (source R. Dion - Le Val de Loire 1934)

La stratégie des différents aménageurs a été de chercher à rendre les digues insubmersibles, sans jamais y parvenir véritablement. Au XVIIe siècle, pour remédier à leur rupture, les ingénieurs avaient mis en place plusieurs déchargeoirs, comme à Gien (Loiret), Blois (Loir-et-Cher), Limeray (Indre-et-Loire), mais ce n'est qu'après les trois grandes crues du XIXe siècle (1846-1856-1866) qu'on a pris conscience de l'impossibilité de réaliser des digues insubmersibles et qu'on a systématisé la construction de déversoirs (Mémoire sur les ouvrages de défense contre les inondations, COMOY, 1868).

Plutôt que de continuer à faire croître la hauteur des levées, ce qui a toujours eu pour effet d'augmenter les hauteurs d'eau en crue ainsi que les risques de rupture, le principe du déversoir consiste à abaisser une section de digue de façon à sauvegarder les autres et par là-même le rôle de protection qu'elles sont supposées assurer.

Suite aux grandes crues du XIXe siècle, la construction de déversoirs a été décidée sur certains vals, de façon à protéger les digues situées en aval pour des crues identiques ou supérieures à celle de décembre 1825 (plus forte crue connue en 1868 qui n'ait pas rompu les levées).

Le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin n'est cependant pas pourvu de déversoir.

3.1.3.3 Niveau de protection apparent du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

La détermination des lignes d'eau au sein du lit endigué de la Loire a été conduite avec l'aide d'un modèle hydraulique 1D à casiers construit avec le logiciel Hydrariv. Le modèle LB11 est un modèle filaire-casiers mis au point avec le logiciel Hydrariv par le SPC Loire-Cher-Indre en 2013, dans le but de disposer d'un outil de prévision des crues en remplacement de l'outil précédent sur le Loire Bourguignonne qui était un modèle de propagation simplifié. Il couvre le linéaire de la Loire de Gilly à Nevers.

Dans le souci de retenir une approche sécuritaire, la détermination des lignes d'eau est faite en supposant qu'aucune brèche ne se produit sur les systèmes d'endiguement situés en amont ou en aval de celui de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

La définition du niveau de protection apparent repose sur la comparaison du profil en long en crête du système d'endiguement avec les lignes d'eau modélisées pour les 9 occurrences de crue définies au §6.1.2, afin d'identifier les occurrences, lieux et niveaux de surverse.

NOTA : aucune banquette n'est présente sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (cf. 3.1.5.1).

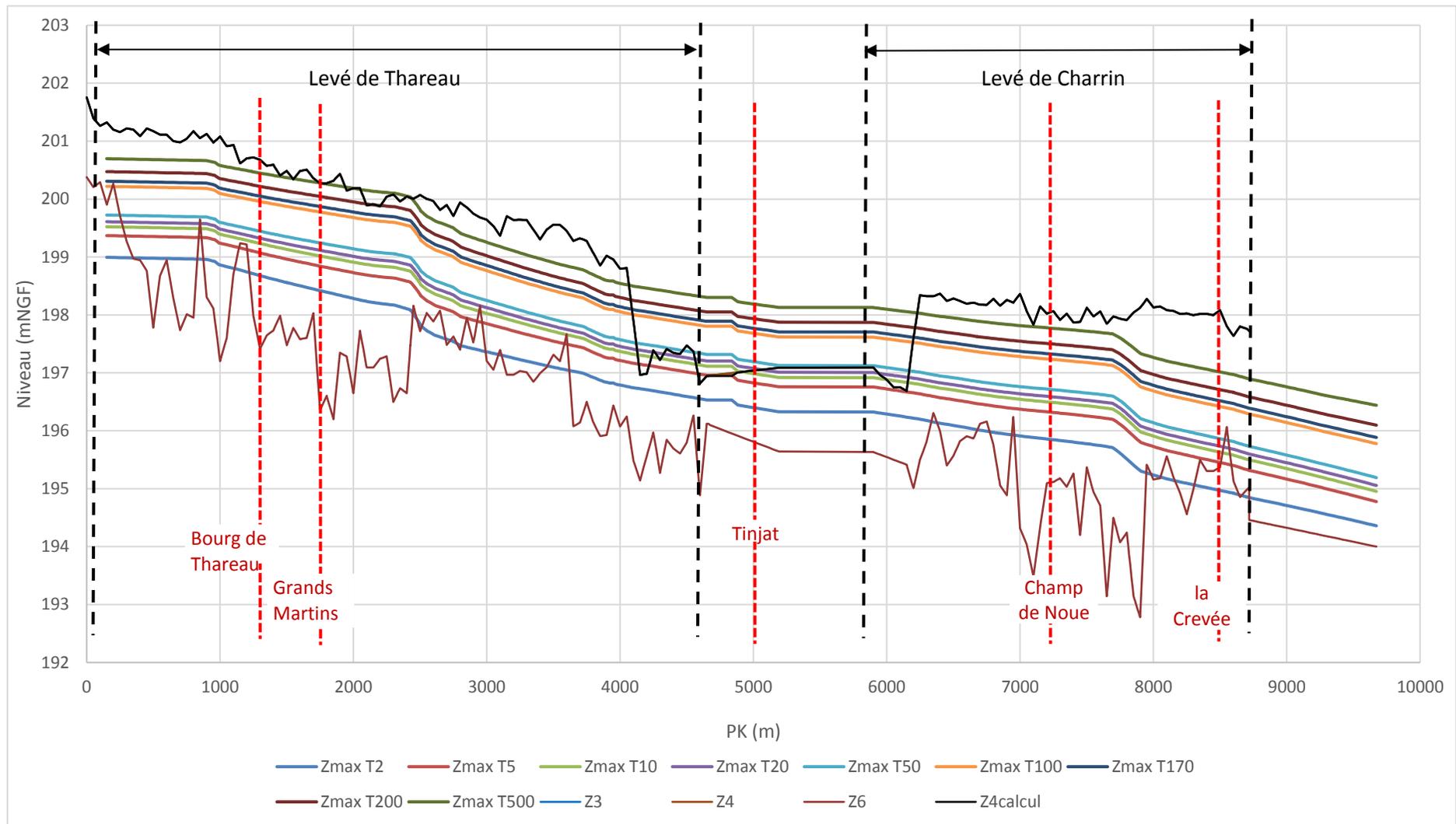


Figure 36 : Lignes d'eau, profils en long de la crête de banquette, crête de digue et pied de digue

PK	Hydraulique : cotes de crue								Hydraulique : cotes d'eau coté Val (fondation du Val)								Charge hydraulique Zcrue - ZB OU Zcrue - Zel en cas d'inondation du Val (cases bleues)													
	Z02	Z05	Z010	Z020	Z050	Z0100	Z0170	Z0200	Z020V	Z05V	Z010V	Z020V	Z050V	Z0100V	Z0170V	Z0200V	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200						
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK0	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-1.39	-1.01	-0.86	-0.77	-0.66	-0.16	-0.07	0.09
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK5	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-1.21	-0.84	-0.68	-0.60	-0.48	0.01	0.10	0.27
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK100	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-1.30	-0.92	-0.77	-0.68	-0.57	-0.07	0.02	0.18
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK150	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-0.91	-0.54	-0.38	-0.30	-0.18	0.31	0.40	0.57
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK200	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-1.27	-0.90	-0.74	-0.66	-0.54	-0.05	0.04	0.21
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK250	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-0.72	-0.35	-0.20	-0.11	0.01	0.50	0.59	0.76
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK300	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-0.28	0.09	0.25	0.33	0.45	0.94	1.03	1.20
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK350	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.01	0.39	0.54	0.63	0.74	1.24	1.33	1.49
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK400	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.04	0.41	0.56	0.65	0.77	1.26	1.35	1.52
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK450	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.22	0.60	0.75	0.84	0.95	1.45	1.54	1.70
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK500	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.61	0.98	1.14	1.22	1.34	1.83	1.92	2.09
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK550	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.31	0.68	0.83	0.92	1.04	1.53	1.62	1.79
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK600	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.03	0.40	0.55	0.64	0.76	1.25	1.34	1.51
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.69	1.06	1.21	1.30	1.42	1.91	2.00	2.17
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.23	1.61	1.76	1.85	1.96	2.29	2.33	2.22
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.96	1.33	1.48	1.57	1.69	2.18	2.27	2.21
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.93	1.31	1.46	1.55	1.67	2.16	2.25	2.21
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK850	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.29	0.67	0.82	0.91	1.02	1.52	1.61	1.77
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK900	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.65	1.03	1.18	1.27	1.38	1.88	1.97	2.13
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK950	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.82	1.19	1.35	1.43	1.55	2.04	2.13	2.18
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1000	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.66	2.04	2.19	2.18	2.20	2.20	2.24	2.12
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1050	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.23	1.61	1.76	1.85	1.97	2.17	2.21	2.10
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1100	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.10	0.48	0.63	0.72	0.84	1.34	1.43	1.60
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1150	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-0.46	-0.08	0.08	0.17	0.29	0.79	0.88	1.05
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1200	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	-0.47	-0.09	0.07	0.16	0.28	0.79	0.88	1.05
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1250	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.72	1.11	1.27	1.36	1.48	1.99	2.09	2.01
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1300	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.27	1.66	1.82	1.91	2.03	2.06	2.10	1.99
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1350	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.00	1.40	1.56	1.65	1.77	2.04	2.08	1.97
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1400	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.89	1.29	1.45	1.54	1.67	2.01	2.06	1.95
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1450	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.60	1.00	1.17	1.26	1.39	1.91	2.00	1.93
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1500	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.89	1.29	1.46	1.56	1.68	1.97	2.02	1.91
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1550	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.76	1.17	1.33	1.43	1.55	1.96	2.00	1.89
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.92	1.34	1.51	1.60	1.73	1.93	1.98	1.87
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.87	1.29	1.46	1.56	1.68	1.92	1.96	1.85
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1700	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.42	0.84	1.01	1.11	1.24	1.77	1.86	1.83
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	2.07	1.79	1.82	1.82	1.84	1.88	1.92	1.81
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.79	1.77	1.80	1.79	1.82	1.86	1.90	1.79
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	2.16	1.75	1.77	1.77	1.80	1.84	1.88	1.77
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1900	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	0.99	1.43	1.61	1.71	1.78	1.82	1.86	1.76
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1950	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.03	1.47	1.65	1.73	1.76	1.80	1.85	1.74
3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2000	198.99	199.37	199.52	199.61	199.72	200.22	200.31	200.47									199.20	197.30	197.40	197.90	197.95	198.23	1.64	1.68	1.71	1.71	1.74	1.78	1.83	1.72
3_Saint-Hilaire																														

Le val de Saint-Hilaire-Fontaine est un val largement ouvert à l'aval. En effet, les ouvrages jouent principalement un rôle de déflecteur. Ainsi, comme présenté par le tableau précédent, le remous s'établit en arrière de celle-ci dès les crues fréquentes.

En détail, il convient de noter que l'analyse des profils en long conduit à diviser le val en deux « sous-val » :

Sous-Val de Saint Hilaire

Le val s'inonde par remous à partir de la crue Q5 sur le linéaire non endigué qui s'étend du PK=4200m au PK=5500m. Les eaux pénètrent dans le val par surverse à partir de la crue Q200.

Le niveau de protection apparent du sous-val de Saint Hilaire correspond à une crue bicentennale. Pour cette crue, la hauteur d'eau à l'échelle de référence de Gilly est de 9.19 m et le débit est de 3900 m³/s.

Sous-Val de Charrin

Le val est inondé par remous dès les crues courantes, inférieures à Q2. L'eau entre dans le val par l'amont à partir de la crue Q10 environ. Un écoulement à travers le val s'établit, ce dernier étant ouvert à l'aval. Le reste du linéaire de digue entre en surverse pour une crue de l'ordre de Q500.

Le niveau de protection apparent du sous-val de Charrin correspond à une crue Q10. Pour cette crue, la hauteur d'eau à l'échelle de référence de Gilly est de 6.64 m et le débit est de 1950 m³/s.

3.1.4 Principaux résultats de l'analyse fonctionnelle hydraulique

De par sa configuration et ses caractéristiques, le fonctionnement hydraulique du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est relativement simple. Il est synthétisé dans le tableau suivant :

Elément du système d'endiguement ou de son environnement	Type	Fonction hydraulique	Fonctionnement
Levées en remblai amont (Thareau)	Section	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée	Passif
Linéaire central non endigué	Section	Assurer la vidange et du val amont en cas d'entrée d'eau dans la zone protégée / Permettre l'entrée d'eau dans le val aval	Passif
Levées en remblai aval (Charrin)	Section	Limiter l'entrée d'eau dans le val aval	Passif
Linéaire aval non endigué	Section	Assurer la vidange du val aval	Passif

Tableau 4 : récapitulatif des éléments du système d'endiguement ou de son environnement et fonctions hydrauliques associées

Comme indiqué dans ce tableau, la vidange et le ressuyage des deux sous-val en cas d'entrée d'eau dans la zone protégée se ferait :

- ▶ Pour le val amont (Saint Hilaire), par l'intermédiaire du linéaire central non endigué ou vers le val aval. La durée de submersion pour la crue du niveau de protection apparent Q200 est de 110h environ.
- ▶ Pour le val aval (Charrin), par l'intermédiaire du linéaire aval non endigué. Pour la crue Q500, un volume de 0.86 Hm³ transite par le val de Charrin.

3.1.5 Principales caractéristiques externes du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Les paragraphes suivants présentent les principales caractéristiques externes du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

Le lecteur est invité à se reporter au rapport de VTA 2014 fourni en annexe 4 pour un aperçu plus détaillé des principales caractéristiques externes des différentes sections.

3.1.5.1 Les rehausses

Le terme « réhausse » regroupe différents types d'ouvrages (banquette en terre, muret ou parapet, mur), généralement positionnés en crête de digue côté Loire et visant à l'origine à augmenter le niveau de protection apparent et/ou à garantir une revanche de sécurité supplémentaire par rapport à la crête de digue.

Contrairement à plusieurs autres vals de la Loire moyenne, le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin n'est pas équipé de rehausses.

3.1.5.2 Les chemins de services

La levée de **Thareau** est constituée en grande partie d'une piste en terre, sauf au droit des habitations du hameau de Thareau et des Grands Martins où le chemin a été goudronné sur environ 750m. La levée n'est pas circulaire en crête sur environ 1 000m en aval du hameau des Fondurots (section n°3). En s'écartant du lit de la Loire et en pénétrant dans les terres agricoles, le chemin en crête de la digue s'élargit vers l'aval.

La levée de **Charrin** présente en crête un chemin en terre carrossable sur l'ensemble de son linéaire. Cette digue rejoint le terrain naturel en aval du contact avec le lit vif de la Loire, à l'ouest du hameau de la Crevée. Lors de notre visite de terrain, un arrêté préfectoral en date du 18 août 2014 interdisait la circulation en aval de la section n°5 de cette levée suite au glissement récent du talus côté Loire.



Figure 38 : vue du glissement depuis le haut du talus côté Loire (section n°5)



Figure 39 : fermeture du chemin en aval de la section n°5 (vue vers l'amont depuis le TN)

3.1.5.3 Les ouvrages hydrauliques traversants

Deux ouvrages hydrauliques traversant ont été identifiés, permettant l'écoulement des eaux de part et d'autre de la digue.

Le premier ouvrage est composé d'une canalisation de diamètre 300mm avec clapet anti-retour positionné côté val de l'ouvrage (inutilisable en cas de crue de la Loire !). Il est situé en amont de la section n°1 et permet de relier les 2 fossés situés en pied de digue.

Le deuxième ouvrage se situe en aval de la section n°3 (fossé traversant la digue). Il se compose d'une vanne métallique située côté val.

ID	Fil d'eau (mNGF)	POSITION	type
340 – OH8003	Environ 200.6	Haut talus	Ouvrage traversant avec clapet
341 – OH8004	194.40	Crête côté Loire	Ouvrage traversant avec martelière



Point 340 : vue de l'ouvrage côté Loire (section n°1)



Point 340 : vue de l'ouvrage côté val (section n°1) avec clapet anti-retour



16:53 26/08/14



Point 341 : ouvrage avec martelière côté val (section n°3)

Point 341 : vue de la martelière en dessous de l'ouvrage (fossé en eau au niveau section n°3)

Nota : L'apparition de circulation préférentielle de l'eau le long de cette discontinuité traversante de la digue est ainsi à surveiller. En effet, celle-ci est susceptible d'initier une érosion interne de contact de la levée.

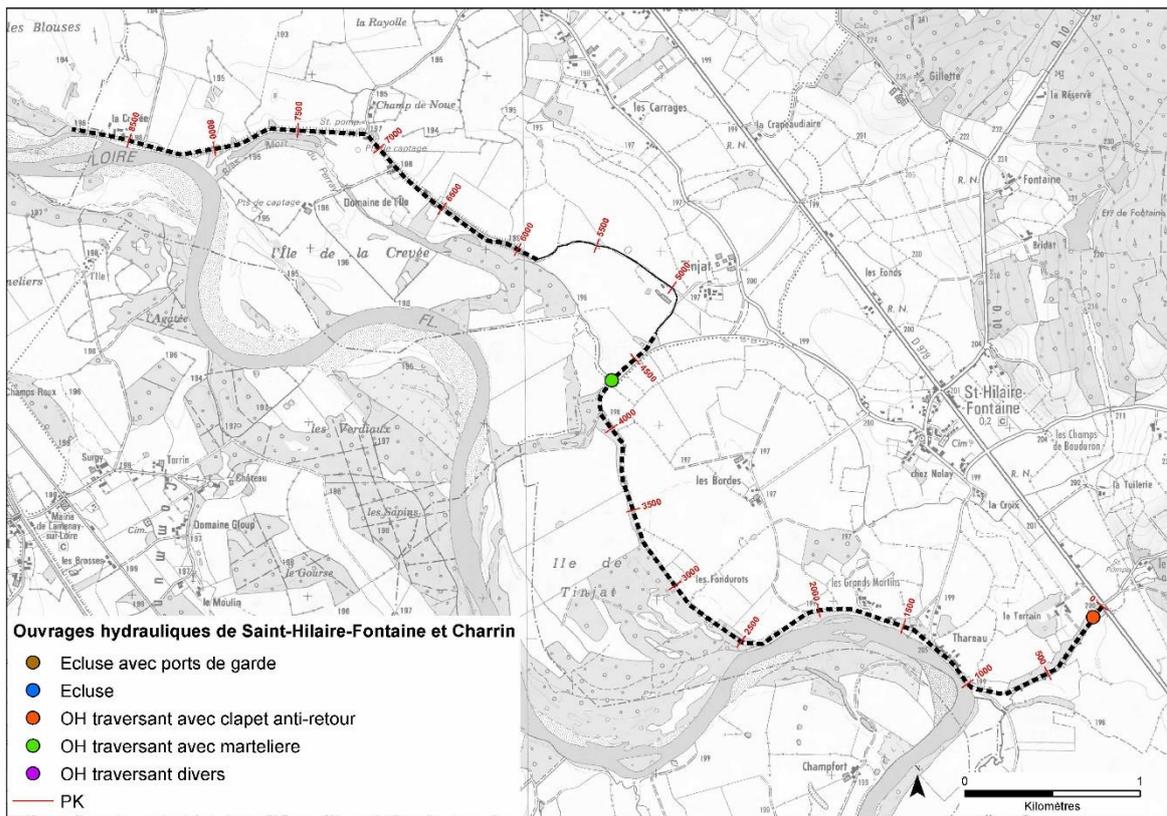


Figure 40 : Localisation et position des ouvrages hydrauliques dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

3.1.5.4 Les bouchures

Aucun dispositif de bouchure ou de batardeau n'a été recensé sur le système de protection du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

3.1.6 Caractérisation géotechnique de la digue et de sa fondation

Une campagne géotechnique, associant reconnaissances géophysiques EM31 systématiques, panneaux électriques transversaux et longitudinaux, sondages et essais in-situ ou en laboratoires, a été menée afin de délimiter les sections homogènes d'un point de vue lithologique et d'en préciser les caractéristiques mécaniques et hydrauliques. Un descriptif détaillé des reconnaissances pratiquées et de la méthodologie d'analyse géotechnique qui en a été faite est disponible en annexe 3.

L'analyse de l'ensemble des résultats a permis d'identifier **11 sections de digues de nature homogène** (T1 à T7 sur la levée de Thareau et de T1 à T4 sur la levée de Charrin).

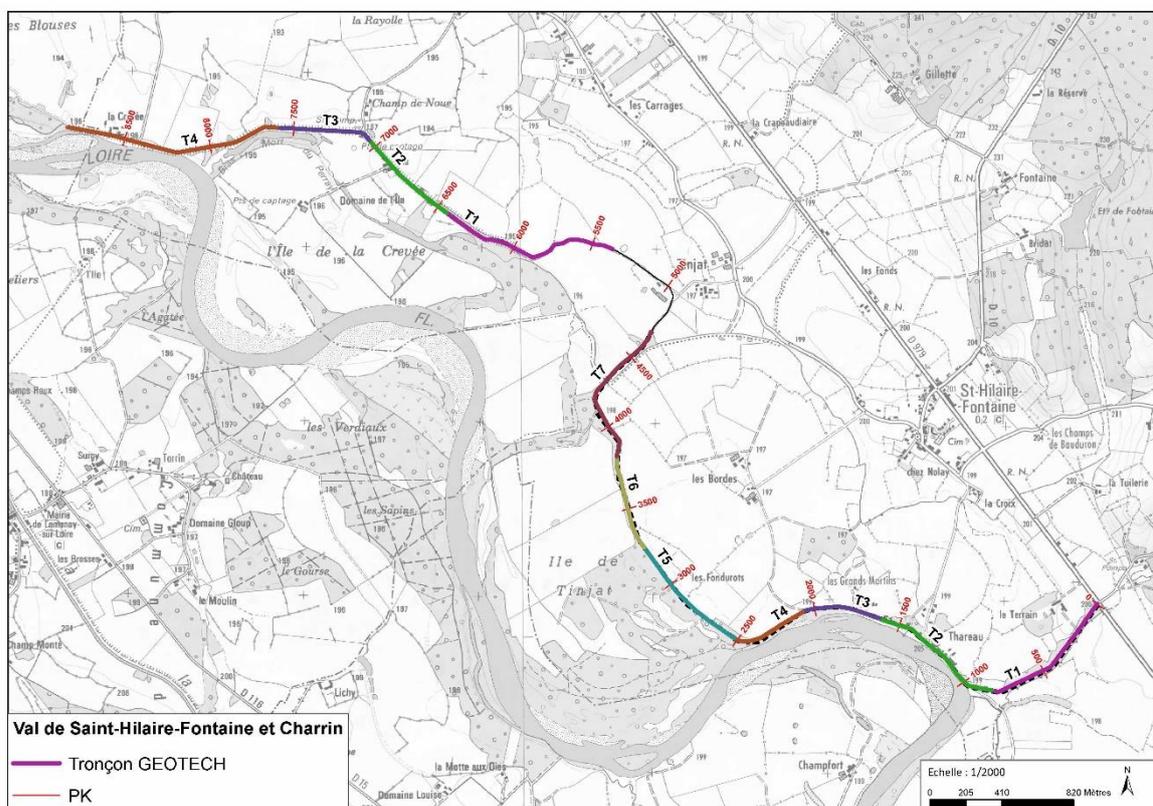


Figure 41 : découpage du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin en sections géotechniques homogènes

Le corps de la digue du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est globalement de nature sableuse avec passages plus ou moins limoneux ou graveleux.

Tableau 5 - Caractéristiques mécaniques et la perméabilité de ces matériaux

Caractéristique tronçon homogène				Caractéristiques du corps de Digue							
Tronçon	Début	Fin	Linéaire	Lithologie	yh	Cote de la base	Niveau d'eau éventuel	Epaisseur	Perméabilité	C'	φ'
THAREAU T1	PK 0	PK 830	830 ml	2a - Sables argileux et légèrement graveleux	19 kN/m ³	199.0 m NGF	-	2.0 m	1x10 ⁻⁷ m/s	5	30
THAREAU T2	PK 830	PK 1620	790 ml	2b - Sables et graviers limoneux	19 kN/m ³	199.0 m NGF	-	1.5 m	3x10 ⁻⁶ m/s	5	30
THAREAU T3	PK 1620	PK 2070	450 ml	2b - Sables et graviers légèrement limoneux	19 kN/m ³	198.0 m NGF	-	2.5 m	3x10 ⁻⁶ m/s	5	30
THAREAU T4	PK 2070	PK 2520	450 ml	1 b - Limon sableux	19 kN/m ³	199.0 m NGF	-	1.0 m	5x10 ⁻⁶ m/s	15	25
THAREAU T5	PK 2520	PK 3260	740 ml	1 b - Limon argileux et sableux	19 kN/m ³	197.5 m NGF	-	2.0 m	3x10 ⁻⁶ m/s	15	25
THAREAU T6	PK 3260	PK 3810	550 ml	2a - Sable limoneux	19 kN/m ³	198.0 m NGF	-	1.5 m	5x10 ⁻⁶ m/s	5	30
THAREAU T7	PK 3810	PK 4690	880 ml	1 b - Limon sableux	19 kN/m ³	195.0 m NGF	-	3.0 m	1x10 ⁻⁶ m/s	18 kPa	27°

Caractéristique tronçon homogène				Caractéristiques du corps de Digue							
Tronçon	Début	Fin	Linéaire	Lithologie	yh	Cote de la base	Niveau d'eau éventuel	Epaisseur	Perméabilité	C'	φ'
CHARRIN T1	PK 5380	PK 6440	1060 ml	1 b - Argile sableuse	19 kN/m ³	195.5 m NGF	-	2.5 m	1x10 ⁻⁷ m/s	37 kPa	20°
CHARRIN T2	PK 6440	PK 7050	610 ml	2a - Sables plus ou moins limoneux	19 kN/m ³	196.0 m NGF	-	2.0 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	5 kPa	30°
CHARRIN T3	PK 7050	PK 7600	550 ml	2a - Sables limoneux et légèrement graveleux	19 kN/m ³	197.5 m NGF	-	1.0 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	5 kPa	30°
CHARRIN T4	PK 7600	PK 8830	1230 ml	2a - Sable plus ou moins limoneux	19 kN/m ³	196.5 m NGF	-	1.5 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	5 kPa	35°

La fondation du système d'endiguement domanial du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est globalement homogène. Elle est constituée :

1. D'une première couche de limons argileux à sableux d'environ 2m d'épaisseur avec une perméabilité de l'ordre de 10^{-7} m/s
2. Puis d'une formation sédimentaire composée principalement de sables (alluvions de la Loire) de perméabilité moyenne 10^{-7} m/s, pour une épaisseur de l'ordre de 5m
3. Et enfin par le substratum du Tertiaire constitué par d'argiles, non rencontrée dans les sondages (voir contexte géologique du rapport géotechnique annexé).

Tableau 6 - Caractéristiques mécaniques et la perméabilité des niveaux d'assises peu perméables

Caractéristique tronçon homogène				Caractéristiques du niveau d'assise peu perméable							
Tronçon	Début	Fin	Linéaire	Lithologie	yh	Cote de la base	Niveau d'eau éventuel	Epaisseur	Perméabilité	C'	φ'
THAREAU T1	PK 0	PK 830	830 ml	-							
THAREAU T2	PK 830	PK 1620	790 ml	1 b - Limon argileux et sableux à sables très limoneux	19 kN/m ³	198.5 m NGF	-	5.5 m	6x10 ⁻⁶ m/s	10 kPa	25°
THAREAU T3	PK 1620	PK 2070	450 ml	-							
THAREAU T4	PK 2070	PK 2520	450 ml	1a - Limon argileux	19 kN/m ³	198.0 m NGF	-	1.0 m	1x10 ⁻⁸ m/s	25 kPa	20°
THAREAU T5	PK 2520	PK 3260	740 ml	-							
THAREAU T6	PK 3260	PK 3810	550 ml	-							
THAREAU T7	PK 3810	PK 4690	880 ml	1 b - Limon sableux à argile sableuse	20 kN/m ³	193.5 m NGF	-	1.5 m	1x10 ⁻⁷ m/s	23 kPa	26°

Caractéristique tronçon homogène				Caractéristiques du niveau d'assise peu perméable							
Tronçon	Début	Fin	Linéaire	Lithologie	yh	Cote de la base	Niveau d'eau éventuel	Epaisseur	Perméabilité	C'	φ'
CHARRIN T1	PK 5380	PK 6440	1060 ml	-							
CHARRIN T2	PK 6440	PK 7050	610 ml	-							
CHARRIN T3	PK 7050	PK 7600	550 ml	1 b - Limon sableux	20 kN/m ³	194.5 m NGF	-	3.0 m	1x10 ⁻⁷ m/s	20 kPa	25°
CHARRIN T4	PK 7600	PK 8830	1230 ml	-							

Tableau 7 - Caractéristiques mécaniques et la perméabilité des alluvions perméables

Caractéristique tronçon homogène				Caractéristiques du niveau d'alluvions perméables							
Tronçon	Début	Fin	Linéaire	Lithologie	yh	Cote de la base	Niveau d'eau éventuel	Epaisseur	Perméabilité	C'	φ'
THAREAU T1	PK 0	PK 830	830 ml	2a - Sables limoneux à argileux	20 kN/m ³	196.5 m NGF	6m	2.5 m	1x10 ⁻⁷ m/s	4 kPa	32 °
				2a - Sables et graviers légèrement limoneux	20 kN/m ³	193.0 m NGF		3.5 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	2 kPa	35°
				3c - Sables, graviers et galets	20 kN/m ³	191.0 m NGF		2.0 m	3x10 ⁻⁵ m/s	0 kPa	35 °
THAREAU T2	PK 830	PK 1620	790 ml	-							
THAREAU T3	PK 1620	PK 2070	450 ml	2a - Sables argileux	20 kN/m ³	196.5 m NGF	-	≥ 1.5 m	6x10 ⁻⁶ m/s	5 kPa	30 °
THAREAU T4	PK 2070	PK 2520	450 ml	1 b - Argile sableuse à sable argileux	20 kN/m ³	191.5 m NGF	1.4 m	≥ 2.5 m	4x10 ⁻⁶ m/s	5 kPa	30 °
THAREAU T5	PK 2520	PK 3260	740 ml	1 b - Limon sableux et graveleux	20 kN/m ³	196.0 m NGF	-	≥ 1.5 m	3x10 ⁻⁶ m/s	10 kPa	25 °
				3b - Sables et graviers	20 kN/m ³	191.5 m NGF	-	≥ 4.5 m	x10 ⁻⁶ m/s	0 kPa	35 °
THAREAU T6	PK 3260	PK 3810	550 ml	2a - Sables à passages limoneux	20 kN/m ³	193.0 m NGF	4.2 m	≥ 5.0 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	0 kPa	35°
THAREAU T7	PK 3810	PK 4690	880 ml	2a - Sables légèrement limoneux	20 kN/m ³	193.0 m NGF	-	≥ 0.5 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	2 kPa	35 °
				3b - Sables plus ou moins graveleux	20 kN/m ³	188.0 m NGF	5.5 m	≥ 5.0 m	2x10 ⁻⁶ m/s	0 kPa	30 °

Caractéristique tronçon homogène				Caractéristiques du niveau d'alluvions perméables							
Tronçon	Début	Fin	Linéaire	Lithologie	yh	Cote de la base	Niveau d'eau éventuel	Epaisseur	Perméabilité	C'	ϕ'
CHARRIN T1	PK 5380	PK 6440	1060 ml	3a - Sables	20 kN/m ³	189.0 m NGF	7.0 m	≥ 5.5 m	6x10 ⁻⁶ m/s	0 kPa	30 °
				3c - Sables, graviers et galets	21 kN/m ³	187.0 m NGF	-	≥ 4.5 m	1 x10 ⁻⁶ m/s	0 kPa	40 °
CHARRIN T2	PK 6440	PK 7050	610 ml	3b - Sables et graviers	20 kN/m ³	192.0 m NGF	5.0 m	≥ 4.0 m	3x10 ⁻⁶ m/s	0 kPa	35°
CHARRIN T3	PK 7050	PK 7600	550 ml	2a - Sables limoneux à limon sableux	20 kN/m ³	188.5 m NGF	4.6 m	≥ 2.5 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	5 kPa	25°
CHARRIN T4	PK 7600	PK 8830	1230 ml	2a - Sables plus ou moins limoneux à limon sableux	20 kN/m ³	188.0 m NGF	-	≥ 8.5 m	5 x10 ⁻⁶ m/s	5 kPa	35°

3.1.7 Profils en travers type des ouvrages

En s'appuyant sur les résultats de l'étude géotechnique ainsi que sur l'analyse visuelle et géométrique du système d'endiguement, le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin peut être décrit au travers d'un profil en travers type unique.

Ce profil en travers type est décomposé en différents composants auxquels peuvent être associées une ou plusieurs des familles de fonction géotechnique indiquées dans le tableau ci-après :

N°	Famille de fonction géotechnique
1	Stabilité mécanique d'ensemble (conditionne la stabilité mécanique de la section)
2	Étanchéité (limite les écoulements vers les autres composants)
3	Drainage (capte les écoulements internes à la section et les évacue)
4	Non entraînement des particules en interface (empêche la migration des particules à l'interface des composants granulaires)
5	Auto-filtration (empêche la migration des particules, au sein d'un composant granulaire)
6	Résistance à l'érosion externe (eau, autres agents)
7	Résistance aux agressions externes intrusives (animaux fouisseurs, racines...)
8	Écoulement (laisser passer l'eau)

Figure 42 : Familles de fonctions géotechniques des composants d'un profil en travers type de digue (source IRSTEA)

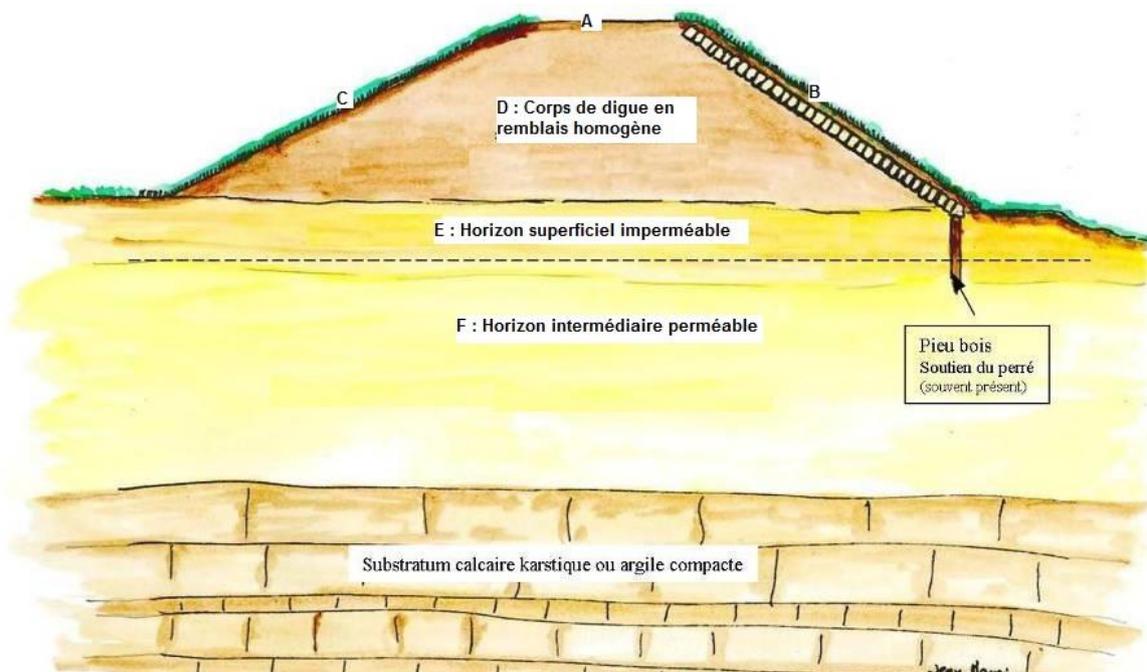


Figure 43 : profil en travers type de la levée de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin non renforcée

Les différents composants géotechnique de ce profil type et leurs fonctions géotechniques respectives ainsi que leurs interfaces sont synthétisés dans le tableau suivant.

Référence	Composant géotechnique	Fonctions géotechniques	Contacts
A	Piste en Crête	6. Résistance à l'érosion externe	Atmosphère ; D
B	Surface enherbée sur perré côté cours d'eau	6. Résistance à l'érosion externe	Cours d'eau ; atmosphère ; D
C	Surface enherbée côté zone protégée	6. Résistance à l'érosion externe	Zone protégée ; atmosphère ; D
D	Corps de digue en remblai homogène	1. Stabilité mécanique d'ensemble 2. Etanchéité 5. Auto-filtration	A ; B ; C ; E
E	Horizon superficiel imperméable	1. Stabilité mécanique d'ensemble 2. Etanchéité 5. Auto-filtration	Cours d'eau ; zone protégée ; atmosphère ; D ; F
F	Horizon intermédiaire perméable	1. Stabilité mécanique d'ensemble 5. Auto-filtration	E ; G
G	Substratum	1. Stabilité mécanique d'ensemble	F

Tableau 8 : Tableau des composants et des fonctions géotechniques du profil en travers type (source IRSTEA)

D'un point de vue géométrique, les levées du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin se caractérisent par :

- Une hauteur moyenne d'environ 2,6m sur l'ensemble des levées de Thareau et de Charrin (hors digue arasée) ;
- Des largeurs moyennes de 18,6m en pied et de 5,7m en crête;
- Une pente de talus côté Loire de 23° en moyenne ;
- Une pente de talus côté Val de 22° en moyenne.

NOTA : le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin ne fait pas partie des vals ayant fait l'objet de travaux de renforcement menés à partir des années 1960, à la suite notamment des recommandations faites par le bureau d'études NEDECO.

3.1.8 Anomalies constatées dans le système d'endiguement

Les désordres présentés ci-après sont issus des Visites Techniques Approfondies (VTA) effectuées en août 2014.

L'ensemble de ces désordres est enregistré par le gestionnaire dans une base de données (cf. 4.2.6).

Le lecteur est invité à se reporter au rapport de la VTA 2014 fourni en annexe 4 pour un aperçu plus détaillé des différentes anomalies recensées au sein du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

3.1.8.1 Canalisations incluses dans les levées

❖ Canalisations

Les indices relevés sur le terrain ne permettent pas d'établir la présence de canalisations à travers la digue. Il est notamment identifié des tampons au niveau du secteur habité sur la section n°2, ainsi que des canalisations traversant la digue sous le bâtiment de la station de pompage (section n°5).

Bien que leur cheminement dans la digue ne soit pas connu, ces canalisations constituent des discontinuités susceptibles de favoriser le risque d'érosion interne par circulation de l'eau à l'interface ouvrage/sol en cas de crue.



Tampon témoignant la présence de canalisation à proximité des habitations (section n°2)



Canalisations sous bâtiment de la station de pompage (section n°5)

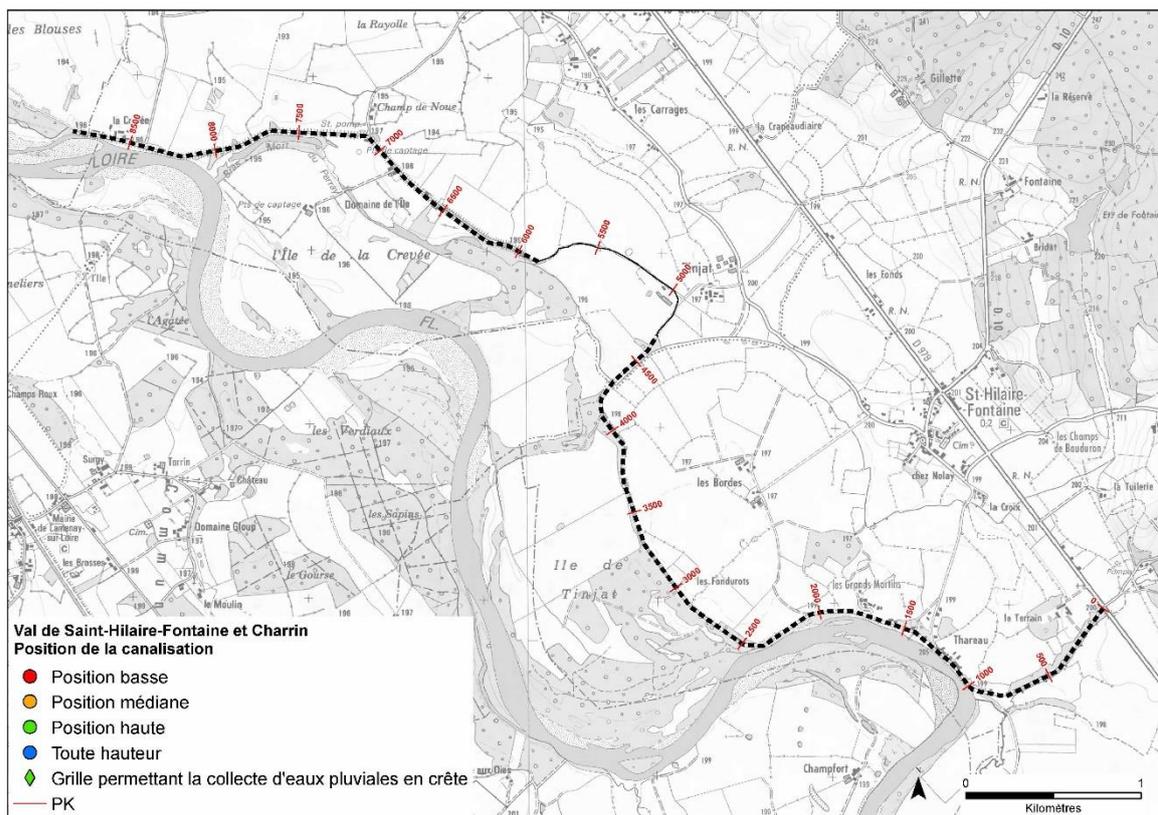


Figure 44 : Localisation et position des canalisations dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

3.1.8.2 Ouvrages et bâtiments encastrés dans les levées

Lors des VTA il a été identifié 21 bâtiments encastrés dans la digue qui ont été identifiés, notamment à chaque traversée de zones d'habitations :

- Thareau et les Grand Martins – section n°2,
- Domaine de l'Ile – section n°5.

Il ressort également quelques habitations isolées et encastrés dans la digue, ainsi que le bâtiment de traitement d'eau potable (section n°5) encastré sur toute la hauteur de la digue.

La présence de bâtiments encastrés dans la digue constitue une problématique vis-à-vis de l'érosion interne par le raccourcissement du chemin hydraulique qu'ils induisent.

Des bâtiments non encastrés, en pied de digue ont également été observés, ils peuvent également augmenter le risque d'érosion interne en diminuant la longueur des chemins hydrauliques dans la fondation de la digue. Par ailleurs, toutes ces habitations sont très vulnérables à la submersion en cas de crue.



Maison encastrée sur talus côté val à Thareau (section n°2)



Maison encastrée sur talus côté Loire (section n°4)



Bâtiment de la station de traitement AEP vue depuis le pied de talus côté val (section n°5)



Vue de l'accès sous le vide sanitaire de la station de traitement AEP côté talus rive (section n°5)



Vide sanitaire sous bâtiment de la station de traitement AEP avec renforcement des fondations en parement maçonné (section n°5)

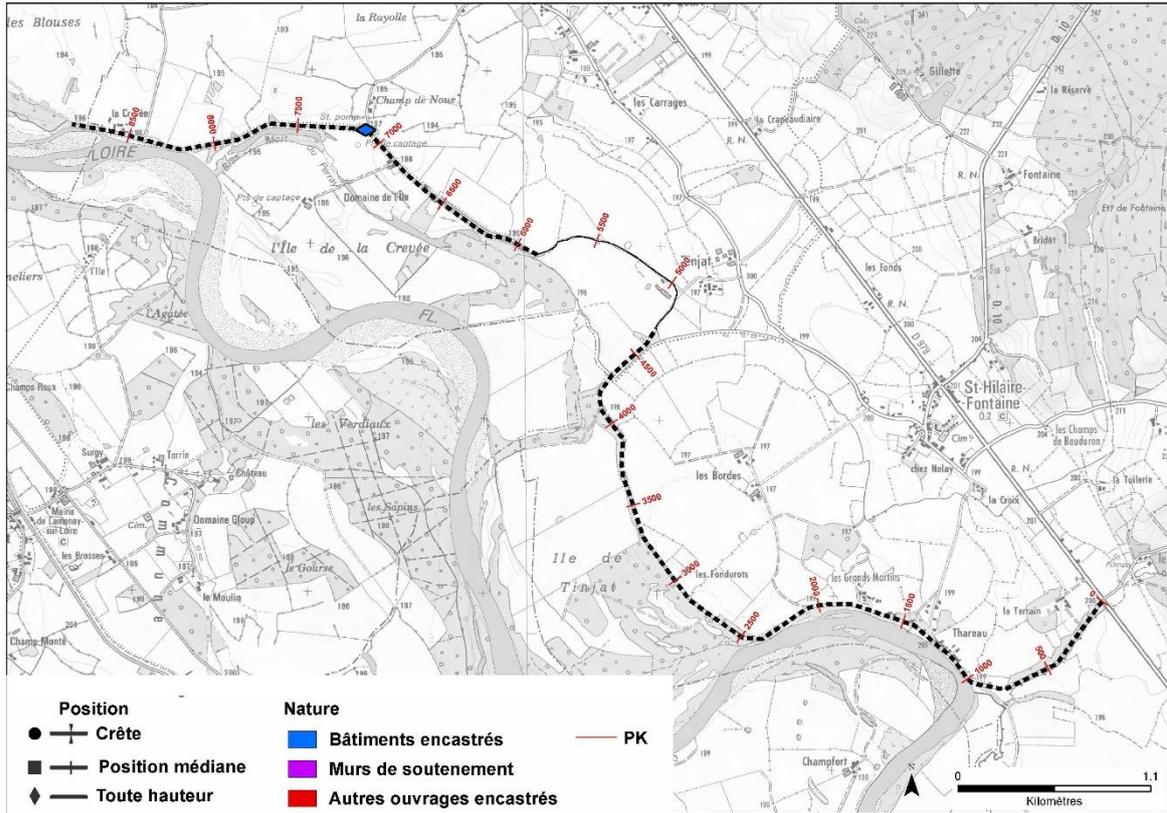


Figure 45 : localisation et typologie des ouvrages encastrés dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin en crête et sur le talus côté Loire

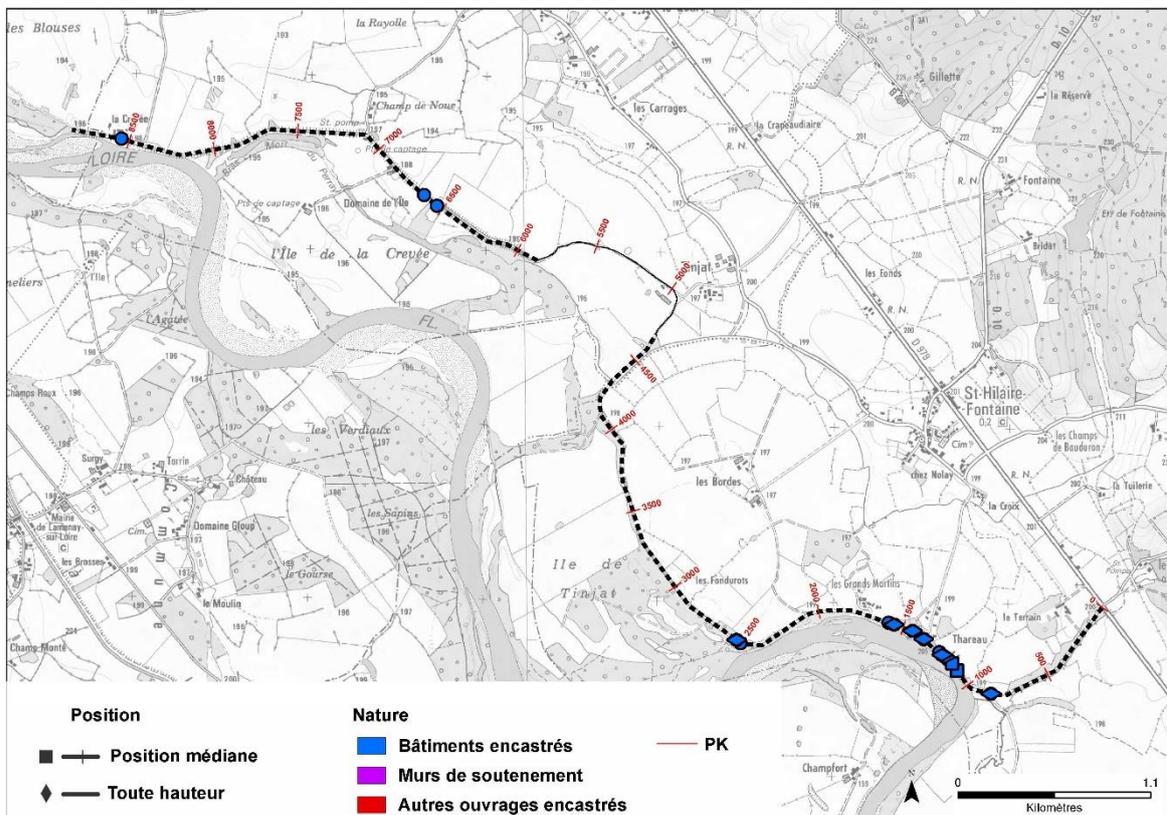


Figure 46 : localisation et typologie des ouvrages encastrés dans le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin sur le talus côté val

3.1.8.3 Végétation sur et aux abords des levées

La présence de végétation herbacée sur une levée constitue un élément de préservation de celle-ci au regard du risque d'érosion externe, que ce soit sur le talus côté fleuve, en évitant l'entraînement des matériaux par le courant, ou côté val, en autorisant une surverse de quelques centimètres sans dommage, ou encore en limitant l'érosion liée aux précipitations (ravinement).

La présence de végétation ligneuse sur la levée ou à sa proximité immédiate constitue en revanche une menace pour sa pérennité.

Vis-à-vis du risque d'érosion interne. Les racines se propagent à l'intérieur de la levée ou dans sa fondation et peuvent être à l'origine d'une érosion de contact. En pourrissant, elles laissent une ramification de conduits susceptibles de permettre à l'eau de pénétrer dans l'ouvrage, voire même de le traverser, formant ainsi une amorce de renard hydraulique [Irstea - Thèse Caroline Zanetti 2012]. La végétation « morte » (souches) représente de ce fait un risque particulier. De plus, la végétation dense constitue un refuge pour les animaux fouisseurs qui construisent leurs terriers dans la digue, augmentant encore le risque de rupture (cf. infra).

Vis-à-vis du risque d'érosion externe ou de rupture suite à surverse. Les arbres de grande taille peuvent être déracinés et entraîner, autour des racines, une partie de la digue. Si l'événement se produit côté Loire, le trou ainsi formé, outre l'enlèvement de matériaux et la mise à nu du corps de digue (disparition du perré), perturbera les écoulements de l'eau en crue et favorisera l'érosion externe. Plus généralement, la présence d'arbres côté val ou ôté Loire induit un obstacle à l'écoulement générateur de perturbations augmentant localement les vitesses et favorisant ainsi l'arrachage des matériaux constitutifs de la digue

La végétation a été relevée sur l'ouvrage et jusqu'à 5 m des deux pieds de digue, dans le cadre des VTA. Six types de végétation sont distingués, par ordre décroissant d'importance vis-à-vis du risque d'érosion interne : souches, végétation ligneuse généralisée, végétation ligneuse clairsemée, arbre arraché, arbre (végétation ligneuse isolée) et végétation arbustive / broussaille.

L'analyse a montré une présence abondante de végétation ligneuse sur ou à proximité immédiate de la levée sur la quasi-totalité de son linéaire (végétation généralisée pour la plupart). Cette végétation se rencontre à la fois sur les talus et pieds de digue, aussi bien côté Loire que côté val y compris en crête (1000m sur section n°3 et partie aval de la section n°5).

La prise en compte de la végétation dans la modélisation des aléas de rupture est détaillée dans les annexes C et D.

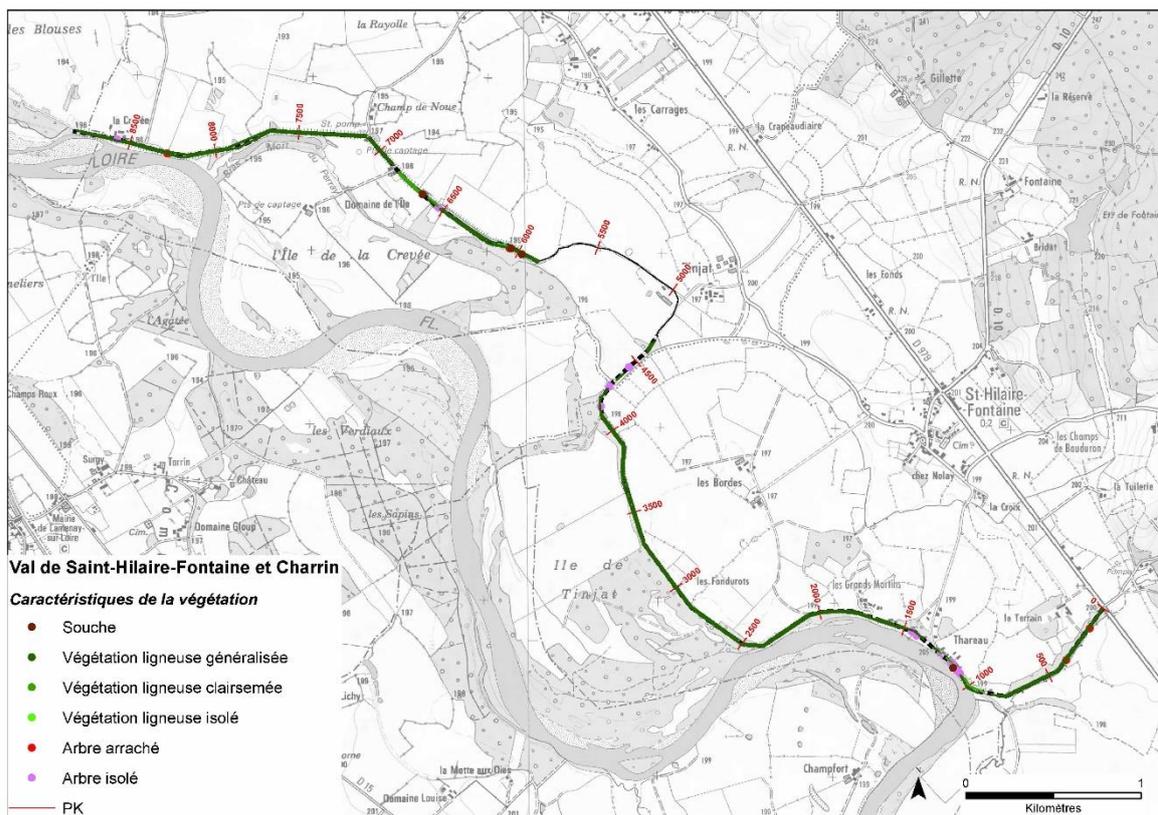


Figure 47 : Localisation et caractérisation de la végétation ligneuse présente sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

3.1.8.4 Présence d'animaux fouisseurs dans les levées

Les animaux fouisseurs représentent un risque pour la pérennité de la levée. En creusant leurs terriers, ils réalisent des conduits dans son corps ou dans sa fondation qui, lorsqu'ils sont mis en eau en période de crue, sont susceptibles de se transformer en renards hydrauliques, soit par prolongement de faiblesse d'étanchéité de la levée, soit parce que le terrier est traversant (cf. retour d'expérience présenté au chapitre 7).

De nombreux terriers ont été observés sur les levées du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (une dizaine), particulièrement au droit des sections n°3 et n°5. La plupart d'entre eux sont de diamètre inférieur à 5cm et quelques-uns sont supérieurs à 15cm (vus à la section n°3).

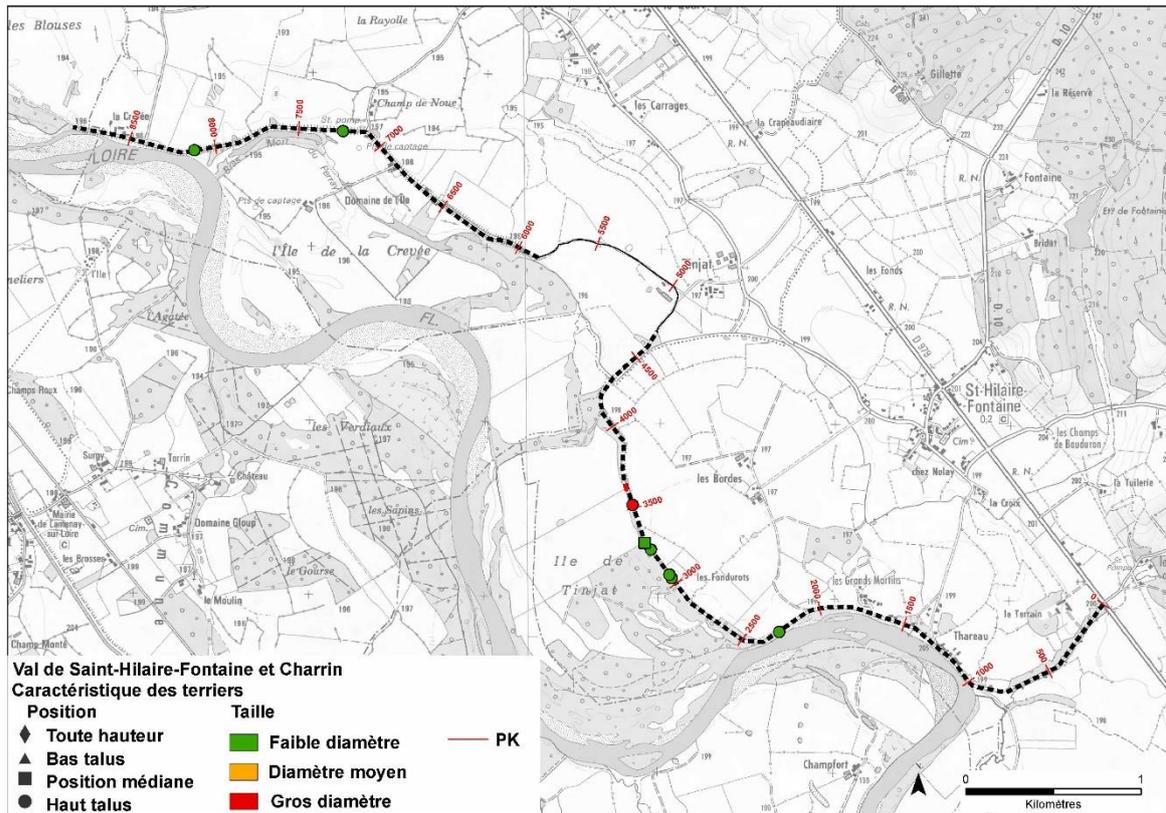


Figure 48 : Localisation, position et dimension des terriers identifiés sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

3.1.8.5 Autres désordres et points particuliers observés

Afin de compléter les anomalies citées précédemment, il apparaît important également de noter sur ces levées les désordres et/ou points particuliers suivants :

Dégradations de surface sur corps de digue (ornières)

Des ornières ont été visualisées en crête de la digue notamment en amont de la section n°4.



Ornière sur la crête vue vers l'aval

Nota : Ces dégradations superficielles sont le signe d'agressions répétées qui participent à la dégradation de la digue et peuvent constituer un facteur aggravant à la surverse côté val ou à l'érosion externe côté Loire.

Mouvements de terre (glissements)

Il a été identifié 3 **glissements** dont un présente une vulnérabilité forte en contact avec le lit vif de la Loire (section n°5). Sur ce dernier glissement le bas du talus est désormais vertical.



glissement superficiel sur le haut du talus côté val (section n°1)



glissement au niveau du bas de talus côté Loire (section n°5)



glissement important au niveau de la berge de la Loire (section n°5)



glissement important au niveau de la berge de la Loire (section n°5) avec bas de talus verticalisé vu vers l'aval

Au niveau du glissement le plus important, il est rappelé ici que la circulation en crête fait l'objet d'une interdiction par arrêté préfectoral en date du 18 août 2014.

Nota : Ces zones constituent des points faibles vis-à-vis du risque de rupture et de la formation de brèche dans le corps de la digue. Ils constituent également des facteurs aggravants l'érosion externe en cas de surverse.

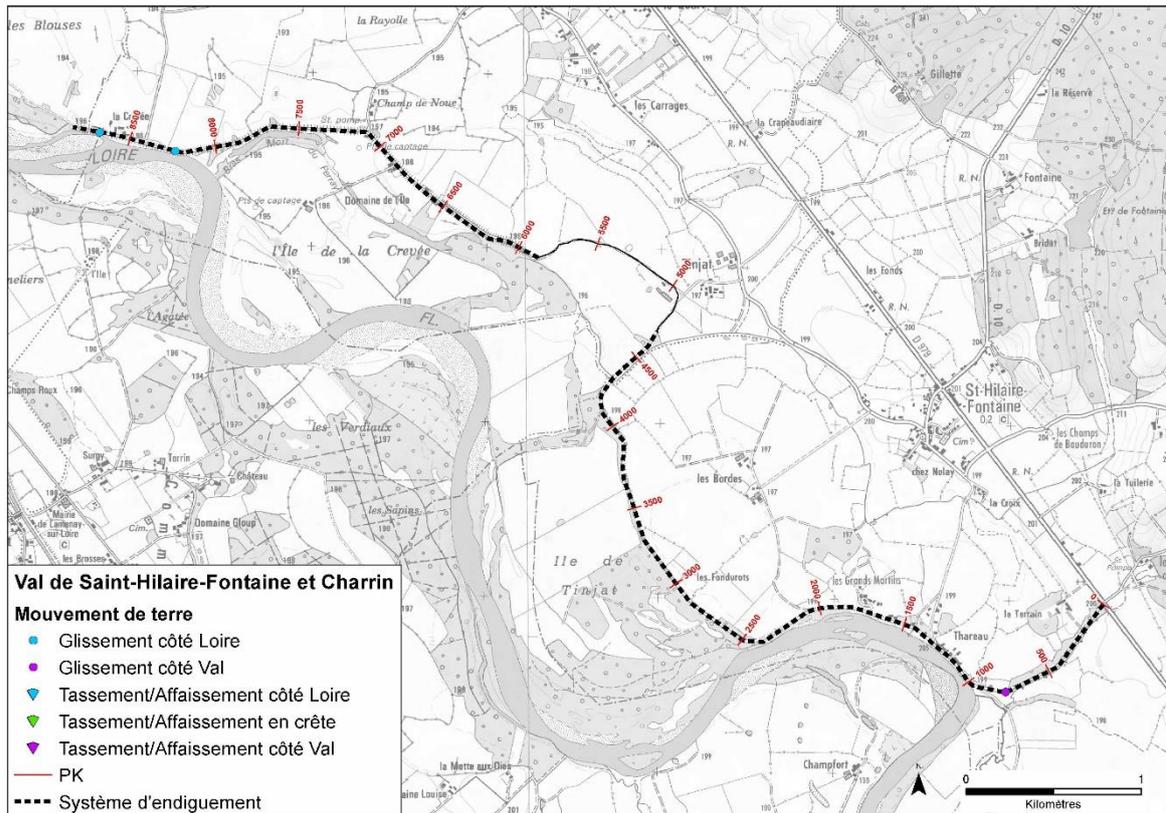


Figure 49 : Localisation des mouvements de terre recensés sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Zones de contact avec le lit vif

Les sections de digue n° 2 et 5 sont pour partie en contact direct avec la Loire. Le linéaire total concerné est d'environ 1500 mètres linéaire sur la section n°2 et 500m sur la section n°5. Certains secteurs en contact avec la Loire ont fait l'objet d'une dépose d'enrochements en protection du pied de digue.

Nota : Un pied de digue en contact vif avec la Loire est directement soumis à l'agressivité du milieu fluvial (vitesse d'écoulement, remous, chocs...). Des phénomènes d'affouillement en pied de digue peuvent notamment accélérer le processus de dégradation et créer des instabilités. Le pied de digue a alors tendance à se dégrader progressivement dans le temps et de manière plus importante lors d'épisode de crue. A terme, cela peut engendrer un risque de rupture par érosion externe. L'évaluation de ce risque et des mesures à mettre en œuvre doit passer par un diagnostic.

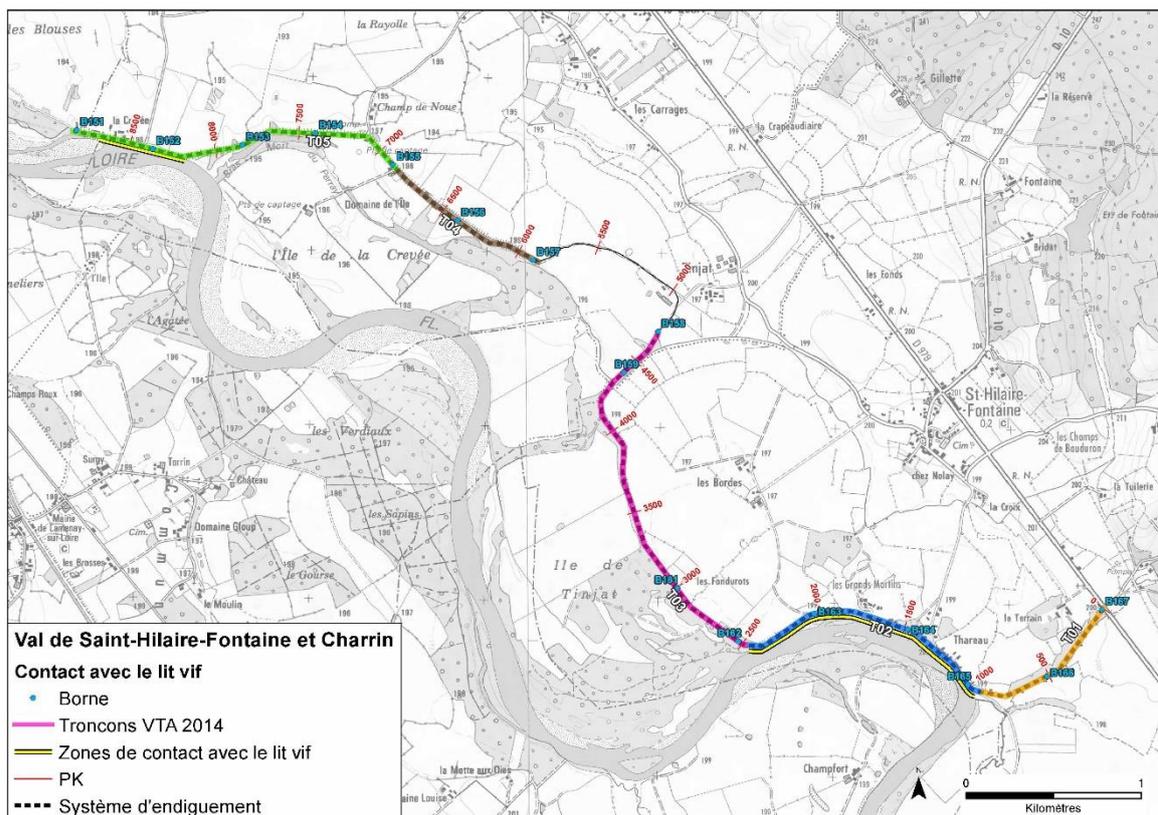


Figure 50 : Localisation des zones de contact entre les levées et le lit vif le long du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Zones humides en pied de digue

En amont de la zone de contact avec le lit vif de la Loire sur la section n°5, il est noté une zone marécageuse en pied de talus côté rivière sur environ 500m de long. Cet étang fait face à 2 petites zones humides au pied du talus côté val.

Nota : la présence de zones en eau à proximité de la digue peut masquer les venues d'eau et également raccourcir le trajet des infiltrations. De plus, les dépressions en eau côté val favorisent la suffusion en permettant aux particules de sortir librement en pied de digue lorsque le gradient hydraulique le permet.

3.2.2 La rive gauche de la Loire

Aucun val ne se trouve face à celui de Saint Hilaire Fontaine. La rive gauche se caractérise par une plateforme naturelle calée à une cote proche de celle des levées composant le système d'endiguement du val. Des enjeux y sont situés, notamment le château de Nogent. On note ensuite la présence du canal latéral à la Loire en remblai qui longe le coteau où l'altitude augmente.

3.2.3 Raccordements amont et aval

Le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin se raccorde en amont au niveau de la route départementale RD.979.

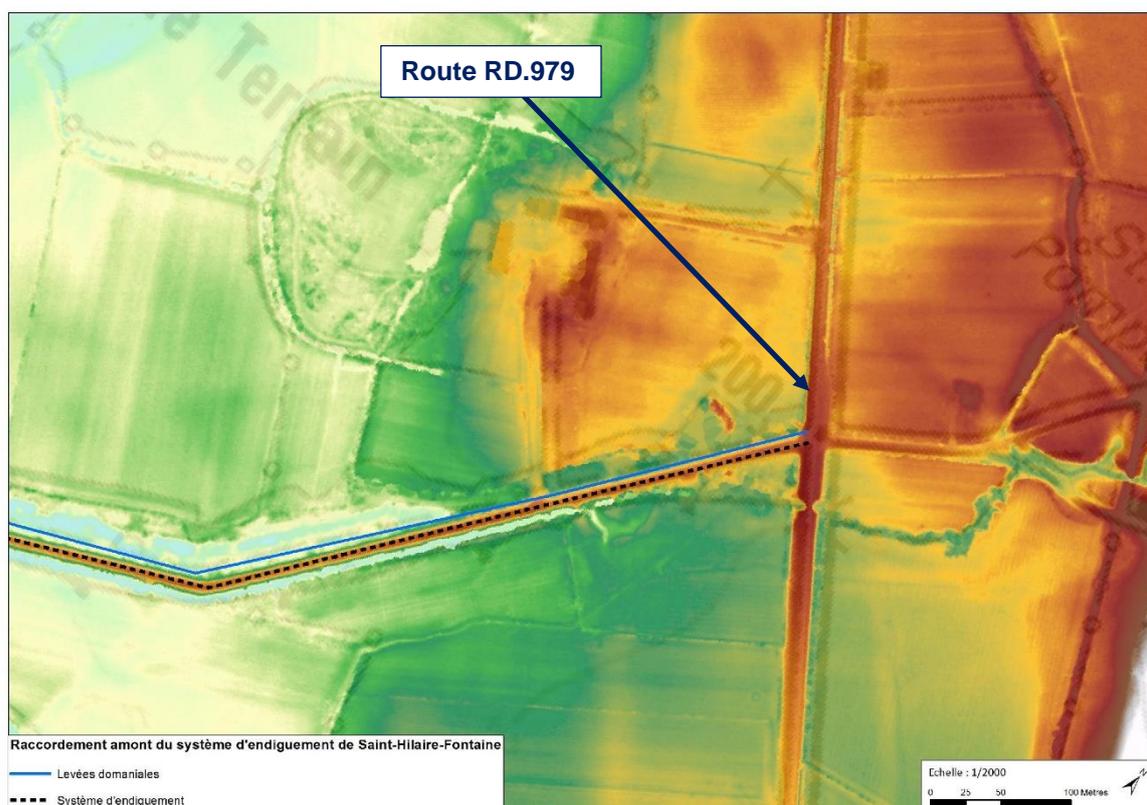


Figure 52 : Extrait du MNT au niveau du raccordement amont du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (levée de Thareau)



Figure 53 : Raccordement amont du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin au niveau de la RD979 vu vers l'aval

A l'extrémité aval, le système d'endiguement s'arrête brutalement.

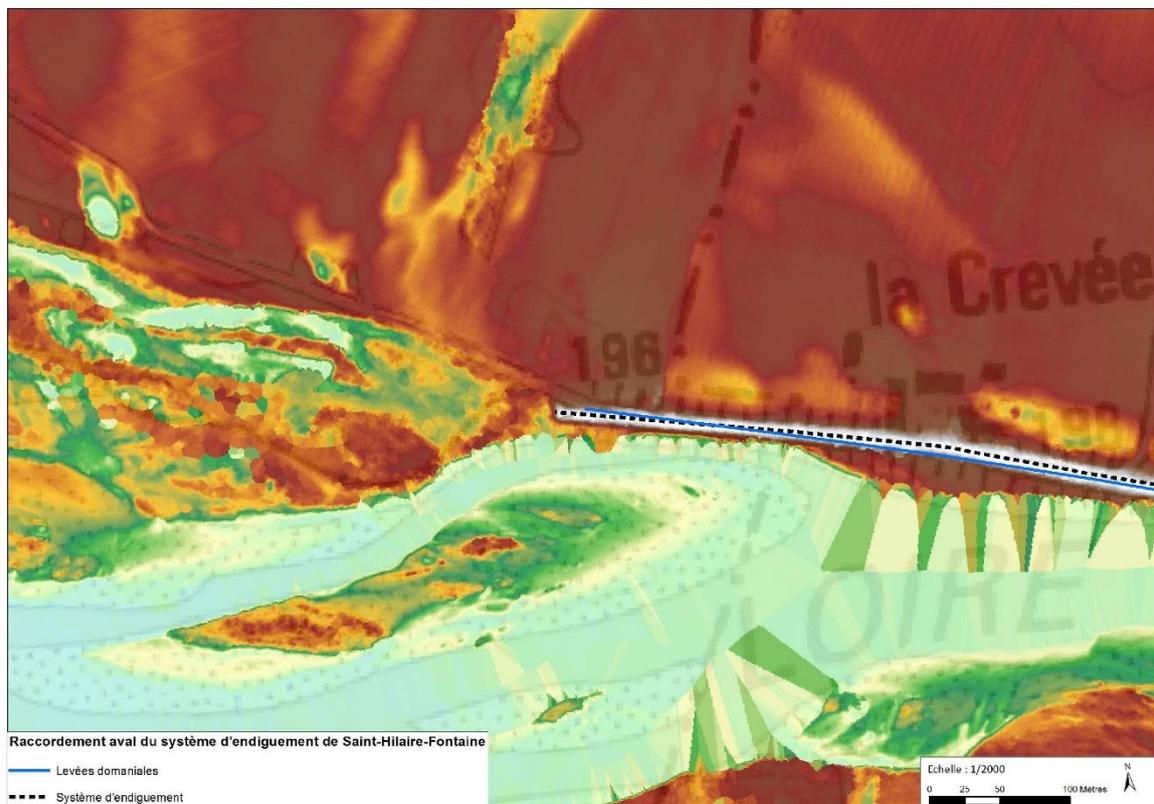


Figure 54 : Extrait du MNT au niveau du raccordement aval du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (levée de Charrin)



Figure 55 : vue vers l'aval du chemin en crête qui descend côté val et de l'arrêt de la levée de Charrin

3.2.4 Inondation du val par remous

L'interruption du système d'endiguement dans la partie centrale et en aval rend vulnérable à une inondation par remous (cf. §3.1.3.3). Comme expliqué dans le chapitre 3.1, le val a été découpé en deux sous-val ayant chacun un niveau de protection apparent différent. Ainsi, la cartographie du remous se base sur des crues différentes correspondant à ces niveaux de protection.

L'exploitation du modèle hydraulique a permis d'identifier, pour les occurrences de crue correspondant au niveau de protection apparent des sous-vals de Saint Hilaire et Charrin, les zones du val inondées sans défaillance du système d'endiguement.

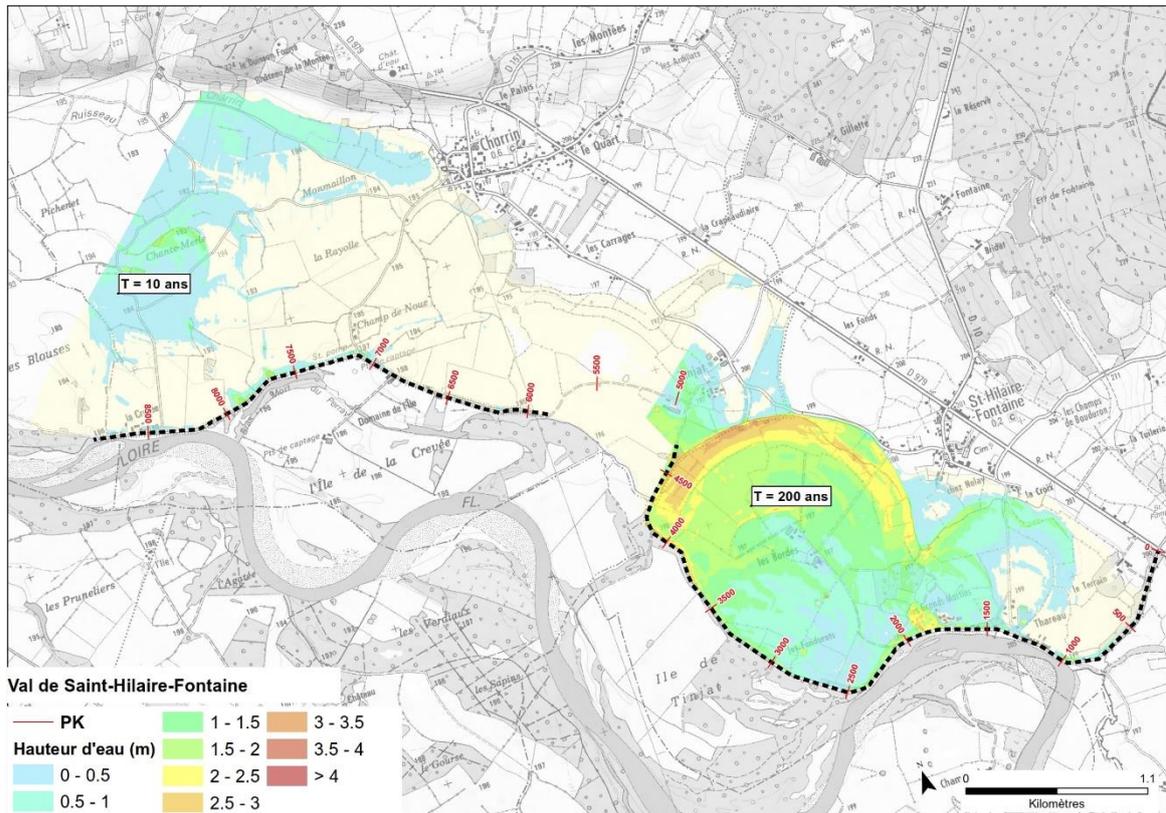


Figure 56 : Hauteurs d'eau du remous pour les crues correspondant aux niveaux de protection apparents du val de Saint Hilaire - Charrin

3.2.5 Affluents et fossés de drainage

Le Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin reçoit en amont les eaux provenant du coteau. Deux branches de ruisseau au thalweg de 4.5 km drainent un bassin de 9.2 km², en incluant l'impluvium dans la zone du val.

Plus en aval le ruisseau du Charrin draine le val et le coteau sur une superficie de 10.5 km. Le cours d'eau rejoint la Loire loin en aval après avoir longé le coteau.

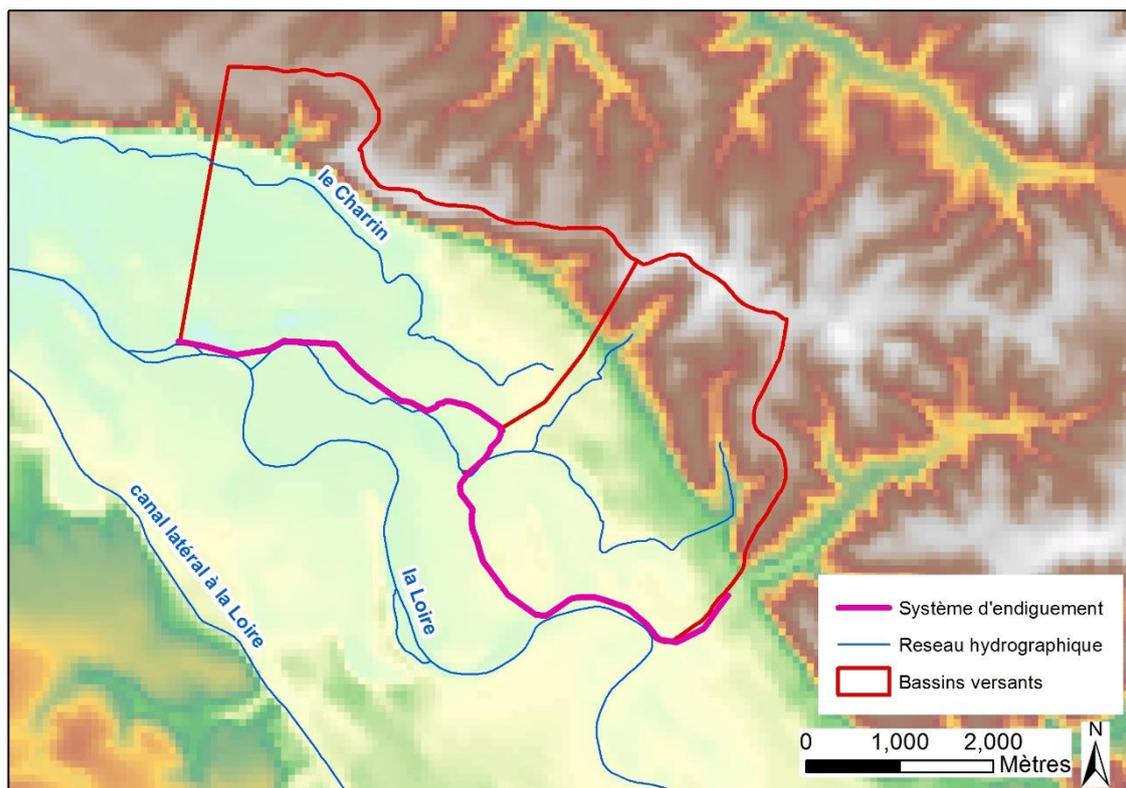


Figure 57 : réseau hydrographique (en bleu) et bassin versant (en rouge) des fossés et affluents s'écoulant par le Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

3.2.6 Remblais dans le val

Aucun ouvrage de ce type n'est à signaler au sein de ce système d'endiguement.

3.2.7 Fonctionnement hydraulique interne du val

Le fonctionnement hydraulique du val en cas de surverse ou de brèche est décrit en détail au chapitre 8 dans le cadre de l'analyse des conséquences des scénarios de défaillance.

3.2.8 La zone protégée par le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Par définition, la zone protégée est la zone pour laquelle le système d'endiguement a une incidence en termes de hauteur d'eau ou de vitesse d'écoulement.

Dans le cas du val de Saint Hilaire, cette zone a été délimitée en croisant les zones d'influence des divers scénarios simulés. La particularité du val est d'être ouvert dans sa partie médiane. Ainsi, pour le niveau de protection apparent du sous-val de Saint Hilaire, la zone protégée du sous-val de Charrin est déjà significativement inondée.

La zone protégée ainsi délimitée est figurée ci-après. Elle représente une superficie de 846 ha. Il résulte du découpage en sous-val justifié par l'ouverture médiane du système d'endiguement:

- ▶ Le sous-val de Saint Hilaire à l'amont d'une superficie de 365 ha (en jaune Figure 58) ;
- ▶ Le sous-val de Charrin à l'aval d'une superficie de 481 ha (en rouge Figure 58).

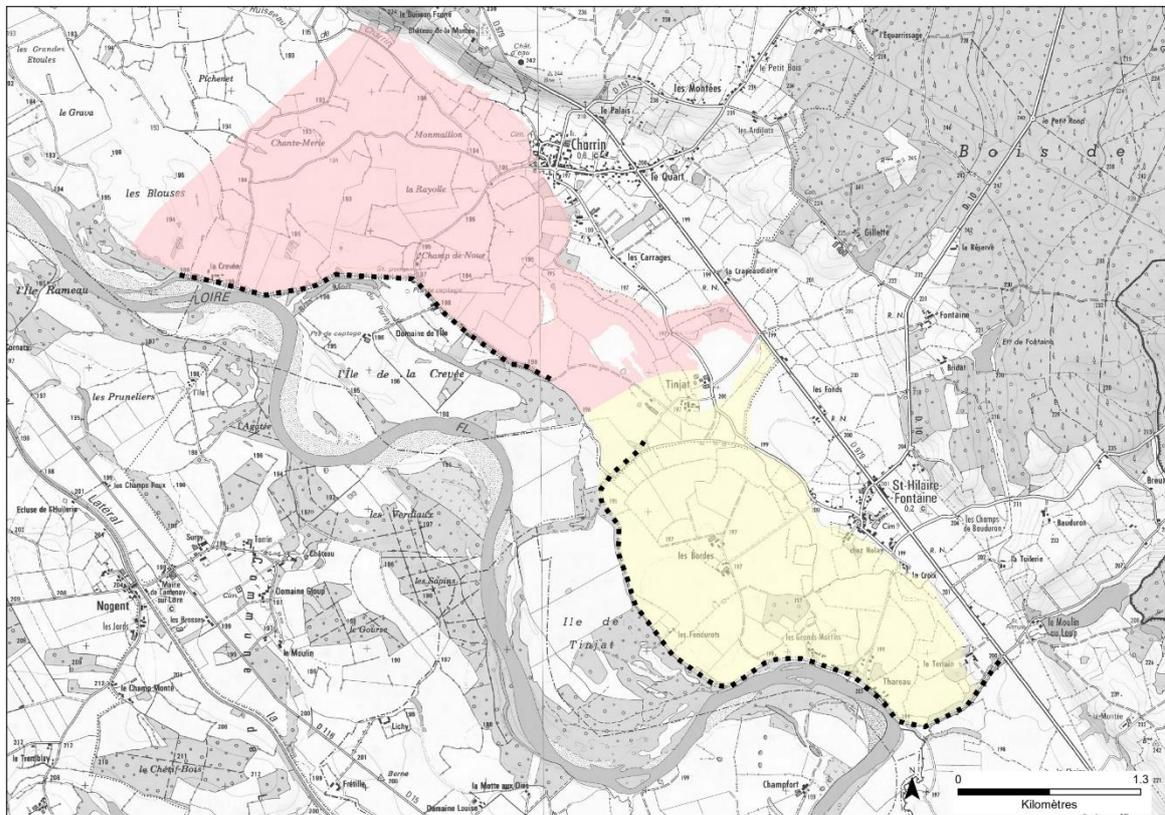


Figure 58 : Zones protégées associées au système d'endiguement de Saint Hilaire et Charrin

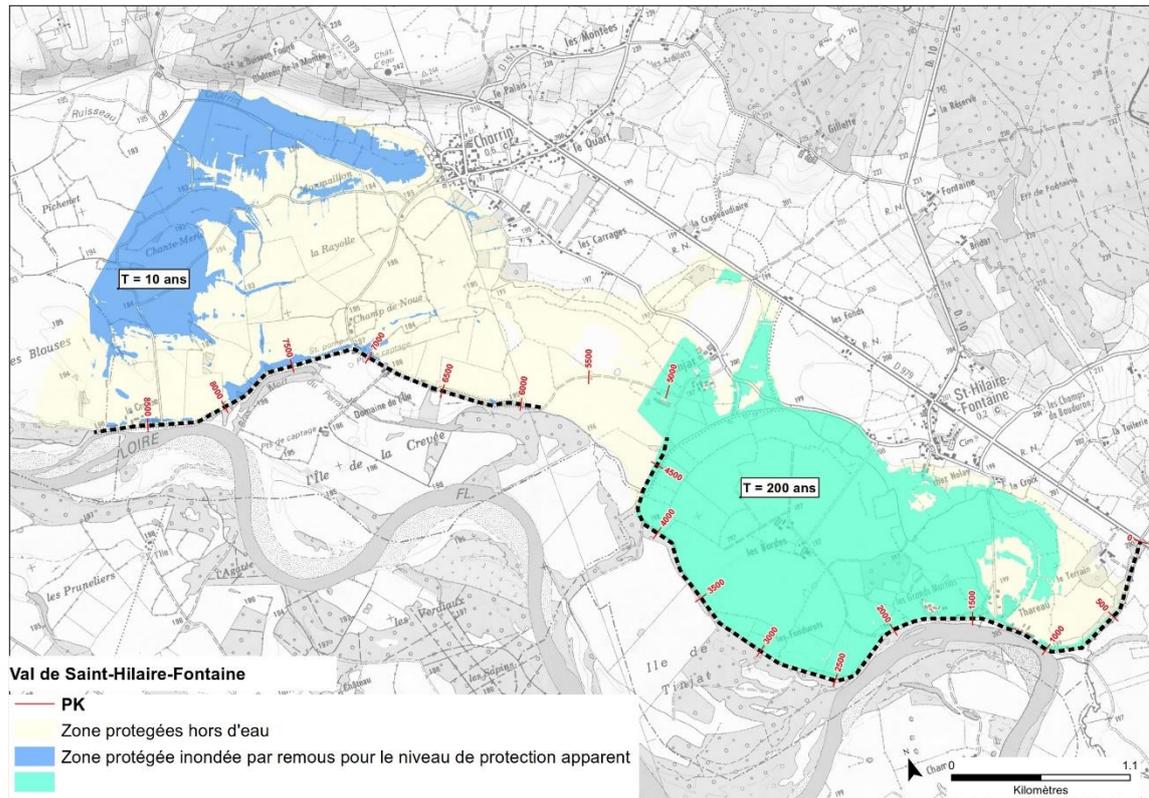


Figure 59 : Proportion de la zone protégée inondée par remous avant surverse

3.2.9 Estimation des enjeux présents dans la zone protégée

3.2.9.1.1 Sources exploitées

La base d'occupation des sols résulte principalement d'une analyse des photos aériennes (orthophotos) enrichie à partir de plans communaux et de bases de données complémentaires (BD Topo, Référentiel Parcellaire Graphique).

Cette base de données a été réalisée à l'échelle du 1/10 000^{ème}.

3.2.9.1.2 Méthode d'analyse

Un croisement sous SIG entre la base d'occupation des sols, l'emprise des secteurs protégés par les digues et des limites de communes a permis d'extraire pour chaque secteur et pour chaque commune, la nature de l'occupation des sols selon 4 classes :

- Espaces urbanisés (et artificialisés)
- Espaces agricoles
- Espace en eau
- Espaces naturels.

3.2.9.1.3 Résultats

La carte ci-après indique l'occupation du sol au sein de la zone protégée précédemment identifiée. Le diagramme associé synthétise la répartition correspondante.



Figure 60 : carte d'occupation du sol

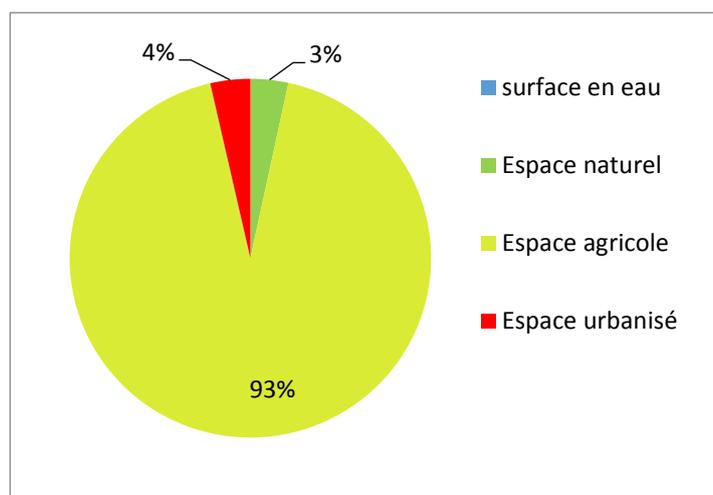


Figure 61 : diagramme de répartition de l'occupation du sol

3.2.9.2 Population

3.2.9.2.1 Sources exploitées

Afin d'obtenir la meilleure précision possible dans l'estimation de la population protégée par les digues, deux données de référence ont été combinées :

- la grille de population INSEE de 200 m de côté ;
- la couche « bâti » de la BD Topo de l'IGN.

Un filtrage des bâtiments de la BD Topo a permis de sélectionner les bâtiments de type habitats, en éliminant ceux présentant une autre vocation (garages, annexes, industrielle, commerciale, publics...).

La population des grilles de population a été affectée à chaque bâtiment au prorata de leur surface développée.

3.2.9.2.2 Méthode d'analyse

Les bâtiments situés derrière les digues sont sélectionnés et leur population sommée.

Les chiffres présentés correspondent à des estimations réalistes de population et non à des comptages précis. Une analyse critique des résultats bruts a été réalisée afin de corriger certains artefacts liés aux effets de bords.

3.2.9.2.3 Résultats

Le tableau ci-dessous récapitule pour chaque commune les surfaces et populations estimées présentes dans la zone protégée.

SHF	surface en eau	Espace naturel	Espace agricole	Espace urbanisé	Total général	population estimée
Charrin	0.0	11.8	449.3	9.7	470.8	16
Devay	0.0	0.9	26.2		27.1	
Lamenay-sur-Loire			0.8		0.8	
Saint-Hilaire-Fontaine	0.0	14.6	276.0	19.2	309.8	20
Total général	0.0	27.3	752.3	28.9	808.5	36

Tableau 9 : Surfaces en hectares et population estimée par commune dans le val de Saint Hilaire Charrin

Il est important de signaler que :

- ▶ 8 personnes sont situées dans la zone de remous du sous-val de Saint Hilaire, c'est-à-dire qu'elles seront vraisemblablement inondées avant atteinte du niveau de protection apparent (pour T=200 ans), et ce même en l'absence de défaillance du système d'endiguement.
- ▶ Aucune personne n'est située dans la zone de remous du sous-val de Charrin, correspondant au niveau de protection apparent (pour T=10 ans).

3.2.9.3 Équipements publics

3.2.9.3.1 Sources exploitées

Les équipements publics ont été identifiés principalement à partir de l'exploitation des Points d'Activité ou d'Intérêt (PAI) de la BD Topo, et de la photointerprétation.

3.2.9.3.2 Résultats

Aucun enjeux sensible ou stratégique n'a été inventorié dans le val de Saint Hilaire – Charrin.

3.2.10 Classement des levées du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Comme indiqué précédemment, au titre du décret de 2007, ce système d'endiguement, constitué des levées de Charrin et de Thareau, ont fait l'objet d'un arrêté préfectoral de classement en digue de classe C le 10/09/2009.

Les résultats présentés dans les paragraphes précédents confirme qu'un tel classement est justifié.

4. PRÉSENTATION DE LA POLITIQUE DE PRÉVENTION DES ACCIDENTS MAJEURS ET DU SYSTÈME DE GESTION DE LA SÉCURITÉ

4.1 ORGANISATION DE LA DDT 58

Au sein de la DDT 58, le service en charge de la gestion et de la maîtrise d'ouvrage de la Loire et de ses levées est la subdivision Gestion de la Loire rattaché au « Service Sécurité et Prévention des Risques » (SSPR).

La subdivision est composée :

- ▶ d'un chef de subdivision et de deux adjoints
- ▶ d'un pôle « Etudes » comprenant trois techniciens supérieurs et un dessinateur
- ▶ d'un pôle « administratif » avec deux secrétaires administratifs (gestion du DPF, gestion financière) et 1 adjoint administratif (secrétariat)
- ▶ d'un pôle « entretien » de 9 agents : 6 agents et 2 chefs d'équipes, basés au centre Loire de Saint-Satur dans le Cher (18), et 1 barragiste, sur le barrage des Settons dans le Morvan.

4.2 CONSIGNES ÉCRITES ET MESURES DE SURVEILLANCE

Conformément aux exigences fixées par le décret du 11 décembre 2007 et l'arrêté du 29 février 2008, le gestionnaire a élaboré des consignes écrites qui fixent les dispositions mises en œuvre pour surveiller l'ensemble des systèmes d'endiguement de la Loire dont il a la charge.

Ces consignes écrites décrivent l'organisation :

- des visites de surveillance programmées
- des visites consécutives à des événements particuliers
- des dispositions relatives aux visites techniques approfondies
- du dispositif de surveillance en période de crue (Plan de Surveillance des Levées (PSL))
- du rapport de surveillance annuel

Le plan de surveillance des levées (PSL) a été actualisé en février 2014 afin d'intégrer toutes les nouvelles données apportées par les récentes études. La version de ce document, validée par Le Préfet de la Nièvre, est fournie en annexe B.

4.2.1 Surveillance continue

La surveillance continue est réalisée par le gestionnaire dans le cadre de son activité quotidienne sur le terrain.

La mission principale des agents du pôle « entretien » est d'assurer la surveillance et l'entretien des levées.

Pour assurer la surveillance, deux visites sont programmées chaque année sur l'ensemble des vals. Les périodes de ces campagnes de surveillance ont été déterminées en dehors de la période de fauchage des digues : une visite en janvier/février et une visite en octobre/novembre. Ces deux visites sont formalisées par la tenue d'un registre de surveillance.

Lors de ces deux campagnes spécifiques de surveillance, l'ensemble du linéaire des digues est parcouru avec des points d'arrêt sur les points particuliers qui sont :

- ▶ les désordres relevés lors d'une campagne précédente encore non traités, qui nécessitent la surveillance de leur évolution ;
- ▶ les ouvrages hydrauliques : constat des dysfonctionnements éventuels ;
- ▶ des points de faiblesse particuliers (canalisations traversantes par exemple) et déterminés lors des études de dangers notamment ;
- ▶ les nouveaux désordres constatés.

Le registre de surveillance permet de répertorier les désordres (ou indices de désordres) suivant leur gravité :

Gravité du désordre	Niveau d'information	Traitement
1 : faible	- subdivision.	- travaux en régie avec programmation année n+1.
2 : moyenne	- subdivision, - décision collégiale de l'action à mener, régie ou marché, - reporté dans le cadre de travaux de même nature.	- dans le mois suivant ou selon la programmation de l'année, - demande d'études complémentaires, diagnostic...
3 : forte	- chef de subdivision, - prévient le niveau hiérarchique supérieur.	- en urgence - appui d'une cellule experte (CETE,...).

Ce registre peut également être alimenté en dehors des visites périodiques grâce à la présence régulière des agents lors de la réalisation de travaux sur le domaine public fluvial.

Enfin, après chaque campagne de surveillance programmée, le registre de surveillance est remis au technicien gestionnaire de la base de données SIRS Digues et du dossier d'ouvrage qui centralise les informations. Il en est de même pour tout désordre signalé ou relevé hors visite programmée (visites complémentaires...). La base de donnée est ainsi alimentée tout au long de l'année afin d'en retirer des éléments de synthèse cartographiques ou fonctionnels qui permettent de mieux quantifier et programmer les actions à mener sur l'ensemble des vals.

4.2.2 Surveillance périodique

Depuis 2014, la surveillance périodique est réalisée dans le cadre des visites techniques approfondies menées conjointement par la DDT 58 et par un bureau d'études spécialisé, agréé.

4. Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de 77 la sécurité

Conformément aux prescriptions du décret de 2007 et à l'arrêté de classement des systèmes d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, une Visite Technique Approfondie (VTA) doit être réalisée tous les 2 ans pour des ouvrages de classe C (annuellement pour les ouvrages de classe B).

Les rapports de visite doivent contenir à la fois un diagnostic global de l'état des levées et des préconisations d'ordre général sur les actions correctives et préventives à prévoir. Ces rapports doivent être intégrés au dossier d'ouvrage.

Les relevés détaillés des désordres réalisés dans le cadre des VTA, comme de visites de surveillance programmées, doivent faire l'objet d'un tableau de synthèse afin d'être intégrés dans cette base de données par les agents du pôle « entretien ».

Outre la base de données des désordres, la synthèse de ces visites alimentera le rapport de surveillance annuel remis au service de contrôle chaque fin d'année.

Le bilan dressé lors de ces visites intégrera :

- L'état du patrimoine
- L'observation des dégradations locales (terriers d'animaux, affouillements, fissurations, mouvements structurels)
- Le repérage des besoins d'entretien (végétation en cours de développement) et de l'accessibilité du site (chemins et voiries)
- La vérification de l'état des passages batardables et des dispositifs de fermeture (ouvrages vannés)

4.2.3 Surveillance en crue

La surveillance en période de crue des levées domaniales de la Loire à la charge du gestionnaire est organisée et décrite dans le plan de surveillance des levées (PSL version de février 2014). Ce document est élaboré à l'échelle départementale pour l'ensemble des vals dont la DDT 58 a la charge et ayant été retenus comme devant être surveillés (notamment en fonction du niveau de risque estimé jusqu'à présent).

L'objectif principal de la surveillance des levées en période de crue est de détecter au plus tôt tout désordre lié à la mise en charge de la levée et susceptible de conduire à sa ruine, d'en suivre son évolution et d'engager, le cas échéant, les actions d'urgence nécessaires (voir §4.3).

L'autre objectif de cette surveillance est de pouvoir déclencher, si besoin, une évacuation de la zone protégée en fonction des désordres détectés. **La Préfecture de la Nièvre a proposé le seuil de 5,2m à la station hydrométrique de Decize pour faire évacuer le val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (soit au-dessus du pic de crue de décembre 2003).**

4.2.3.1 Gradation de la surveillance

Le PSL distingue trois seuils différents :

- Un premier niveau (N1 - niveau 1) avec une charge de 50cm d'eau sur la levée, correspondant au début de surveillance de jour 7 jours/7 (y compris durant le week-end et les jours fériés),

- Un second niveau de surveillance (N2 - niveau 2) avec une charge de 2,0m d'eau sur la levée, correspondant à une surveillance jour et nuit (24h/24) sur des points particuliers identifiés, tous les jours y compris week-end et jours fériés,
- Un dernier niveau correspondant à l'arrêt de la surveillance (AS) du moment où la Loire atteint le niveau de sûreté au droit des ouvrages.

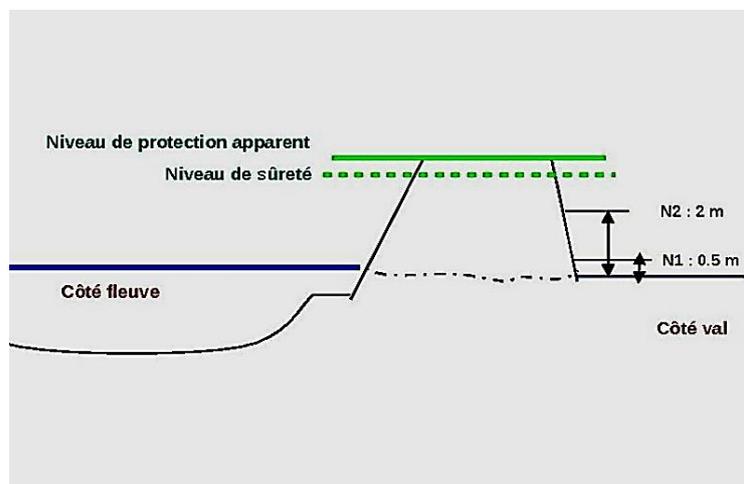


Figure 62 : schéma des niveaux de surveillance en fonction des niveaux d'eau en cas de crue de la Loire (source : DDT de la Nièvre)

Le niveau de surveillance en crue évolue en fonction de l'ampleur de la crue observée et/ou prévue par le Service de Prévision des Crues concerné (SPC Loire-Cher-Indre, hébergé à la DREAL Centre-Val de Loire) selon le protocole suivant :

- La coordination du Plan de Surveillance des Levées (PSL) est déclenchée du moment que la vigilance hydrologique jaune est émise par le SPC sur l'un des tronçons hydrologiques concernés (Loire Nivernaise et/ou Loire Giennoise). Une confirmation doit être demandée au RDI pour valider le déclenchement du PSL, la mise en astreinte de sécurité est validée par la direction (sous forme de décision avec copie au secrétariat général) ;
- Définition des seuils au droit de la station hydrométrique SPC de Gilly (71) par anticipation de la propagation de la crue de la Loire (37mk linéaire – temps estimé entre 12 à 17h) :

Station de GILLY	Niveau 1 (N1) – charge 0,5m	Niveau 2 (N2) – charge 2,0m	Arrêt surveillance (AS) revanche 1m	Observations
Levée de Thareau (val de Saint-Hilaire-Fontaine)	4,30m	Pas de N2	7,30m	
Levée de Charrin (val de Charrin)	4,70m	Pas de N2	7,30m	

4. Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de 79 la sécurité

- Equivalence des seuils pour une crue de la Loire au droit de la station hydrométrique SPC de Decize (58), située à environ 13km en aval du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (temps de propagation de la crue entre ces 2 vals et Decize estimé entre 6 et 8h) :

Station de DECIZE	Niveau 1 (N1) – charge 0,5m	Niveau 2 (N2) – charge 2,0m	Arrêt surveillance (AS) revanche 1m	Observations
Levée de Thareau (val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin)	3,70m soit 1000m ³ /s (période de retour < 2ans)	Pas de N2	5,20m	A 5,2m une grande partie du val est inondée par remous sauf le secteur amont derrière la digue (isolé)
Levée de Charrin (val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin)	4,00m soit 1200m ³ /s (période de retour < 5ans)	Pas de N2	5,20m	A 5,2m tout le val est pratiquement inondée

Il est noté que la charge de 2,0m est atteinte pour :

- ▶ Levée de Thareau : Loire à 5,20m à Decize, soit crue de 2000m³/s (période de retour supérieure à 20 ans) ;
- ▶ Levée de Charrin : Loire à 5,50m à Decize, soit crue de 2400m³/s (période de retour supérieure à 50 ans) ;

La crue de mai 2013 a permis de valider ou corriger les valeurs théoriques, notamment pour tenir compte du niveau réel d'atteinte des pieds de levées.

Le tableau ci-dessous reprend les hauteurs d'eau mesurées aux stations du Service de Prévision des Crues sur le tronçon de la Loire Nivernaise pour les 3 principales crues des années 2000 :

	Station SPC Decize (58)	Station SPC de Gilly (71)	Station SPC de Digoïn (71)
Crue de mai 2001	4,47m	5,4m	3,84m
Crue de décembre 2003	5,17m	6,88m	4,88m
Crue de novembre 2008	5,04m	6,69m	4,95m

4.2.3.2 Formation des personnels mobilisés

FORMATION POUR LA COORDINATION

Chaque membre de la coordination, dont l'aptitude a été validée par le médecin de prévention, reçoit une formation initiale de 2 jours pour être en mesure d'assurer la mise en œuvre du PSL. S'étalant sur 2 jours, elle comprend une demi-journée de formation théorique et une journée et demi de formation pratique.

Chaque membre de la coordination réalise une formation complémentaire annuelle basée sur un exercice d'une journée.

Enfin, lors de la prise de fonction d'un agent sur un poste fléché coordination, après avoir été déclaré apte par le médecin du travail, cet agent reçoit une formation initiale.

FORMATION POUR LA SURVEILLANCE

Chaque membre de la surveillance, dont l'aptitude a été validée par le médecin de prévention, reçoit une formation initiale de 2 jours pour être en mesure de surveiller une digue. S'étalant sur 2 jours, elle comprend une demi-journée de formation théorique et une journée et demi de formation pratique.

Chaque membre de la surveillance réalise une formation complémentaire annuelle basée sur un rappel théorique et sur une mise en situation (terrain) à travers une journée dédiée (dont une demi-journée sur le terrain).

Enfin, lors de la prise de fonction d'un agent sur un poste fléché surveillance, après avoir été déclaré apte par le médecin du travail, cet agent reçoit une formation initiale. Cette formation sera dispensée au regard du nombre de participants et en fonction des vacances dans le vivier.

D'une manière générale, cette formation permet :

- D'acquérir une bonne connaissance de la levée à surveiller
- De bénéficier d'une formation / information sur les missions à réaliser, comprenant des notions d'hydraulique de base sur le comportement des levées
- Aux équipes de mieux se connaître
- De vérifier la disponibilité et le bon fonctionnement des équipements nécessaires à la surveillance en crue.

4.2.3.3 Organisation des postes et secteurs

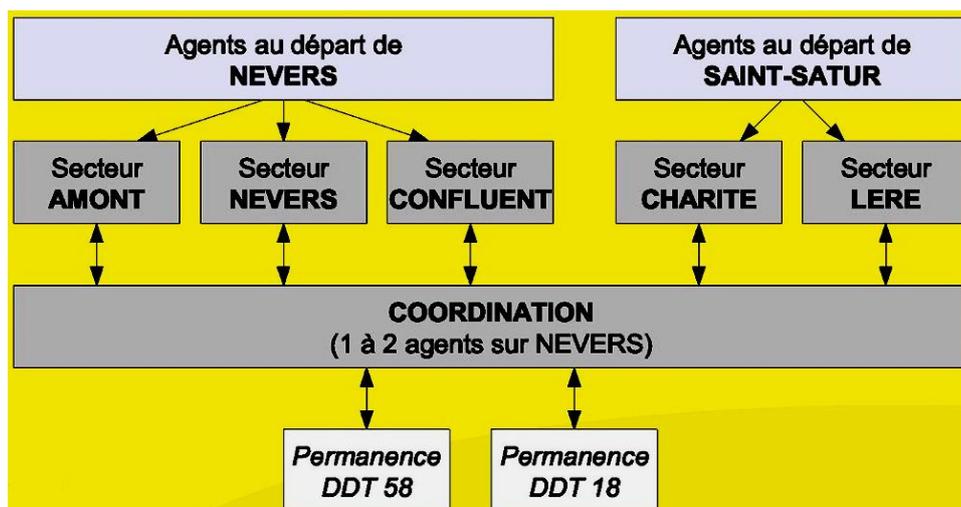


Figure 63 : schéma organisationnel du PSL de la Nièvre (source : DDT de la Nièvre)

ASTREINTE

Les agents intervenants dans le cadre du PSL (coordination et équipes de surveillance) sont placés en astreinte de sécurité.

Les mises en astreinte sont validées par la direction sous la forme d'une décision (préparée par la coordination), dont copie est adressée au secrétariat général et aux chefs de service concernés.

La surveillance et la mission de coordination, effectuées en semaine et aux heures ouvrables, se substituent aux activités normales des agents concernés et ne constituent donc pas des interventions sous astreinte.

LA COORDINATION

A partir des informations fournies par le service de prévision des crues, la coordination propose le déclenchement de la surveillance des tronçons et son arrêt.

Les missions de la coordination sont :

- ▶ organiser et piloter les équipes de surveillance, notamment en charge du respect des garanties minimales des agents (repos quotidien, repos hebdomadaire),
- ▶ informer de la situation les cellules de crise préfectorales de la Nièvre et du Cher (via les astreintes techniques des DDT 58 et 18),
- ▶ assurer enfin la gestion des interventions éventuelles (travaux d'urgence).

En fonction de l'importance de la crue, 1 à 2 agents sont mobilisés, à partir des catégories A et B techniques de la subdivision Loire à Nevers.

La coordination utilise la main courante et indique chacune de ses actions (prévisions, observations, communications, actions, seuils dépassés, ...). La main courante contribue au suivi annuel des événements qui seront reportés dans les rapports d'exploitation et de surveillance des dossiers d'ouvrage.

LES ÉQUIPES DE SURVEILLANCE

Les agents des équipes de surveillance sont affectés par binôme et par secteur. Les levées de la Loire situées dans le Département de la Nièvre sont découpées par affectation au départ des 2 résidences administratives : Nevers et Saint-Satur.

Le val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est rattaché au secteur « amont », avec agents mobilisés au départ de Nevers.

Les agents contribuant à la surveillance des digues seront en priorité issus des corps techniques des différents services composant la DDT, devront être déclarés aptes par le médecin de prévention et auront reçu une formation préalable.

Les équipes de surveillance ont pour mission de :

- ▶ Identifier les désordres : affaissements, glissements, « renard hydrauliques », érosions...
- ▶ Surveiller les points particuliers : points bas, zones de contact avec le fleuve, canalisations traversantes, ...
- ▶ Rendre compte : pour évacuer, pour déclencher des travaux d'urgence

Chaque équipe dispose de supports de référence (fiche « secteur » et registre) pour faciliter, encadrer et sécuriser la surveillance : accès, parking pour le véhicule, circuit de surveillance, point de retournement,... Ces fiches secteurs sont disponibles en annexe B.

4.2.4 Surveillance post-crue

Une visite post-crue est systématiquement organisée dès lors que le niveau de la Loire descend en dessous d'un certain niveau sur l'échelle de Decize. Elle permet :

- D'analyser à froid des désordres occasionnés par la crue et de programmer la remise en état de la levée,
- De relever les indices de mouvement de terrain : côté val les résurgences en pied de talus, les fissures, les bombements, les affaissements, les fontis, etc. et côté fleuve les éventuelles érosions,
- De relever toutes les évolutions morphodynamiques du lit endigué,
- De vérifier l'état des ouvrages hydrauliques,
- De vérifier la stabilité des banquettes ainsi que la praticabilité des levées par des véhicules.

Elle s'effectue dans les mêmes conditions que la visite annuelle, en associant les responsables de poste qui ont été mobilisés pour la surveillance des levées de chaque secteur.

4.2.5 Surveillance exceptionnelle

Une surveillance exceptionnelle sera mise en place en cas de survenance d'un évènement exceptionnel qui pourrait avoir un impact sur la résistance de la levée.

Un tel évènement pourrait être constitué par :

- Une tempête,
- Un séisme,
- Un embâcle de glace,
- Un mouvement de terrain (effondrement karstique par exemple),...

La surveillance consistera en une visite technique approfondie sur la totalité de la levée ou localement si l'évènement n'affecte qu'une partie de celle-ci (cas des mouvement de terrain).

4.2.6 Gestion des retours d'expérience

L'ensemble des désordres observés à l'occasion des visites de routine ou programmées sont intégrés à la base de données afin d'assurer leur traçabilité (typologie, localisation, date, évolution, etc.) et d'en faire une exploitation aisée.

Par ailleurs, qu'il s'agisse d'une crue ou de tout autre évènement exceptionnel, un rapport sur l'évènement est produit. Ce rapport classe l'évènement en EISH (évènement important pour la sécurité hydraulique) conformément à l'arrêté du 21 mai 2010 « définissant l'échelle de gravité des évènements et évolutions concernant un barrage ou une digue ou leur exploitation et mettant en cause ou étant susceptible de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens et précisant les modalités de leur déclaration ». Ce rapport est transmis au Préfet de la Nièvre à sa demande et est intégré au dossier d'ouvrage.

4.2.7 Limites actuelles et perspectives à moyen terme

Le protocole de surveillance à mettre en œuvre par chaque gestionnaire de digue a été fortement renforcé suite à la parution du décret du 11 décembre 2007.

En période normale, cette surveillance, qui se superpose aux missions d'entretien nécessite a minima un maintien en l'état des moyens du gestionnaire.

En crue, la réduction des effectifs du gestionnaire ne permet pas la mise en œuvre complète du plan de surveillance des levées en niveau 2. Une hiérarchisation des levées est envisagée. Une mise en place progressive en fonction :

- Des faiblesses de chaque secteur,
- Des enjeux protégés par chaque levée,
- Des niveaux de protection apparent et des niveaux de sûreté de chaque système d'endiguement

permettra de mieux les surveiller et de pouvoir intervenir plus rapidement et plus efficacement.

La recherche de telles optimisations reste à réaliser et est développé dans le chapitre 9.

4.3 GESTION DES SITUATIONS D'URGENCE

La surveillance mise en œuvre à ce jour par la DDT a principalement un objectif d'information préventive des pouvoirs publics et de la sécurité civile par rapport à une problématique d'évacuation préventive du val en cas de constat d'amorce de défaillance.

La DDT ne dispose pas à ce jour des moyens humains, techniques et financier pour mettre en place un suivi qui permettrait, en cas de dégradation avérée ou d'indice d'initiation de rupture, d'intervenir efficacement sur site pour stopper ou réduire l'ampleur des dégâts.

Néanmoins, il convient de noter qu'une procédure en 5 étapes a été défini dans le cadre du PSL.

OPPORTUNITÉ DES TRAVAUX

Si le désordre constaté menace l'intégrité du système d'endiguement, la coordination doit évaluer l'opportunité d'engager des travaux d'urgence.

Avec l'appui des référents départementaux inondation (RDI) en DDT, les critères suivants sont pris en compte :

- ▶ le temps disponible pour intervenir, par rapport à la cinétique de la crue (arrêt de la surveillance prévue ou non) et/ou du désordre, rapporté au temps de mise en œuvre des travaux (mobilisation de l'entreprise comprise).
- ▶ les enjeux humains exposés et les mesures de sécurité civile en cours (le val est-il évacué, en cours d'évacuation, sans enjeux ?),
- ▶ les enjeux socio-économiques existants (activités, infrastructures, réseaux, etc.),
- ▶ la situation du désordre dans le système d'endiguement (une brèche située à l'amont sera plus dangereuse qu'une brèche située à l'aval),
- ▶ l'inondation du val au droit du désordre (les conséquences d'une brèche au droit d'un secteur non inondé seront plus graves qu'au droit d'un secteur déjà inondé).

FAISABILITÉ ET DESCRIPTION DES TRAVAUX

Le coordonnateur sollicite l'avis de la DREAL Centre-Val de Loire (service de bassin) pour évaluer le danger et envisager les travaux d'urgence et/ou l'évacuation.

Exemple de travaux en fonction du désordre :

- ▶ Érosion externe : déversement de blocs d'enrochement,
- ▶ Érosion interne ou renard hydraulique : création d'un filtre drainant par pose d'un géotextile en lés croisés et lestage par un matériau calcaire (Ø200 mm).

Si des travaux sont envisageables, la coordination avec l'appui de la DREAL Centre-Val de Loire formalise un cahier des charges sommaire de l'intervention : lieu, délai, type de travaux, emprise des travaux, matériaux à mettre en œuvre, etc.

IDENTIFICATION D'UNE ENTREPRISE ET DEMANDES DE DEVIS

La coordination identifie une ou des entreprises en capacité de réaliser les travaux avec l'appui de la permanence de la DDT (utilisation de la base de données PARADES des entreprises de BTP).

La coordination vérifie la disponibilité des entreprises et demande un devis immédiat sur la base du cahier des charges sommaire.

ENGAGEMENT ET SUIVI DES TRAVAUX

La décision de recourir à des travaux d'urgence revient à la direction de la DDT ou, à défaut, au préfet.

La commande doit être formelle et préciser :

- ▶ le lieu, la date et le délai d'intervention ;
- ▶ la nature de l'intervention ;
- ▶ le nom de l'entreprise et son adresse ;
- ▶ faire référence au devis.

Les travaux doivent être suivis par un agent de la subdivision gestion de la Loire.

RÉQUISITION

La réquisition d'une entreprise est possible mais relève d'une décision du préfet.

4.4 PROCÉDURES DE CONNAISSANCE ET D'ÉVALUATION DU RISQUE

4.4.1 Etudes de dangers

La présente étude constitue la première étude de dangers du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin. Elle sera actualisée dans un délai maximal de 10 ans, conformément à la réglementation en vigueur. Elle pourra faire l'objet d'une actualisation anticipée si la situation l'exige, notamment en cas de crue forte ou de séisme important.

4.4.2 Revues de sûreté

Si les éléments apportés par la présente étude de dangers, le classement en tant que digue de classe C du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est validé, la revue de sûreté ne sera pas obligatoire.

4.5 DOSSIER D'OUVRAGE

Le dossier d'ouvrage prévu par le décret du 11 décembre 2007 est constitué et alimenté régulièrement avec l'ensemble des nouvelles données disponibles.

Ce dossier est établi pour chaque levée et regroupe l'ensemble des informations sur les digues dont dispose le gestionnaire :

- Plans
- Etudes
- Travaux réalisés
- Autorisations d'occupation temporaire
- Etc.

Il est disponible et consultable dans les locaux du gestionnaire.

4.6 AVIS DU RESPONSABLE DE L'ÉTUDE DE DANGERS SUR LA POLITIQUE DE PRÉVENTION DES RISQUES LIÉS AU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE ET DE CHARRIN

Pour les niveaux de surveillance, il est proposé de se référer aux prévisions du Service de Prévisions des Crues de la Loire, du Cher et de l'Indre. En cas de crues, il délivre des bulletins quotidiens d'informations à l'échelle de tronçons hydrologiques, eux-mêmes jalonnés de stations de mesures hydrologiques. Ces prévisions permettront ainsi d'améliorer le temps d'anticipation dans la mise en place notamment du PSL.

A travers les résultats de l'étude en cours, il pourra être justifié (ou non) la surveillance en période de crue (du moins en niveau 1) de la partie aval de la levée de Thareau et de la partie amont de la levée de Charrin. Par ailleurs Il est noté que le val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin ne fait pas l'objet d'une surveillance renforcée de niveau 2 (nuit et jour), du fait notamment de l'inondation avancée du val pour une crue de ce type.

Le débroussaillage de la partie aval de la levée Thareau devrait être intégré au programme de débroussaillage annuel.

5. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES POTENTIELS DE DANGERS

Sur le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, les potentiels de dangers résultent principalement de l'entrée d'eau au sein du val. Une telle entrée d'eau peut résulter :

- D'un dysfonctionnement propre à la levée :
 - o Ouverture d'une brèche sur un tronçon de la levée
 - o Mauvais fonctionnement des ouvrages hydrauliques traversants (non fermeture des martelières)
- De problématiques extérieures à la levée :
 - o Remontée de nappe dans le val en arrière des levées
 - o Inondation par les affluents ou ruissellement urbain
 - o Entrée d'eau par un linéaire non endigué
 - o Inondation par remous

5.1 OUVERTURE D'UNE BRÈCHE PARTIELLE OU TOTALE SUR UN TRONÇON DE LA LEVÉE

Toutes choses égales par ailleurs, l'irruption d'eau dans le val à la suite d'une brèche sera d'autant plus puissante que la hauteur d'eau entre la Loire en crue et le val sera importante.

Potentiellement, une telle hauteur peut atteindre voire dépasser légèrement (en cas de surverse) la hauteur de digue, calculée comme étant la différence altimétrique entre la crête de digue et le terrain naturel du val en pied de digue.

Avec une hauteur maximale de plus de 5,3 m et une hauteur moyenne de 2,5 m, l'énergie libérée par une brèche serait très importante.

Les vitesses d'écoulement qui en résulteraient conduiraient à une très forte mobilisation des matériaux constituant la digue ainsi qu'à la formation d'une fosse d'érosion en pied de digue et représenteraient, malgré cette dissipation d'énergie, un pouvoir de destruction important pour les enjeux situés à proximité.

5.2 SURVERSE SANS BRÈCHE AU-DESSUS DE LA CRÊTE D'UN TRONÇON DE LEVÉE

L'irruption d'eau dans le val dans le cadre d'une surverse sans brèche représente un danger assez faible par rapport à la situation précédente.

En effet, les débits susceptibles d'inonder le val sont limités par la hauteur de la lame d'eau déversante et resteraient faibles par rapport au cas envisagé précédemment. En outre, en dehors de son intensité moindre, cette situation n'intervient qu'au-delà du niveau de protection apparent et représente donc de fait un phénomène « naturel » de débordement de la Loire.

Néanmoins, les digues n'étant pas dimensionnées pour résister à la surverse, il est fort probable que cette situation conduise à la formation d'une brèche du fait de l'action érosive des écoulements sur le pied et le talus de digue (sans dispositif de protection, on considère qu'au-delà de 20 cm de surverse, la ruine des levées de la Loire est certaine).

5.3 ENTRÉE D'EAU PAR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES TRAVERSANT LA LEVÉE

Afin de permettre l'évacuation des différents fossés présents dans le val, le système d'endiguement du val de Saint Hilaire et Charrin est traversé par différentes canalisations et ouvrages hydrauliques. Les ouvrages traversant sont décrits au chapitre 3.1.5.3.

En cas de défaut de fermeture des clapets anti-retour, les débits entrant dans le val seraient contraints par les capacités respectives de ces ouvrages et l'inondation liée à leur éventuel dysfonctionnement resterait a priori limitée, que ce soit en termes d'intensité ou d'étendue.

5.4 REMONTÉE DE NAPPE DANS LE VAL EN ARRIÈRE DES LEVÉES

Malgré le caractère transitoire des crues, la nappe d'accompagnement de la Loire subit les évolutions du niveau du fleuve et peut même remonter au-dessus de la surface du terrain naturel. De tels phénomènes peuvent être observés même pour des crues fréquentes (cf. chapitre 7).

De manière générale, ce phénomène est d'autant plus sensible que :

- l'altimétrie du terrain naturel est naturellement proche de celle de la Loire
- la perméabilité du sous-sol est importante
- l'assise peu perméable de la digue est peu épaisse voire absente

En ce qui concerne le système d'endiguement de Saint Hilaire et Charrin, des linéaires sans assise imperméable ont été identifiés aussi bien sur la digue du sous-val amont que sur celle du sous-val aval.

Les phénomènes de remontée de nappe sont relativement lents et ne sont à même que de générer des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement faibles sans commune mesure avec celles rencontrées dans le cas de brèche.

En terme de diagnostic de rupture notamment vis-à-vis du risque de surverse, il est important de noter que la problématique de remontée de nappe peut également être considérée comme un facteur favorable. En effet, en cas de crue de la Loire, la remontée du niveau statique de la nappe alluviale tend à réduire la charge hydraulique s'appliquant sur la digue, et donc à réduire les probabilités d'apparition de rupture par érosion interne. Aussi, sur les profils situés au droit d'une dépression (côté val), il a été considéré les dépressions remplies d'eau jusqu'à la cote du terrain naturel.

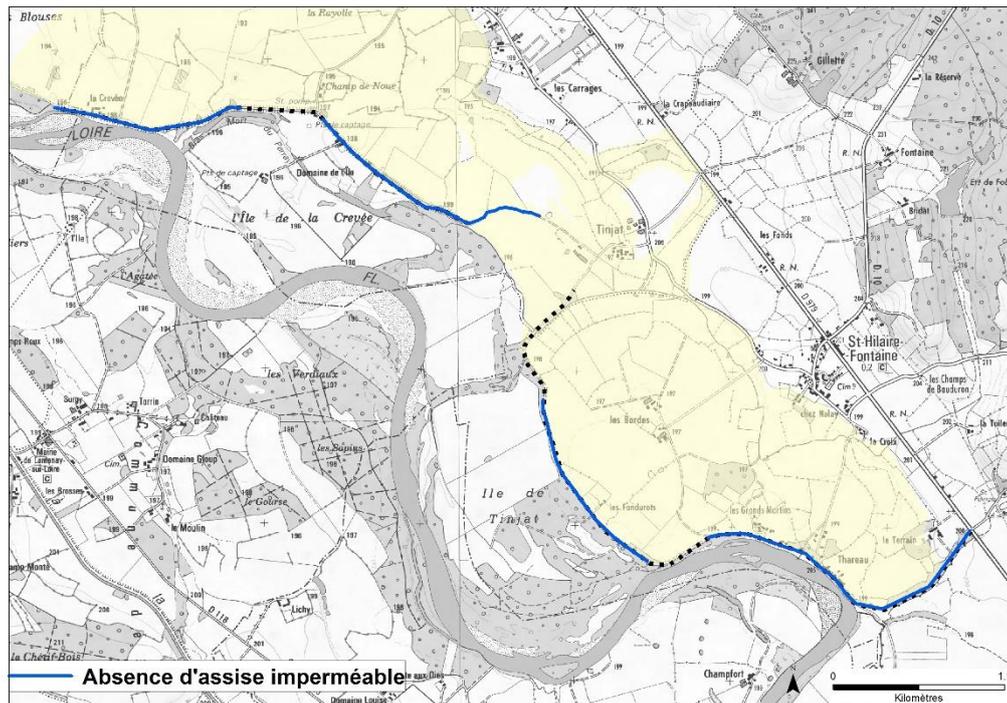


Figure 64 : carte localisant les linéaires sans assise imperméable

5.5 INONDATION PAR LES AFFLUENTS ET RUISSELLEMENT URBAIN

La présence des digues empêche l'évacuation des apports d'eau issus des vals, si ce n'est au travers des ouvrages prévus à cet effet.

Compte tenu des bassins versants drainés, de tels mécanismes d'inondation seraient toutefois beaucoup moins dommageables qu'une inondation directe par la Loire et a fortiori qu'une inondation liée à une rupture accidentelle de la digue.

5.6 ENTRÉE D'EAU PAR LE LINÉAIRE NON ENDIGUÉ

Le val de Saint Hilaire Fontaine et de Charrin a la particularité de comporter un linéaire non endigué dans sa zone centrale. Cette particularité a conduit à considérer dans l'analyse fonctionnelle du chapitre 3 une décomposition en deux sous-vals avec des niveaux de protection distincts.

Ainsi, vis-à-vis du sous-val de Charrin à l'aval, l'entrée d'eau par la zone non endiguée en amont de ce dernier représente un potentiel de danger. L'eau pénètre dans le val à partir de Q10 et un écoulement s'établit à travers le val. Ce mécanisme correspond également à l'inondation par remous du sous-val amont de Saint Hilaire.

5.7 REMOUS PAR LA PARTIE AVAL OUVERTE AU TERRAIN NATUREL

Comme nombre d'autres vals de la Loire, le val de Saint Hilaire et de Charrin est en partie ouvert et est donc soumis au phénomène d'inondation par remous. Les zones touchées par ce phénomène ont été identifiées dans le cadre des chapitre 3 et 8.

6. CARACTÉRISATION DES ALÉAS NATURELS

6.1 HYDROLOGIE : CRUES DE LA LOIRE

6.1.1 Présentation

La Loire, à son entrée en Loire moyenne (bec d'Allier), draine une superficie de 32 000 km² correspondant au sous-bassin de la Loire et à celui de l'Allier.

Son régime hydrographique est marqué par la présence des massifs montagneux du Massif central et du Morvan qui bloquent les masses d'air humides océaniques, ce qui génère, en particulier en hiver et en début de printemps, de forts cumuls de précipitations. Une partie de ces massifs est aussi sous influence du climat méditerranéen, ce qui se traduit, du début de l'automne jusqu'au début de l'hiver ainsi qu'au printemps, par des orages cévenols, épisodes de précipitations très intenses sur un laps de temps très court. Le régime hydrographique, du fait de la faible altitude générale de ces massifs (peu de sommets dépassent les 1 500 m), est en revanche très peu soumis à l'influence nivale.

Ces influences climatiques engendrent différentes formes de crues qui peuvent être identifiées suivant leurs origines météorologiques. Elles peuvent être lentes ou rapides.

6.1.1.1 Les crues « cévenoles »

Ce sont les plus brutales. Elles sont dues aux précipitations qui accompagnent les orages cévenols, nés de la confrontation des masses d'air chaud et d'air froid au-dessus des Cévennes sur les haut bassins de l'Allier et de la Loire, avec parfois des extensions sur le Livradois, le Pilat, les monts du Lyonnais et la partie sud du Morvan. Sans apport océanique, elles s'amortissent en général très rapidement, mais parfois, comme en 1907, si le front orageux remonte à l'intérieur du bassin, les crues acquièrent suffisamment d'importance pour se propager en Loire moyenne.

6.1.1.2 Les crues océaniques

Elles ont lieu essentiellement en hiver et au printemps. Elles sont provoquées par des fronts pluvieux en provenance de l'océan atlantique. D'importance très variable, elles affectent l'ensemble du bassin. Les reliefs, notamment ceux du Morvan, jouent un rôle important dans la répartition des précipitations et de leur cumul.

Parmi les dernières crues marquantes de cette famille, on peut citer les crues du printemps 1983. La Loire à Nevers a atteint en avril un débit de 2 230 m³/s, alors qu'en amont de Roanne son débit était de 1 450 m³/s, et en mai un débit de 2 400 m³/s alors que son débit amont était de 1 570 m³/s.

6.1.1.3 Les crues mixtes

Elles naissent de la superposition, plus ou moins marquée, d'une crue cévenole et d'une crue océanique. Elles se traduisent par une montée généralisée des eaux sur l'ensemble du bassin accompagnée par des débits très importants aussi bien de la Loire, que de l'Allier et de leurs affluents. C'est à ce type de crue qu'appartiennent les crues de 1846, 1856 et 1866.

Un aperçu des principales crues historiques observées sur la Loire moyenne et de leur typologie est fourni au chapitre 7.

6.1.2 Détermination des débits de pointe et des hydrogrammes

6.1.2.1 Données disponibles et méthodes mises en œuvre

Les données hydrologiques de la Loire au niveau du val de Saint Hilaire Fontaine (SHF) proviennent de plusieurs sources :

- des données historiques limnimétriques et de débit aux différentes stations et échelles de crue remontant au milieu du XIX^e siècle ;
- de l'étude globale sur la Loire moyenne (Équipe pluridisciplinaire plan Loire – 2001) qui se base sur un modèle hydraulique 1D à casiers sur l'ensemble de la Loire moyenne de Nevers à Montjean, et définit les hydrogrammes injectés au Bec d'Allier dans le modèle.
- de la démarche EGRIAN sur l'agglomération de NEVERS (Hydratec/Artelia – 2007/2013) et de l'étude de dangers des digues domaniales de classe B de la Loire – Val de Decize (Egis – 2014) qui donnent des débits en aval de la zone d'étude.
- de l'étude hydrologique et hydraulique de la Loire dans l'Allier et la Saône et Loire (ISL – 2014) qui donnent des débits en amont de la zone d'étude.

6.1.2.2 Influence du barrage de Villerest

Le barrage de Villerest, mis en service en 1985 sur la Loire en amont de Roanne, à 175 km en amont du val de SHF, est le seul ouvrage du bassin de la Loire à avoir dans ses fonctions de participer à l'écrêtement des crues. Il s'agit d'un barrage poids arqué en béton. Sa hauteur est de 60 mètres. Le volume total de sa retenue est de 238 millions de mètres cube. La capacité maximale de stockage des eaux pour l'écrêtement, vis-à-vis de ce volume, est de 130 millions de mètres cube.

Si les villes de Roanne et de Nevers en bénéficient directement ainsi que le réseau de petites villes riveraines inscrit dans cet espace, le barrage de Villerest a été conçu pour accroître le niveau de protection en Loire moyenne, en complément du dispositif d'endiguement existant.

Il a une capacité d'écrêtement variable. Lorsque le débit entrant est de 1000 à 2000 m³/s, le débit sortant après écrêtement est de 1000 m³/s. Pour un débit de pointe entrant compris entre 2 000 m³/s et 4 000 m³/s, le débit sortant après écrêtement est de moitié au pied du barrage à Roanne. Au-delà, il écrête 2 000 m³/s dans des conditions idéales de prévision et de contexte.

Lors de crues exceptionnelles, l'ouvrage peut diminuer le débit à l'entrée de la Loire moyenne (Bec d'Allier) jusqu'à 1 000 m³/s dans les configurations les plus favorables, et de l'ordre de 500 m³/s à 700 m³/s pour des événements similaires à ceux du XIX^e siècle.

Bien que la cote du déversoir de sécurité ait été fixée à 324 mNGF, l'exploitant n'a jamais été autorisé à dépasser la cote de 317,30 mNGF depuis sa mise en service.

6.1.2.3 Crues moyennes à extrêmes : débits de pointe et hydrogrammes des crues caractéristiques

Pour les crues moyennes à rares, le maximum des valeurs retenues pour l'étude de dangers de Decize et des valeurs ISL écrêtées a été retenu.

Les hypothèses de débit de crue ainsi définies sont synthétisées dans le tableau suivant (en italiques : valeurs extrapolées à partir des informations disponibles à Villerest et Nevers). Le corps des hydrogrammes pourra quant à lui être repris de ceux du modèle LM10 sur la branche Loire:

Période de retour	50 ans	70 ans	100 ans	170 ans	200 ans	500 ans	1000 ans
Débit de pointe [m ³ /s]	2450	2620	3280	3500	3900	4500	5000

Tableau 10 : caractéristiques des crues moyennes à rares de la Loire au niveau du val de Saint Hilaire Fontaine

6.1.2.4 Crues fréquentes : débits de pointe des crues caractéristiques

Pour les crues fréquentes, les valeurs retenues sont celles issues de la station de Nevers définies dans l'étude transversale hydrologique.

Les hypothèses de débit de crue ainsi définies sont synthétisées dans le tableau suivant. Le corps des hydrogrammes pourra quant à lui être repris de ceux du modèle LM10 sur la branche Loire

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans
Débit de pointe [m ³ /s]	970	1700	1950	2150

Tableau 11 : caractéristiques des crues fréquentes de la Loire au niveau du val de Saint Hilaire Fontaine

Contrairement aux crues moyennes à extrêmes, ces hypothèses hydrologiques sont construites localement à partir des chroniques de débits disponibles sur les différentes stations hydrométriques.

6.1.2.5 Cinétique et dynamique des crues de la Loire

En complément aux informations fournies ci-avant, les ordres de grandeur suivants permettent de mieux apprécier la cinétique et la dynamique des sollicitations hydrauliques générées par les crues de la Loire sur les ouvrages :

- Durée de crue (débit > Q₂) : de 4 à 5 jours selon l'occurrence de crue considérée
- Vitesse de propagation de l'onde de crue : environ 2.5 km/h
- Vitesse de montée des eaux dans le lit endigué de la Loire : 5 à 15 cm/h

Compte tenu de la cinétique de crue et de la dynamique de propagation, l'onde de crue est relativement étendue puisque sur une vingtaine de kilomètres de part et d'autre d'un point, le débit ne varie que d'une dizaine de pourcents.

6.1.3 Prise en compte du risque de rupture de digue en amont ou en aval du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (SHF)

Les lignes d'eau au droit du val de SHF – et donc les occurrences de premières surverses – dépendent non seulement de l'hydrologie mais aussi de l'inondation des vals situés en amont et des vals situés en aval. En effet :

- L'inondation des vals amont est susceptible de modifier l'importance du laminage offert par le lit majeur, donc des débits totaux transitants dans la Loire et au final les lignes d'eau dans le lit endigué
- L'inondation des vals aval est susceptible de modifier la part de débit transitant dans le lit endigué, donc les lignes d'eau au droit des vals en question et au final, par remous (écoulements en régime fluvial), les lignes d'eau au droit du val étudié

Dans tous les cas, un brèche accidentelle ou « naturelle » (surverse) sur un val quelconque induit un abaissement de la ligne d'eau au droit du val étudié.

Aussi, dans un souci sécuritaire (les crues historiques ont montré la variabilité des scénarios de brèches amont / aval) et afin de préfigurer une situation à moyen terme où les digues de l'ensemble des vals seraient sécurisées, il a été fait l'hypothèse qu'aucune brèche, accidentelle ou « naturelle », ne se produisait sur les vals de la Loire moyenne.

6.1.4 Influence de la rupture de barrages en amont

Le seul barrage dont la rupture accidentelle pourrait avoir un impact sur l'hydrologie du fleuve au droit du val de SHF est le barrage de Villerest sur la Loire.

Le risque de rupture du barrage de Villerest a été étudié par EDF en 1974¹, puis révisé en 2001 par ISL² pour le compte de l'Établissement Public Loire (les études liées au barrage de Villerest intègrent la défaillance du barrage de Grangent en amont de celui-ci).

L'objectif de ces études consistait à déterminer l'hydrogramme généré par la rupture de l'ouvrage et les conditions de propagation de l'onde de crue correspondante en vue d'établir le Plan Particulier d'Intervention.

Les calculs ont été menés dans le cas d'une rupture sur front sec (débit initial faible à l'aval du barrage) ainsi que dans le cas d'une rupture lors d'une crue forte, de type 1846. Ils ont été réalisés depuis la retenue jusqu'à 7 km en aval du bec d'Allier, et permettent ainsi de caractériser l'impact de la rupture de Villerest sur l'hydrologie en entrée de la Loire moyenne.

L'étude conclut que l'onde de rupture sur front sec se propage en 18 h entre Villerest et Nevers. Le maximum de l'onde arrive à Nevers en 36 h, le débit de pointe correspondant étant alors de 4 100 m³/s.

Dans le cas d'une onde de rupture sur front humide (crue de type 1846), le maximum de l'onde se propage de Villerest à Nevers en 27 h, pour un débit de pointe de 10 000 m³/s.

En Loire moyenne, la sur-inondation engendrée par l'onde de submersion atteint des hauteurs supérieures à 1 mètre.

¹ *Onde de submersion à l'aval du barrage de Villerest*, EDF LNH, 1974.

² Révision et complément de *l'Étude de l'onde de submersion du barrage de Villerest*, Établissement public Loire, ISL, janvier 2001.

Une telle rupture du barrage de Villerest est cependant très improbable. Il a été conçu de façon à résister à une crue de temps de retour théorique de 10 000 ans. Il est équipé d'un système de détection interne d'éventuelles déstabilisations, et si ce système détectait un désordre, la retenue serait vidangée avant l'atteinte du niveau de rupture.

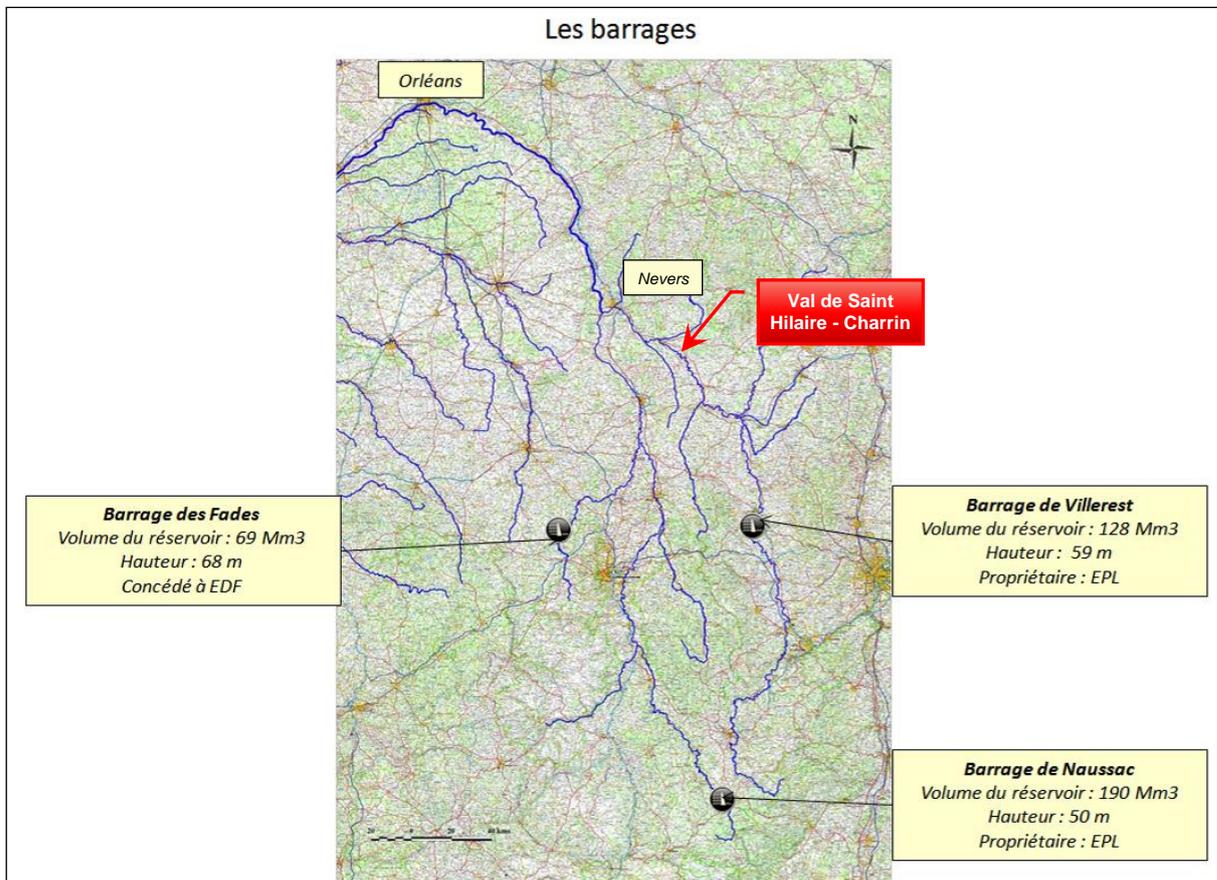


Figure 65 : position des principaux barrage de la Loire et de ses affluents sur le réseau hydrographique

6.2 EMBÂCLES ET DÉBÂCLES DE GLACE

Un embâcle de glace est un phénomène qui se produit lorsque la température est très basse pendant une longue période. On estime que le risque d'embâcle est réel lorsque la somme des températures moyennes négatives par jour atteint la valeur de $\sum T(j) = -70^{\circ}\text{C} \times \text{Jours}$.

Une étude particulière sur ce thème a été confiée à Zbigniew Gasowski, du bureau d'études Hydro Expertise. Elle montre que ce phénomène, depuis le XVe siècle, se reproduit en Loire moyenne 6 à 8 fois par siècle sans destruction et 1 fois avec.

Il est donc à la fois relativement fréquent et dangereux, mais reste difficilement quantifiable.

En février 2012, une période de gel intensif a dépassé le seuil de -70°C.j , sans toutefois entraîner un embâcle de la Loire. Cela montre que ce phénomène est complexe et fait intervenir d'autres paramètres que la température de l'air pendant la durée de la période de gel.

Si l'eau du fleuve après un embâcle sévère venait à se réchauffer rapidement à l'amont de celui-ci, à la faveur d'une brusque remontée des températures, la débâcle généralisée qui s'ensuivrait pourrait avoir des conséquences aggravées par le cumul de la descente de l'onde de crue et du dégel, assimilable à un phénomène de résonance.

Le phénomène peut avoir plusieurs conséquences détaillées ci-après.

6.2.1 Conséquences hydrauliques associées à la débâcle

Dans la première phase, la glace présente une forme de banquise. Elle se comporte comme un couvercle qui freine les écoulements avec un coefficient de frottement relativement fort, la glace étant très rugueuse au niveau de son interface avec l'eau. Dans une seconde phase, la glace se disloque en formant des blocs qui s'entassent les uns sur les autres.

Lors de la débâcle, l'eau qui a été retenue par les embâcles est libérée rapidement, ce qui provoque une crue. La capacité d'évacuation peut être notablement diminuée à la débâcle par l'effet d'amoncellement des blocs de glace.

Le cumul de la crue et des freins à l'écoulement peut donc provoquer localement des montées importantes du niveau d'eau, ce qui peut mettre les digues en charge, voire provoquer des surverses.

6.2.2 Conséquences morphodynamiques associées à la débâcle

Le phénomène général d'embâcle se superpose surtout avec des phénomènes locaux beaucoup plus sensibles. Lors d'un embâcle ou lors d'obstruction à la débâcle, la courantologie locale est modifiée. Il peut en résulter de fortes agressions du lit, des berges et même des levées.

6.2.3 Conséquences mécaniques associées à la débâcle

L'embâcle et les accumulations de glaces induisent des forces considérables qui peuvent provoquer des dégâts sur les ouvrages. Les glaçons à la débâcle présentent, compte tenu des forces mises en œuvre, une capacité importante d'agression des berges et des digues. De plus, en cas de brèche dans une levée, les blocs de glace se comporteraient comme des béliers sur les enjeux contenus dans le val. La force destructrice de l'eau sur les constructions serait alors fortement augmentée.

À noter que le gel, avec ou sans embâcle, peut avoir un effet direct sur le fonctionnement des ouvrages annexes. La présence de glaces ou d'un embâcle est susceptible d'engendrer le dysfonctionnement d'ouvrages mobiles tel que les vannages, les clapets anti-retour ou les prises d'eau.

6.3 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'analyse ne met pas en évidence de preuve formelle traduisant une évolution de la nature des crues liée au changement climatique.

Toutefois, un faisceau de présomptions laisse apparaître un accroissement de l'intensité des crues qui résulterait d'intrusions plus profondes dans le haut bassin de phénomènes pluvieux d'origine méditerranéenne. Ces phénomènes se traduiraient par des crues plus intenses au Bec d'Allier, mais présentant des morphologies similaires à celles qui ont été vécues et retenues pour l'analyse hydrologique. Il n'est pas possible de quantifier l'évolution de la probabilité des crues engendrées par le changement climatique.

La nature des crues ne paraissant pas être modifiée dans le futur, il n'apparaît pas nécessaire de mener des tests de sensibilité sur leur typologie (tests sur la morphologie des hydrogrammes ou de leur déphasage).

Sur les embâcles de glace, les conséquences du réchauffement climatique pourraient sembler favorables. Or les simulations sur l'évolution climatique montrent des augmentations de températures en été mais beaucoup moins l'hiver. Le phénomène d'embâcle / débâcle reste donc un phénomène dangereux dont la probabilité ne devrait pas diminuer.

En conclusion, si aucun élément ne permet aujourd'hui de prévoir si l'influence du changement climatique aura des conséquences sur les crues de la Loire, il convient de continuer à surveiller les évolutions hydrologiques du fleuve et de ses affluents. Si le réchauffement climatique devait augmenter la violence des crues cévenoles et surtout retarder dans la saison leur apparition, les conséquences sur les crues en Loire moyenne pourraient être importantes. En effet, les phénomènes cévenols sont plutôt automnaux et les océaniques hivernaux. Une dérive des événements cévenols en fin d'année pourrait augmenter la probabilité de concomitance des deux phénomènes. Ainsi, les crues mixtes, qui sont les plus dangereuses, seraient plus fréquentes.

6.4 GÉOLOGIE ET MORPHODYNAMIQUE DE LA LOIRE

Les éléments ci-dessous synthétisent les résultats issus du rapport spécifique inséré en annexe 5.

6.4.1 Contexte géologique

A L'ÉCHELLE DU BASSIN PARISIEN

A l'échelle des temps géologiques, le cours actuel de la Loire moyenne est d'origine relativement récente. Son tracé est hérité des derniers mouvements tectoniques importants affectant le socle du bassin de Paris. La compression alpine datant du Miocène (Environ – 15 Ma) a notamment fait rejouer d'anciennes fractures issues de l'orogénèse hercynienne (- 300 Ma), entraînant le basculement du bloc armoricain d'est en ouest et la surrection du Morvan rattaché au bloc bourguignon.

Plus tardivement, un évènement tectonique plus localisé a eu lieu au Quaternaire et provoqua le soulèvement des calcaires de Beauce (au nord d'Orléans). La principale conséquence fût le détournement du lit de la Loire vers l'ouest et l'océan Atlantique. Le passage de la Loire vers l'Atlantique est daté à environ – 400 000 ans (Pléistocène moyen).

A L'ÉCHELLE DU SECTEUR D'ÉTUDE

Sur l'ensemble de la zone d'étude trois principales formations géologiques composent le substratum de l'amont vers l'aval.

- ▶ L'amont du secteur d'étude se distingue par la présence de couches sédimentaires d'âge Pliocène, surplombant l'Oligocène visible sur certains secteurs de talwegs soumis à l'érosion. La Loire amont repose sur ce secteur sur une importante couche d'alluvion du Quaternaire.
- ▶ De l'amont du Bec d'Allier jusqu'en aval du val de Beffes – Herry, le substratum est constitué principalement des bancs calcaires du Jurassique inférieur à supérieur, surplombé par endroit par les formations sédimentaires d'âge Pliocène.
- ▶ L'aval du secteur d'étude est caractérisé par la dominance des formations du Crétacé inférieur et supérieur.

A L'ÉCHELLE DU VAL DE SAINT-HILAIRE-FONTAINE ET DE CHARRIN

Le val de Saint Hilaire Fontaine et de Charrin est principalement composé de la formation alluvionnaire Fz qui correspond aux alluvions modernes de la Loire, constituées de sables, graviers et galets, limons argileux.

Au-delà des formations alluvionnaires, sa limite nord côtoie les affleurements des formations suivantes :

- ▶ Fy : Sables et graviers.
Cette formation, orientée SE NW, entaille les marnes oligocènes dans sa partie amont et le niveau FX dans sa partie aval. Elle domine le cours actuel de la Loire de 3 à 6 mètres. Les matériaux sont en majorité d'origine organique, conférant à cette nappe un ton rougeâtre caractéristique.
- ▶ g_{3A}: Oligocène supérieur, Marnes vertes et calcaires à petits récifs
Cet ensemble est principalement constitué de marnes tendres vertes ou verdâtres à beige blanchâtre à l'affleurement, vertes, grises, brunes ou beiges, parfois panachées d'ocre en sondage avec de rares traces noires.
- ▶ FL : sables grossiers quartzo-feldspathiques.

Ces sables grossiers quartzo-feldspathiques, à matrice plus ou moins argileuse, sont emboîtés dans les terrains oligocènes. Bien que constituée principalement de dépôts grossiers, il est aussi possible de rencontrer au sein de cette formation des matériaux fins (sables fins, silts, argiles) intercalés en un ou plusieurs niveaux.

- ▶ B : Limons dérivés pour l'essentiel des matériaux du substratum.

L'ensemble des terrains oligocènes, et principalement ceux à caractère marneux ou argileux, sont recouverts en position de plateau par un manteau limono-argileux, épais de quelques décimètres à 2 m environ, s'enrichissant parfois de sables vers la base. Il s'agit d'une altération de la roche mère sous-jacente aboutissant à un limon marbré jaunâtre à grisâtre (traces de racines) très compact.

6.4.2 Evolutions morphologiques

Rappel : comme indiqué dans le préambule « informations aux lecteurs », une carte des PK Loire auxquels font référence les chapitres suivants est consultable au chapitre 10. L'étude spécifique de l'évolution morphologique est consultable en Annexe 5.

EVOLUTIONS TENDANCIELLES DU PROFIL EN LONG

L'incision du lit de la Loire moyenne est à la fois bien connue et documentée elle est le résultat d'un tarissement de la charge solide grossière qui se traduit aujourd'hui par un déficit en sédiments. Les origines de ce tarissement en alluvions sont principalement anthropiques et le résultat d'une combinaison d'aménagements hydrauliques tels que la création de barrages et de digues, les extractions de granulats, la chenalisation due aux ouvrages de navigation, l'entretien du chenal en basse Loire, ou encore l'absence de crues morphogènes depuis le milieu du XIX^{ème} siècle.

Le val de Saint Hilaire Fontaine et de Charrin est localisé au sein d'un secteur en incision, dont les valeurs maximums atteignent une trentaine de centimètres en fin de val pour les années récentes. Les facteurs à l'origine de l'évolution du profil en long sont multiples sur la Loire, au niveau fonctionnel, l'abaissement de la ligne d'eau peut avoir plusieurs effets sur les digues :

- ▶ Une augmentation du débit capable de la section (débit de plein bord) avec une sollicitation potentiellement plus importante sur les digues ;
- ▶ Une incision des talus qui peut conduire à une déstabilisation accrue pour les digues localisées à proximité du lit d'étiage ;
- ▶ Plus généralement mais aussi plus fréquemment, une végétalisation accrue de barres sédimentaires et par un processus de rétroaction positive, un engraissement plus important à l'origine d'un agrandissement des îles. Cette évolution n'est pas uniquement le fait de l'incision elle est aussi à combiner à la diminution des crues morphogènes qui ne permettent plus de remodeler « en profondeur » les formes fluviales.

EVOLUTION TENDANCIELLE DU TRACÉ DE LA LOIRE

Cette analyse vient en appui aux documents produits pour les différents vals. Elle concerne :

- ▶ Les évolutions du lit mineur observées pour les années 1970, 2005 et 2010 ;
- ▶ Les planches des photographies aériennes des années 1970, 2005 et 2010 ;
- ▶ les aménagements recensés aux abords des digues.

Au droit du val de St Hilaire Fontaine et de Charrin, la Loire a subi quelques modifications de son tracé, correspondant principalement à l'évolution des méandres par érosion de l'extrados et dépôts en intrados. Ainsi, la Loire est concernée par ce type d'évolution au droit des secteurs suivants :

- ▶ Pk 402,5 à 404 ;
- ▶ Pk 404,1 à 405,2.
- ▶ Dans une moindre mesure, des évolutions similaires sont visibles au droit des Pk 400 ; 401 et 402.

Au droit des Pk 397,5 à 399 et 405,5 à 406,5, ce phénomène érosif est contraint par la présence des digues, ces secteurs sont toutefois soumis à des forces hydrodynamiques importantes susceptibles d'engendrer des dégâts sur les berges et sur les systèmes d'endiguements sus-jacents.

Concernant les aménagements recensés au droit du val de St Hilaire Fontaine Charrin, des épis de protections sont placés en extrados au droit des Pk 403 et 403,3, limitant le phénomène érosif de ce secteur.

Les différents atterrissements sont très peu végétalisés. Ce secteur est ainsi susceptible d'être très mobile du fait de la disponibilité importante du stock sédimentaire pour participer au transport solide de la Loire.

SOLLICITATIONS HYDRODYNAMIQUES DES DIGUES

La méthodologie de l'étude de danger des digues d'Orléans menée par le CETE de Blois pour le compte de la DREAL Centre-Val de Loire (2012) prend en compte les sollicitations hydrodynamiques de la Loire sur les digues. L'analyse de ces sollicitations prend en compte 4 indicateurs principaux :

- ▶ Rehausse de la ligne d'eau pour une crue suite à la végétalisation récente du lit ;
- ▶ Végétalisation du lit prévisible à court termes sur les tronçons du lit les plus larges ;
- ▶ Localisation des secteurs soumis à une forte sollicitation en pied de digue (restriction de largeur du lit d'étiage, extrados d'un méandre ou écoulement concentré en pied de digue) ;
- ▶ Présence d'obstacles à l'origine d'écoulements sécants aux systèmes d'endiguement.

Au droit du val de St Hilaire et de Charrin, le taux de végétalisation du lit mineur de la Loire amont varie entre 0 et 5%. Il n'est pas nécessaire de prévoir de gestion de la végétation au droit de ce val.

Le val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin ne fait pas partie des zones de la Loire en amont du Bec d'Allier où pourraient apparaître des sur-largeurs de végétation.

Deux secteurs situés au droit du val de Saint Hilaire Fontaine et de Charrin sont caractérisés par des sollicitations importantes en pied de digue. Il s'agit de deux secteurs en extrados de méandres au droit des Pk 397,8 à 399 et 405,5 à 406.

Au droit du val de Saint Hilaire Fontaine Charrin, quatre obstacles engendrant des écoulements sécants aux systèmes d'endiguement sont présents au droit des points kilométriques suivants :

- ▶ Pk 397,8 : atterrissement présent en intrados de méandre dirigeant les écoulements vers la digue ;
- ▶ Pk 398,6 : îlot à proximité de la berge supportant la digue orientant les écoulement vers celle-ci ;
- ▶ Pk 405,5 : atterrissement présent en intrados de méandre dirigeant les écoulements vers la digue ;
- ▶ Pk 406,1 : îlot à proximité de la berge supportant la digue orientant les écoulement vers celle-ci.

6.4.3 Conséquences et dangers à l'échelle du val

La caractérisation des niveaux de sollicitation morphodynamique sur les digues et l'identification des secteurs les plus exposés sont présentés respectivement au travers du tableau et de la carte de synthèse ci-après.

Paramètres	Rehausse potentielle de la ligne d'eau par la végétation	Risque de végétalisation	Sollicitation du pied de digue	Obstacles à l'origine d'écoulements sécants	Evolutions du profil en long	Evolutions du tracé
Evaluation	Végétalisation du lit mineur / largeur du lit endigué = 0 - 5% Pas de rehausse de la ligne d'eau en crue engendrée par la végétalisation du lit mineur.	Bande active comprise entre la moyenne de 175 m et la limite critique de 275 m. Faibles surfaces disponibles pour la végétalisation.	Deux secteurs présentent des sollicitations importantes du pied de digue au droit des Pk 397,8 à 399 et 405,5 à 406.	Quatre obstacles engendrant des écoulements sécants aux systèmes d'endiguement sont présents au droit du val de St Hilaire Fontaine Charrin aux Pk 397,8 ; 398,6 ; 405,5 ; 406,1.	Incision significative de 30 cm maximum au droit du val de St Hilaire Fontaine Charrin	Evolution importante du tracé de la Loire sur plusieurs secteurs au droit du val de St Hilaire Fontaine Charrin
Facteur de pondération			Les zones de berges soumises à ce phénomène se trouvent en extrados des méandres, là où les forces hydrodynamiques en crue sont les plus importantes	Pour deux d'entre eux (Pk 397,8 ; 405,5), ces écoulements favorisent les sollicitations du pied de la digue en extrados de méandre.		Au droit des Pk 397,5 à 399 et 405,5 à 406,5, le lit de la Loire a progressé vers le système d'endiguement, présentant actuellement des écoulements en pied de digue.
Qualification de l'aggravation de l'aléa de rupture	Négligeable	Négligeable	Modéré	Important	Faible	Modéré

6.5 ALÉA SISMIQUE

Le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin situé dans le canton éponyme qui est classé en zone de sismicité très faible (décrets N° 2010-1254 et N° 2010-1255 du 24 octobre 2010).

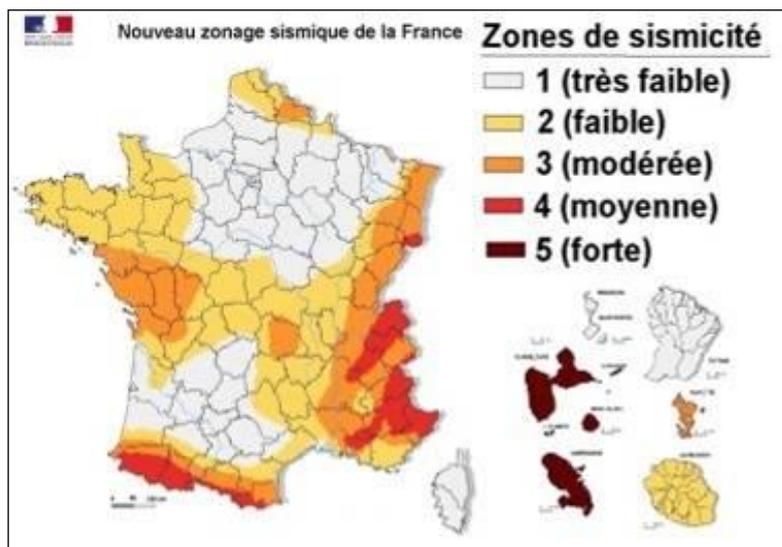


Figure 66 : carte de la sismicité en France

Un séisme peut avoir un effet important sur une digue. Deux situations sont à envisager :

1. la simultanéité d'un séisme et d'une crue ;
2. la survenue d'une crue après un séisme alors que les dégâts associés n'ont pas été réparés.

La première situation est la plus critique pour la digue. Les phénomènes à craindre sont dans ce cas :

- la liquéfaction du corps de la digue ou de sa fondation sous l'effet combiné de la saturation d'eau et de la secousse sismique ;
- la ruine de la digue par glissement des talus (circulaire ou autres) du fait des accélérations sismiques entraînant une augmentation du champ de la pesanteur et donc des contraintes (horizontales et/ou verticales).

Un séisme survenant pendant une crue rare cumulerait les effets de l'inondation et de la secousse sismique. Toutefois la survenue d'une telle situation, qui repose sur la concomitance des deux événements (en prenant un temps de retour de 4753 ans pour le séisme), est très improbable, de l'ordre de 1 chance sur 100 millions par an.

La seconde situation est moins critique pour la digue mais plus probable. L'effet d'un séisme peut avoir des conséquences sur la structure de la digue, même en dehors d'une crue. Des tassements ou des modifications de la structure sont à craindre d'autant plus que celle-ci est ancienne et très hétérogène. La probabilité qu'une crue significative se produise dans le délai de 2 ans (délai de réparation des dégâts) après un séisme significatif est d'environ 1 chance sur 100 000 par an.

En cas de séisme de magnitude supérieure ou égale à 4 sur l'échelle de Richter, une inspection post-sismique devra être effectuée et, si nécessaire, une visite technique approfondie qui devra s'étendre à l'ensemble des berges et des ouvrages annexes. En cas de dégradations avérées, une réparation devra être entreprise (renvoi vers le chapitre 9).

³ Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques – MEDDTL-DGPR – novembre 2010

6.6 ALÉA KARSTIQUE

Le karst est un phénomène géologique affectant les formations calcaires. Il se manifeste par des conduits et cavités souterraines dans lesquelles l'eau circule. L'effet conjugué de l'érosion et de la gravité provoque des effondrements pouvant atteindre la surface.

D'après les études conduites par le BRGM, le risque karstique est identifié comme un risque moyen pour le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

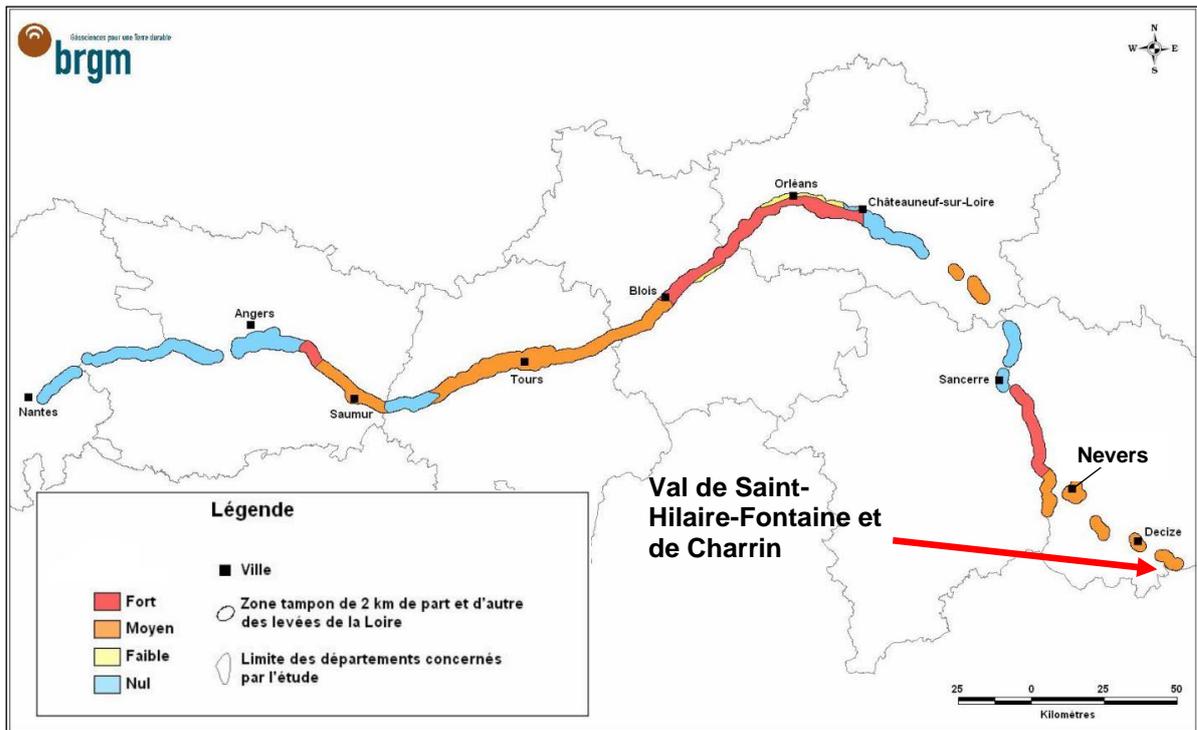


Figure 67 : sensibilité à l'aléa karstique des levées de la Loire (source BRGM)

6.7 SYNTHÈSE DE LA CARACTÉRISATION DES ALÉAS NATURELS

Aléa naturel / anthropique	Quantification du risque pour le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	Prise en compte dans l'étude dangers
Crues	Fort	Oui
Embâcle de glace	Fort	Non

Effondrement karstique	Moyen	Non
Evolutions morphologiques	Fort	Oui
Séisme	Très faible	Non
Changement climatique	Non décelable	Non

7. ETUDE ACCIDENTOLOGIQUE ET RETOUR D'EXPÉRIENCE

Depuis la crue de 1907, le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin n'a pas connu d'événement susceptible de le solliciter de manière importante. La crue de décembre 2003, dernière crue récente importante (période de retour de l'ordre de 20 ans), n'a à ce titre pas engendré d'effet notable sur les levées du val d'après les informations fournies par le gestionnaire.

Aussi, les enseignements sont à rechercher dans les archives des crues historiques ayant affecté les levées de la Loire moyenne. De par l'ancienneté de ces crues et compte tenu des nombreuses évolutions structurelles, hydrauliques et morphodynamiques subies par la Loire et les levées, toute transposition des résultats à la situation actuelle doit néanmoins être faite avec beaucoup de prudence.

Aussi, compte tenu de ses limites, cette approche historique doit être complétée par les retours d'expérience relatifs aux brèches observées sur des systèmes d'endiguement similaires.

7.1 INCIDENTS RÉCENTS

7.1.1 Les conséquences de la crue de décembre 2003 sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

Comme indiqué précédemment, d'après les informations fournies par le gestionnaire, cette crue n'a provoqué aucun désordre sur le système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin.

Il convient toutefois de signaler qu'une inondation a gagné l'intérieur du val, étant donné que celui-ci est ouvert en aval et entre les levées de Thareau et de Charrin. Ces observations sont cohérentes avec les résultats de l'analyse fonctionnelle fournis au chapitre 3.

7.1.2 Les conséquences de la crue de décembre 2003 sur d'autres systèmes d'endiguement de la Loire

Les éléments ci-après sont repris du bilan dressé par la DREAL Centre-Val de Loire.

On peut citer quelques incidents qui se sont produits sur d'autres levées de la Loire lors de la crue de décembre 2003 :

- la découverte de terriers de blaireaux traversant les digues de Beffes et Herry, aux lieux-dits les Rapins, les Barreaux et les Butteaux. Alors que la crue était annoncée, dans la nuit du 6 au 7 décembre 2003, une pelle mécanique a été mobilisée pour fermer les terriers et empêcher la formation quasi-certaine d'une brèche. L'intervention a été faite en urgence alors que la crue était déjà présente. Le chauffeur de la pelle et le contrôleur de la DDE ont dû être évacués par les pompiers. Une semaine après la crue, les terriers étaient déjà réapparus.



Figure 68 : levée de Beffes-Herry - réparations d'urgence lors de la crue de décembre 2003 (crédit photo DREAL Centre-Val de Loire)

- un renard hydraulique sans brèche s'est produit sur la digue à l'amont de Tours sur la commune de Montlouis, le 10 décembre 2003. Le lieu correspond probablement au site d'une ancienne brèche. La cote du fond de la fosse d'érosion est de 50,00 m NGF alors que le niveau général du val est aux alentours de 52,00 m NGF. La cote maximale atteinte par les eaux lors de la crue de 2003 était d'environ 52,30 m NGF, soit 2,30 m au-dessus du niveau du fond de la fosse. Le sommet de la levée est à la cote de 56,00 m NGF, ce qui fait que la levée est localement haute de 6,00 m.
- deux brèches se sont produites sur des endiguements plus modestes que les levées domaniales de la Loire :
 - o une sur une digue en bordure de la Loire à Montrond-les-Bains, dans le département de la Loire (brèche de 20 mètres) ;
 - o une sur la digue de Mauboux, en bordure de l'Allier à Livry, dans le département de la Nièvre (digue de 2,00 m de hauteur, brèche de 40 mètres, fosse d'érosion de 50 m de diamètre, ce qui a causé la mort d'un troupeau de 130 bêtes)



Figure 69 : Brèche dans la digue de Mauboux à Livry (58) - Crue de 2003 (crédit photo DREAL Centre-Val de Loire)

Sur l'ensemble du linéaire où les digues ont été en eau, il a été noté des remontées de nappe quasi-systématiques en arrière immédiat de la digue.

Les déversoirs de Passy, Léré et Saint-Martin-sur-Ocre, situés en aval du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, ont fonctionné. Les deux premiers sont établis au niveau du terrain naturel, le troisième est en maçonnerie sans fusible. Les hauteurs d'eau au-dessus des déversoirs ont été respectivement de 0,50 m, 0,60 m et 0,20 m.

Le déversoir du Bec d'Allier a été à la limite du fonctionnement.

Les autres déversoirs n'ont pas fonctionné (cotes de fonctionnement supérieures à la crue de décembre 2003).



Figure 70 : déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre aujourd'hui (à gauche) et lors de la crue de décembre 2003 (à droite) (image Google Earth - crédit photo DREAL Centre-Val de Loire)

7.1.3 Les incidents hors crue sur ou à proximité du système d'endiguement du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

D'après les informations fournies par le gestionnaire, aucun incident notable (autre que les désordres identifiés lors des VTA) n'a été observé en dehors de tout évènement hydrologique important.

7.1.4 Les incidents hors crue sur d'autres systèmes d'endiguement de la Loire

En dehors des désordres « légers » identifiés lors des VTA, seul un glissement du talus côté rivière (le Cher) occasionnant une lentille d'érosion de 1,5 à 2 m d'épaisseur est à signaler sur la levée de Villandry dans le département d'Indre-et-Loire.

7.2 CRUES HISTORIQUES DE LA LOIRE AU NIVEAU DU VAL DE SAINT HILAIRE FONTAINE

Compte tenu des données historiques disponibles, les caractéristiques des crues importantes connues sont répertoriées à l'échelle de Nevers et sont rappelées ci-après. Il est également indiqué les hauteurs à l'échelle de Decize qui est plus proche du val mais moins documentée.

Date de la crue	Type de crue	Hauteur à l'échelle de Decize	Hauteur à l'échelle de Nevers	Débits naturels estimés à Nevers (m3/s)	Période de retour avec Villerest
1790			5,85 m		
Octobre 1846	mixte	7,05 m	6,30 m	4500	500
Juin 1856	mixte	6,47 m	6,13 m	4050	< 500
Octobre 1864					
Septembre 1866	mixte	7,06 m	6,36 m	4380	> 500
Octobre 1872	océanique				
Avril 1879					
Octobre 1893	océanique				
Octobre 1907	cévenole	6,30 m	5,34 m	3000	170
Novembre 1914					
Mai 1983					
Décembre 2003	cévenole	6,89 m	3,90 m	2170	< 50
Novembre 2008	cévenole	6,71 m	3,50 m		

Tableau 12 : Crues historiques de la Loire à l'échelle de la Jonction à Nevers et à l'échelle de Decize

Au niveau de la commune de Nevers, quatre évènements ont dépassé les 5,50 m, dont trois correspondant aux grandes crues historiques du XIXe siècle (1846, 1856 et 1866).

7.2.1 Eléments de comparaison des crues de 1846, 1856 et 1866

Au-delà des modifications apportées aux levées pouvant expliquer les différences de comportement des digues entre ces trois crues, les paramètres caractéristiques de celles-ci (durée et niveaux maxima atteints en lit mineur endigué⁴) sont susceptibles d'avoir influencé directement ou indirectement les défaillances observées sur les levées.

Le tableau ci-après fournit un rapide comparatif des crues de 1856 et 1866 avec celle de 1846.

⁴ Ces niveaux dépendant à la fois de l'hydrologie propre de chaque crue mais aussi, voire surtout, des brèches ayant affecté les vals en amont et en vis-à-vis et éventuellement en aval.

	Ecart des PHE par rapport à la crue de 1846	
	Crue de 1856	Crue de 1866
Val de Digoïn	- 60 cm	- 50 cm
Val de Saint Hilaire Fontaine	- 40 cm	- 15 cm
Val de Luthenay (Imphy en aval)	- 40 cm	- 25 cm
Val de Guétin – Bec d'Allier (Nevers en amont)	- 15 cm	+10 cm
Val de Givry	+ 25 cm	+10 cm
Val de Beffes	+ 25 cm	+20 cm
Val de Léré	+ 5 cm	+15 cm

Tableau 13 : Comparaison des niveaux atteints par les crues du 19^{ème} siècle au droit des différents vals étudiés

7.3 ETUDE DES BRÈCHES HISTORIQUES

7.3.1 Brèches historiques dans le val de Saint Hilaire Fontaine

L'analyse des cartes anciennes et du MNT, l'analyse des documents fournis par la DDT58 ainsi que la lecture du dossier d'ouvrage de la digue ont permis d'identifier des brèches historiques qui se sont produites sur la levée de Saint Hilaire Fontaine.

Crue	Référence	PK	Commune	Longueur retenue
1790	DDT58/AD58 ⁵	4200	Charrin	1200
1856	MNT/AD58 ⁵	1350	Thareau	130
1856	MNT/AD58 ⁵	1850	Grands Martins	180
1866	AD58 ⁵		Thareau	
Crue inconnue	MNT	7600	Charrin	280

Tableau 14 : Brèches historiques recensées sur le val de Saint Hilaire Fontaine

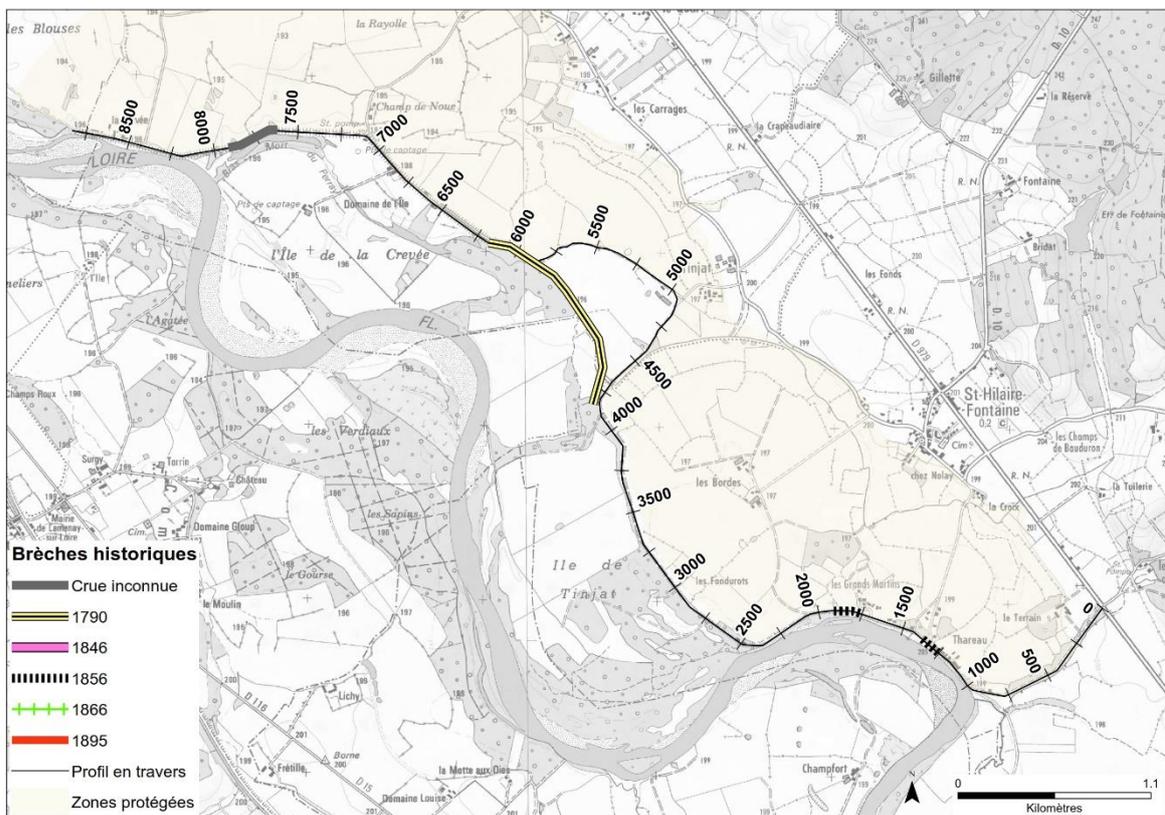


Figure 71 : localisation des brèches historiques inventoriées sur le val de Saint Hilaire Fontaine

⁵ AD58 : Archives départementales de la Nièvre

7.3.2 Statistiques globales à l'échelle des 7 vals étudiés⁶

Crue	Nombre de brèches	Linéaire cumulé
1846	13	2633 m (3.5% du linéaire total de levées)
1856	12	2947 m (3.8% du linéaire total de levées)
1866	3	588 m (1% du linéaire total de levées)

Tableau 15 : Brèches historiques recensées sur l'ensemble des 7 vals étudiés

Ce sont donc au total près de 28 brèches qui ont été causées par les crues successives de 1846, 1856 et 1866, pour un linéaire total cumulé théorique (non prise en compte des superpositions partielles ou complètes éventuelles d'une brèche d'une crue à l'autre) de 6 160 m (soit au final l'équivalent de près de 8% du linéaire de levées reconstruit).

7.3.3 Statistiques sur l'ensemble des digues de la Loire

Les informations proviennent de l'étude de 1997 de William Halbeck de l'équipe pluridisciplinaire dans le cadre du Plan Loire ainsi que les documents reprenant et synthétisant les données de base.

Lors des trois grandes crues du 19^{ème} siècle, entre le Bec d'Allier et Montjean, 337 brèches ont été répertoriées sur les levées de la Loire :

- ▶ Crue de 1846 : 103 brèches ;
- ▶ Crue de 1856 : 149 brèches ;
- ▶ Crue de 1866 : 85 brèches.

Les causes directes des ruptures de digues sur l'ensemble des trois crues sont les suivantes :

- ▶ Surverse du fleuve vers le val : 47.9 % ;
- ▶ Surverse du val inondé vers le fleuve : 17.9 % ;
- ▶ Rupture de la banquettes : 15.4 % ;
- ▶ Renard dans le corps de la levée : 4.7 % ;
- ▶ Erosions de talus et affouillements : 4.5 % ;
- ▶ Autres causes ou causes indéterminées : 9.6 %.

Le secteur d'étude est globalement peu concerné par les brèches historiques en comparaison aux autres secteurs de la Loire. En effet, seuls 16 lieux de brèches sont identifiés entre le Bec d'Allier et Léré. Le linéaire entre Gien et Blois représentent 67% de la totalité des brèches survenues durant les 3 crues.

⁶ Vals de Digoïn, Saint Hilaire, Luthenay, Bec d'Allier, Givry, Beffes et Léré.

7.3.4 Enseignements généraux à l'échelle de l'ensemble des vals

RÔLE DES REHAUSSES (CÔTE LOIRE)

L'influence de la banquette est assez contradictoire selon les documents. Il est parfois indiqué que celle-ci s'est affaissée suite à sa saturation et au batillage, et qu'elle n'a donc pas apporté de protection supplémentaire. A l'inverse, certains témoignages indiquent que c'est précisément cette banquette, parfois renforcée à la hâte au cours de la crue qui a permis d'éviter l'inondation de certains vals.

Une approche différenciée de chaque (tronçon de) levée devra permettre de définir dans le modèle de calcul de l'aléa de rupture une hauteur d'influence et une probabilité de tenue de la banquette, au regard des caractéristiques géométriques et structurelles de celle-ci.

ROLE DES MESURES D'URGENCE

Plusieurs documents témoignent de l'importance des mesures d'urgence (réhausse, renforcement, recharge, etc.) prises lors des crues pour assurer la tenue de la digue et empêcher sa ruine. Ces dispositions ont concerné tous les mécanismes de rupture (surverse, érosion interne, glissement), pour peu que leur apparition ait pu être anticipée.

Ces éléments confirment, si besoin est, le bien-fondé de l'intégration du paramètre « gestion en crue » dans l'analyse des probabilités de défaillance de chaque tronçon de digue. Il faut toutefois signaler que ce facteur améliorant n'est pris en compte dans le modèle de calcul de l'aléa de rupture que dans le cas de l'érosion interne.

ROLE DES DEPRESSIONS ET FOSSES D'EROSION

Plusieurs documents mettent en avant l'influence des dépressions, et notamment des anciennes fosses d'érosion non comblées en pied de digue, sur l'apparition de processus d'érosion interne (notamment phénomène de boulangerie puis d'érosion régressive / renard par saturation du pied de digue côté val).

Ces éléments conduisent à considérer dans le modèle de calcul de l'aléa de rupture un nouveau facteur aggravant de l'érosion interne, associé à la présence de dépressions (en eau) en pied de levée côté val.

7.4 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR D'AUTRES SYSTÈMES D'ENDIGUEMENT

7.4.1 Dignes du Vidourle

Les crues violentes du Vidourle sont connues depuis très longtemps sous le nom de « Vidourlades ». Elles se produisent en automne lors d'épisodes pluvieux de type « cévenols ». La crue de septembre 2002 fut sans précédent à l'échelle du bassin versant et a fortement marqué les esprits.

Le cours du Vidourle est endigué sur la totalité de son linéaire en aval de l'A9. Au-delà d'un seuil de débit, compris entre 900 et 1000 m³/s et dont la période de retour est voisine de 10 ans, quel que soit le débit arrivant de l'amont du bassin, le surplus est écrêté par déversement en rive gauche entre l'A9 et Lunel et la dynamique des crues est quasi indépendante de la période de retour : le débit entrant est sensiblement constant, et seule la durée de l'écoulement à plein bord varie. Pour ces débits, en aval de l'A9, le niveau d'eau est très proche de la ligne de crête des ouvrages ce qui induit une sollicitation quasi-maximale.

Les digues de protection contre les inondations des basses plaines du Vidourle sont des digues en remblais homogène, construite en matériaux limoneux extraits in-situ. Du fait de leur conception originelle sans déversoir, ces digues sont vulnérables aux risques de rupture par érosion interne et par surverse.

Lors de la crue de septembre 2002, avec un débit de pointe de 2400 m³/s, près de 35 brèches ont pu être dénombrées, dont une majeure partie a pour origine la rupture par érosion externe liée à la surverse et l'autre partie a pour origine des phénomènes d'érosion interne. Suite à ces brèches, BRLi a été mandaté par le syndicat du Vidourle pour piloter les travaux de confortement d'urgence, réaliser une synthèse des causes et réfléchir aux méthodologies à mettre en œuvre pour limiter les risques à l'avenir.

C'est dans ce cadre, afin de réduire le risque de rupture, et sans pour autant augmenter la cote de protection, qu'il a été décidé par le maître d'ouvrage :

- d'une part, de conforter les zones « historiquement » déversantes et de créer de nouveaux déversoirs permettant de « soulager » l'ensemble des digues situées à l'aval ;
- et d'autre part, dans le cadre des travaux d'entretien de supprimer la végétation sur l'ouvrage et à proximité immédiate (sur une bande de 3 m) dans le cadre des travaux de confortement projetés, de mettre en œuvre, de façon systématique, des systèmes de protection contre les animaux fouisseurs.

A ce jour, non seulement les études de conception sont largement engagées, mais il a d'ores et déjà été réalisé un nouveau déversoir et le confortement à la surverse de 3 km de digue.

Les techniques étudiées, retenues et mises en œuvre combinent l'analyse des enjeux et le niveau de sollicitations hydrauliques associés aux contraintes géotechniques, environnementales et foncières. L'intégration des résultats de l'analyse de la vulnérabilité des ouvrages existants a ainsi permis de proposer un panel de solutions techniques : la réhabilitation de seuils déversant en maçonnerie mais aussi la protection des digues déversantes par enrochements percolés, matelas grillagés, géonappe bitumineuse, etc. associé à des dispositifs singuliers tels que la poutre sommitale en béton armée de calage altimétrique.

Appliqué au système de protection du Val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, ce retour d'expérience a été mis à profit dans le choix des principes de confortement proposés au chapitre 9.

7.4.2 Dignes de l'Agly

En mars 2013 une crue de l'Agly (Pyrénées Orientales) a provoqué deux brèches dans la digue rive droite (digue de classe A). Un retour d'expérience a été réalisé et apporte un éclairage intéressant pour la présente étude de dangers. Il met en évidence :

- l'impact de la végétation dans le lit du cours d'eau sur la ligne d'eau en crue et donc sur les surverses.
- l'importance de l'érosion interne au niveau de la fondation par l'apparition de « sand boils⁷ » dans le val en arrière de la digue, et des effondrements localisés dans la digue qui sont vraisemblablement la cause initiale de la deuxième brèche (brèche de Pia) ;
- la création d'une fosse d'érosion importante en profondeur (>5 m) et en étendue (environ 100 m) ;

⁷ Sand Boil : cratère de sable créé par la résurgence des eaux chargées

- que les écoulements dans la brèche lors de sa formation sont capables de transporter des blocs d'enrochement, initialement implantés à la base de la digue côté fleuve, à plus de 200 m de distance et au-delà de la fosse d'érosion. Cela confirme l'importance de la dissipation d'énergie en arrière d'une brèche.



Figure 72 : brèche de Pia sur l'Agly - crue du 6 mars 2013 - (photo : protection civile des Pyrénées-Orientales)



Figure 73 : Coupe d'un sand Boil derrière les digues de l'Agly - crue du 6 mars 2013 - (photo : DDT des Pyrénées-Orientales)

7.4.3 Autres retours d'expérience

D'autres enseignements peuvent également être tirés de retours d'expériences complémentaires établis par la DREAL Centre-Val de Loire. Ces différents enseignements sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Accident	Nombre victimes	Année	Enseignement pour l'Étude de dangers
Tempête en mer du Nord et rupture de digues en Hollande	1 800	1953	L'évacuation du val est indispensable à partir d'un certain niveau d'eau
Crues du Rhône et rupture des digues de la Camargue		1993-1994	Formation de brèches au niveau des canalisations d'irrigation
Crue de l'Oder en Pologne et en Allemagne		1997	- Trace d'un réseau de trous laissés par les racines d'un ancien boisement à la périphérie d'une brèche - Techniques de réparations d'urgence
Crue de l'Agly et rupture de la digue		1999	Rupture suite à surverse au niveau de la station d'épuration de Saint-Laurent-de-la-Salanque
Crue du Gard et rupture de digues	8	2002	Danger à proximité de la rupture
Crue du Rhône et rupture d'un cordon de digue près d'Arles au niveau d'une trémie sous la voie ferrée		2003	- Protection d'urgence pour éviter le passage de l'eau sur la trémie conduisant à la surverse de la digue. - Relogement d'une centaine de personnes pendant 1 an
Cyclone Katrina et rupture des digues du Mississippi à La Nouvelle-Orléans	1 500	2005	Nombreuses victimes derrière des brèches malgré la décision d'évacuer
Tempête Xynthia et surverse des digues par la mer	50	2010	- Pas de brèche mais une surverse d'un mètre sur la digue de La Faute-sur-Mer ; formation d'un renard hydraulique lors du retour de l'eau à la mer - Certaines brèches liées à des canalisations
Crues de la Vistule en Pologne et rupture des digues sur un très long linéaire		2010	- 2 crues centennales consécutives (1 mois d'intervalle) - Phénomène déjà observé sur la Loire (trois pics de crue) en 1856 - Nombreuses brèches liées à la présence de terriers d'animaux fouisseurs

Tableau 16 : principaux enseignements issus de retours d'expérience issus d'autres systèmes d'endiguement (source DREAL Centre-Val de Loire)

8. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES RISQUES

8.1 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE EMPLOYÉE POUR L'ANALYSE DES RISQUES

8.1.1 Démarche générale

La démarche d'analyse de risques, telle qu'appliquée aux études de dangers des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) ou aux barrages, comprend classiquement les quatre étapes suivantes:

- l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage, telle que traitée dans le chapitre 3 ;
- l'analyse de ses modes de défaillance, pouvant être effectuée sur la base d'une méthode de type AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) ;
- la modélisation de la sûreté de fonctionnement du système et des scénarios de défaillance ; Ces scénarios peuvent être construits à partir d'une des méthodes de modélisation des scénarios de défaillance : la méthode de l'arbre des causes, la méthode de l'arbre des événements ou méthode du nœud papillon.
- l'analyse quantitative des scénarios de défaillance (probabilités d'occurrence et conséquences).

Dans le cas présent, et pour tous les autres systèmes de protection de la Nièvre étudiés par BRLi, l'analyse de risques du système d'endiguement comprend :

- la caractérisation du potentiel de rupture des tronçons qui composent le système de digues ;
- l'estimation du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement.

8.1.2 Méthodologie employée pour la caractérisation du potentiel de rupture des tronçons de digues

La démarche de caractérisation du potentiel de rupture des tronçons de digue repose sur les résultats de l'analyse fonctionnelle géotechnique du système d'endiguement (chapitre 3).

Elle est conduite en deux étapes successives.

1. Identification des scénarios de rupture envisageables.
2. Estimation de la probabilité de rupture des tronçons de digues.

8.1.2.1 *Identification des scénarios de rupture envisageables*

Dans la présente étude de dangers, il a été fait le choix de rester centré sur la méthode de diagnostic « classique » considérant les cinq « modes de rupture » de digues habituels, c'est-à-dire les 5 mécanismes de détérioration de la levée non résistante à la surverse classiquement reconnus : surverse, érosion interne, glissement de talus, érosion externe, soulèvement hydraulique.

Ces modes de rupture peuvent se décrire en termes de scénarios de défaillance des digues. 7 types différents, définis par leurs mécanismes élémentaires de détérioration prépondérants, ont été retenus :

- rupture par surverse entraînant une érosion externe régressive du talus côté val ;
- rupture par érosion interne ;
- rupture par glissement de talus côté zone protégée (côté val) puis érosion interne ;
- rupture par glissement de talus côté cours d'eau puis érosion interne ;
- rupture par affouillement de la fondation, glissement du talus côté Loire puis érosion interne ;
- rupture par érosion externe suivi d'un glissement de talus côté fleuve puis érosion interne ;
- rupture par soulèvement hydraulique (claquage) puis érosion interne.

Ces différents scénarios de rupture peuvent être classés en quatre groupes en fonction du mécanisme de détérioration initial :

- rupture par défaut de stabilité de la digue ou de sa fondation, dans lequel on retrouve les modes de rupture suivants : rupture par déstabilisation d'ensemble (non retenu) ; par glissement côté val ; par glissement côté Loire ; par soulèvement hydraulique de la fondation côté val ;
- rupture par érosion interne ;
- rupture par surverse ;
- rupture par érosion externe du pied et du talus côté cours d'eau de la digue.

Ces scénarios sont détaillés sous la forme d'arbres de défaillance simplifiés et traduits en termes de fonction et composants prépondérants pour chaque profil en travers fonctionnel type du système d'endiguement (cf. annexes C et D).

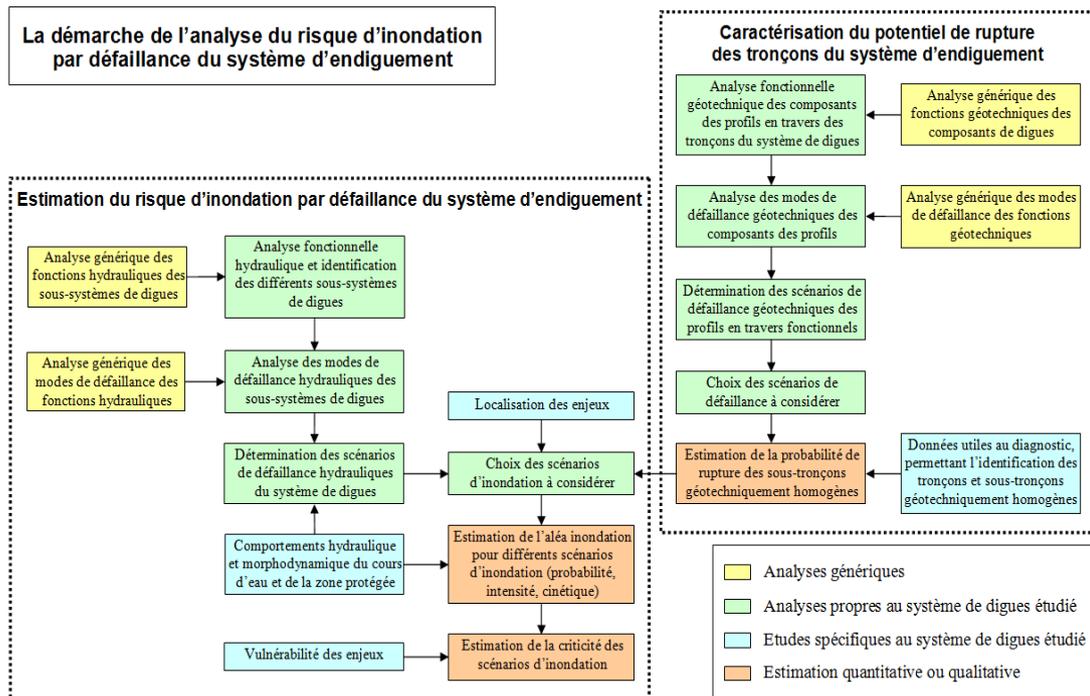


Figure 74 : Démarche de l'analyse du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement (diagramme IRSTEA)

8.1.2.2 Outil mis en œuvre pour l'estimation de la probabilité de rupture de la digue

L'estimation du potentiel de rupture du système d'endiguement consiste à évaluer les probabilités des scénarios de défaillance, tels qu'envisagés au paragraphe précédent, de chacun des tronçons de digue le constituant. Pour mémoire, la digue est découpée en tronçons de 50 m de longueur caractérisés, chacun, par un profil en travers. Ces tronçons élémentaires sont complétés si nécessaire par des profils spécifiques au droit de certaines singularités (ouvrages inclus dans les digues, maisons encastrées, profils particuliers, etc.) pour lesquelles le profil moyen n'est pas représentatif.

Ce diagnostic de fiabilité de chaque tronçon élémentaire est réalisé en utilisant le modèle de l'aléa de rupture (CARDigue) développé par le LRPC de Blois, la DREAL Centre-Val de Loire et IRSTEA dont un descriptif détaillé (hypothèses, limites, etc.) est disponible en annexes C et D.

Le modèle CARDigue exploite l'ensemble des données disponibles à chaque tronçon élémentaire :

- les données topographiques et géométriques (profil en long, pente des talus, largeur en pied de digue, etc.) ;
- le profil géotechnique type et ses différents composants
- les données hydrauliques (lignes d'eau en Loire pour différentes occurrences de crue) ;
- le recensement des anomalies (végétation, canalisations, bâtiments encastrés, terriers d'animaux, etc.) ;
- les données géotechniques (de la digue et de sa fondation) ;

- les données relatives à la gestion de la levée en période de crue (capacité à identifier un mécanisme de détérioration en cours et à mettre en œuvre des mesures d'urgence adaptées).

Ces données quantitatives sont complétées par l'expertise des résultats des études spécifiques menées dans le cadre de cette étude de dangers :

- étude de la morphodynamique du lit de la Loire (annexe 5) ;
- étude des brèches historiques ;
- études des autres actions externes et facteurs aggravants (karsts, embâcle, etc.).

Le modèle d'aléa de rupture fournit en sortie les probabilités de brèche de chacun des tronçons élémentaires, et ce :

- pour chaque mode de rupture et pour chaque crue ;
- pour un mode de rupture et pour l'ensemble des crues considérées ;
- pour une crue et pour tous les modes considérés.

Il permet également de combiner les probabilités pour obtenir la probabilité de rupture pour un ou plusieurs modes jusqu'à la crue déterminant le niveau de protection apparent du système d'endiguement (ici Q200 en amont et Q10 en aval).

Compte tenu des modes de calcul et des expertises, le modèle présente une certaine marge d'erreur (les différentes limites inhérentes au modèle de rupture CARDigue sont rappelées en annexes C et D). De fait, il est nécessaire de prendre les résultats disponibles avec prudence. Les valeurs de probabilités sont avant tout relatives. Il sera indispensable de perfectionner le modèle à l'avenir afin d'obtenir des résultats plus fiables.

Dans le cas du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, le calcul de la fiabilité est mené pour différentes crues ayant les probabilités 1/2, 1/5, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100 et 1/170 de dépassement par an, dont le débit de pointe et l'hydrogramme sont tels que définis au §6.1.2. Cet ensemble de crue théoriques a été choisi de sorte à couvrir une gamme de débits relativement large, depuis les premières sollicitations des pieds de levées jusqu'au-delà du niveau de protection apparent.

Les résultats fournis par le modèle CARDigue pour l'ensemble des tronçons élémentaires de digue sont présentés en annexe 6.

8.1.3 Méthodologie employée pour l'estimation du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement

Cette seconde partie de l'analyse de risque se déroule en plusieurs étapes successives :

1. identification et choix de scénarios d'inondation caractérisés en termes de probabilité d'occurrence ;
2. caractérisation des scénarios d'inondation en termes d'intensité et de cinétique des écoulements dans le val ;
3. estimation de la vulnérabilité des enjeux et de la gravité des scénarios d'inondation ;
4. évaluation de la criticité des scénarios d'inondation.

8.1.3.1 Identification et choix des scénarios d'inondation caractérisés en termes de probabilité d'occurrence

Un système d'endiguement est conçu pour avoir un certain mode de fonctionnement hydraulique garantissant la réalisation de l'objectif de protection recherché. L'analyse fonctionnelle (chapitre 3) a permis d'identifier les éléments qui composent l'aménagement hydraulique et de caractériser leurs fonctions au sein du système. Ces connaissances permettent alors de déterminer de quelle manière le système d'endiguement peut être amené à ne plus remplir sa fonction. On comprend ainsi comment le système de digues est supposé fonctionner, permettant de vérifier si cela est toujours possible, d'où une caractérisation des dysfonctionnements hydrauliques éventuels (par exemple, la modification relative des niveaux de crête des différents tronçons de digue du système).

Les conditions d'inondation de la zone protégée résultent de différents phénomènes provoquant l'entrée ou la rétention d'eau dans le val. Elles peuvent être le résultat du fonctionnement hydraulique normal du système de digues au-delà d'un certain niveau de crue (fonctionnement du déversoir, dépassement du niveau de protection du système de digues, remontée d'eau par remous à l'aval de l'endiguement) ou la conséquence de la défaillance d'une fonction hydraulique d'un certain sous-système de digue.

Pour mémoire (cf. chapitre 5), les principaux potentiels de dangers du système d'endiguement sont :

- les surverses sans ruptures de digue ;
- les dysfonctionnement d'ouvrages hydrauliques ponctuels (écoulements non désirés ou impossibles) ;
- les brèches sans ou après surverse (entrées d'eau brutales et importantes).

A partir des résultats de l'analyse fonctionnelle et de l'analyse de la défaillance du système de digues, une multitude de scénarios d'inondation peuvent être envisagés, se différenciant tant par leurs causes et leur localisation, que par leur intensité et leur cinétique. Pour cette raison, l'étude de dangers n'a pris en considération qu'un nombre limité de scénarios (les plus représentatifs de la diversité des situations à étudier) permettant d'apprécier l'ensemble des inondations possibles dans la zone protégée.

Les scénarios d'inondation retenus regroupent les cas les plus pénalisants en termes de gravité des conséquences, les cas les plus probables ou encore les situations permettant d'évaluer la variabilité de l'intensité de l'inondation dans la zone protégée.

Dans le cadre de la présente étude de danger, la détermination et le choix des scénarios d'inondation à étudier a reposé sur l'expertise :

- des résultats de l'analyse fonctionnelle hydraulique du système d'endiguement (cf. §3.1.4) ;

- des résultats du diagnostic de terrain des digues ;
- de la localisation des enjeux ;
- de la connaissance des écoulements des eaux d'inondation dans la zone protégée (mis en évidence par les premiers résultats de l'étude de modélisation hydraulique) ;
- du résultat de la modélisation de l'aléa de rupture.

Deux valeurs de probabilités de rupture de digue sont utilisées dans la suite du document :

- les probabilités événementielles, décrivant la probabilité de rupture au cours d'une crue (événement) d'intensité (et donc d'occurrence) donnée ; ces probabilités événementielles permettent de déterminer les niveaux de sûreté du système de protection contre les inondations ;
- les probabilités annuelles, qui permettent, à partir des probabilité événementielles et des occurrences de crue qui s'y rattachent, de qualifier la probabilité annuelle de réalisation d'un scénario de rupture ; ces probabilités annuelles sont utilisées dans l'analyse de criticité des scénarios d'inondation.

Probabilité événementielle :

Lorsqu'on évoque la probabilité de rupture pour un événement donné (i.e. une crue avec sa probabilité propre), les niveaux de probabilité sont classés selon la grille suivante :

Probabilité	probabilité événementielle en %
quasi certaine	supérieure à 85%
très forte	entre 50% et 85%
forte	entre 15% et 50%
moyenne	entre 1% et 15%
négligeable	<1%
quasi nulle	proche de 0%

Tableau 17 : Qualification des probabilités événementielles utilisées pour caractériser la probabilité de défaillance pour un événement de crue donné

On fixe le niveau de sûreté de la digue comme le niveau pour lequel la probabilité de rupture ne peut plus être considérée comme négligeable. Ce seuil entre probabilité faible et probabilité moyenne est fixée à 1%.

Probabilité annuelle :

La probabilité annuelle correspond en toute rigueur à l'intégrale des probabilités événementielles dans l'espace de probabilité des événements. En pratique, l'espace de probabilité des événements est discrétisé en un nombre limité de crues. La probabilité annuelle est ainsi approchée en sommant l'ensemble des produits probabilité événementielle x intervalle de probabilité rattaché à chaque événement :

$$P_{\text{annuelle}} = \int_0^1 P_{\text{événementielle}}(P_{\text{non dépassement}}) dP_{\text{non dépassement}}$$

$$P_{annuelle} \approx \sum_{i=1}^n P_{évènementielle}(Q_i) \times \Delta P(Q_i)$$

Avec n = nombre de crues discrétisant l'espace des évènements et $\Delta P(Q_i)$ = intervalle de probabilité rattaché à l'évènement de débit de pointe Q_i .

Le graphique suivant illustre l'exemple d'un tel calcul sur cas d'une digue ayant une probabilité évènementielle de rupture nulle pour les crues inférieures à Q20, de 1% pour Q20, 10% pour Q50, de 20% pour Q70, 50% pour Q100, 80% pour Q170 et 100% au-delà de Q200.

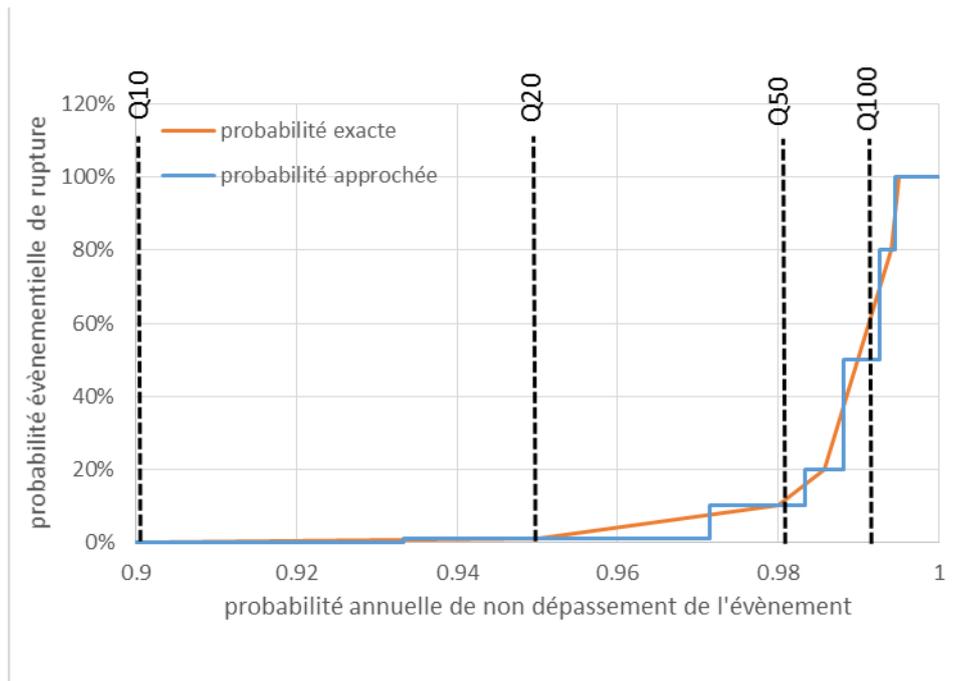


Figure 75 : Exemple de discrétisation de l'espace des évènements et du calcul de la probabilité annuelle d'un scénario de brèche

Qualification de la probabilité de rupture annuelle	Probabilité par année	
	en %	temps de retour
très probable	> 10%	<10 ans
probable	Entre 1% et 10%	10 - 100 ans
moyennement probable	entre 0,5% et 1%	100 - 200 ans
peu probable	entre 0,2% et 0,5%	200 - 500 ans
très peu probable	entre 0,1% et 0,2%	500 - 1 000 ans
improbable	entre 0,01% et 0,1%	1 000 - 10 000 ans
très improbable	< 0,01%	> 10 000 ans

Tableau 18 : Qualification des probabilités annuelles utilisées pour caractériser les scénarios de défaillance

Probabilité d'un scénario d'inondation

La probabilité d'un scénario d'inondation est égale au produit de la probabilité événementielle de défaillance pour la crue déclenchant la rupture de l'ouvrage par la probabilité du scénario hydrologique simulé.

Des informations complémentaires sur le calcul des probabilités sont également fournies dans les annexes C et D.

8.1.3.2 Caractérisation des scénarios d'inondation en termes d'intensité et de cinétique des écoulements dans le val

L'aléa et la vulnérabilité des enjeux sont les deux composantes du risque. Un aléa est défini à la fois par sa probabilité de réalisation et par l'intensité des phénomènes dangereux qui lui sont associés. Ainsi, la caractérisation de l'aléa d'un scénario d'inondation de probabilité connue correspond à l'estimation zonale de la cinétique et de l'intensité des phénomènes dangereux qui accompagnent cette inondation. Dans le cas d'une étude de dangers de digues, ce travail doit être réalisé pour chacun des scénarios d'inondation considérés.

8.1.3.2.1 Outils mis en œuvre

Pour l'étude de dangers du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, le modèle hydraulique LB11 a permis de simuler la propagation des inondations dans la zone protégée et d'en évaluer les paramètres d'écoulement : zone inondée, hauteur d'eau, vitesse verticale ou montée de l'eau, temps de propagation.

Le modèle LB11 est un modèle filaire-casiers mis au point avec le logiciel Hydrariv par le SPC Loire-Cher-Indre en 2013, dans le but de disposer d'un outil de prévision des crues en remplacement de l'outil précédent sur le Loire Bourguignonne qui était un modèle de propagation simplifié. Il couvre le linéaire de la Loire de Gilly à Nevers. Il convient de noter que dans le cadre de la présente étude le val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin a été modélisé de manière plus fine que dans LB11 avec un meilleur maillage des casiers et une densification des liaisons.

Le logiciel HydraRiv dispose d'une fonctionnalité spécifique permettant de simuler les brèches. Celles-ci sont modélisées par l'intermédiaire de liaisons régies par des lois de type « seuil déversant » dont la géométrie (cote de déversement et largeur) évolue au cours de la crue : la brèche est supposée s'initier depuis la crête de digue jusqu'à sa cote finale, puis s'élargir, suivant une chronologie fixée par l'utilisateur, jusqu'à sa largeur finale. De fait, le calcul des débits transitant par la brèche est totalement géré par HydraRiv en fonction des conditions hydrauliques en Loire et dans le val en aval de la brèche.

8.1.3.2.2 Critères d'aléa retenus

A défaut d'une méthodologie bien établie, les paramètres vitesse verticale et temps de propagation n'ont pas été pris en compte dans le cadre de cette étude de dangers. La caractérisation de l'aléa d'inondation s'est donc basée sur la seule hauteur d'eau maximale. Ces hauteurs d'eau sont obtenues par spatialisation des cotes casiers calculées par le modèle hydraulique puis soustraction des cotes du terrain naturel issues du MNT Loire amont (cf. préambule « information au lecteur et mise en garde »).

Les ordres de grandeur de vitesse verticale et de temps de propagation sont exploités qualitativement afin compléter l'approche quantitative précitée.

Les données quantitatives issues des modélisations de scénario ont été classées sur la base d'une grille d'intensité de l'aléa d'inondation prédéfinie. Elles ont ensuite été représentées graphiquement sous la forme de couches SIG destinées à estimer le risque associé à chacun des scénarios d'inondation par croisement avec la vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée.

hauteur d'eau	supérieure à 2,5 m	4. Très fort	5. zone de destruction du bâti
	entre 1 m et 2,5 m	3. Fort	
	entre 50 cm et 1 m	2. Moyen	
	entre 0 et 50 cm	1. Faible	

aval immédiat brèche

Tableau 19 : Grille de qualification de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau

8.1.3.3 Estimation de la vulnérabilité des enjeux et de la gravité des scénarios d'inondation : critères de gravité retenus

Par définition, la vulnérabilité d'un enjeu donné correspond au niveau de conséquences prévisibles en fonction de l'intensité d'un aléa. Ainsi, la vulnérabilité d'une zone protégée par un système d'endiguement traduit la nature et l'importance des dommages auxquels les enjeux qui composent ce territoire se voient potentiellement exposés pour les différentes intensités d'événements d'inondation susceptibles de se réaliser. Ces dommages sont de nature variée et la plupart du temps difficilement comparables.

Il a été fait le choix d'apprécier la gravité des scénarios étudiés au travers de l'analyse de la vulnérabilité des populations présentes dans la zone protégée (vies humaines).

L'estimation de la gravité d'un scénario repose ainsi sur le dénombrement de cette population dans chacune des 5 classes d'aléa précédemment définies. Ce dénombrement est réalisé par croisement sous SIG des données de population affectée à chaque bâtiment (issues de l'étude d'enjeux présentée au chapitre 3) avec les données d'aléa de chaque scénario.

Un indicateur synthétique de « population en danger » est ensuite calculé selon la grille ci-après. Cet indicateur est plus pertinent que le seul nombre total de personnes situées dans la zone inondée puisqu'il intègre une pondération d'autant plus importante que le niveau d'aléa est fort.

intensité de l'aléa d'inondation	% de la population en danger dans la classe d'aléa considérée
5. Zone de destruction du bâti	100%
4. Très fort	70%
3. Fort	30%
2. Moyen	10%
1. Faible	0%

Tableau 20 : Table de correspondance entre aléa et vulnérabilité de la population en danger

Même si les ratios déterminant la vulnérabilité de la population donnent des résultats cohérents avec la dangerosité réelle des phénomènes et les capacités de mise en sécurité de la population, ils n'ont pas pour objectif de refléter fidèlement la réalité de dangerosité. Ils permettent avant tout la comparaison et le classement des différents scénarios d'inondation retenus dans le cadre de l'étude de dangers.

Le nombre de personnes en danger détermine ainsi la gravité d'un scénario selon la grille ci-après commune à l'ensemble des études de dangers des levées de la Loire moyenne.

Gravité du scénario d'inondation	Nombre de personnes en danger
5. Désastreux	Nbre > 10 000
4. Catastrophique	1 000 < Nbre ≤ 10 000
3. Important	100 < Nbre ≤ 1 000
2. Sérieux	10 < Nbre ≤ 100
1. Modéré	Nbre ≤ 10 personnes

Tableau 21 : Classes de gravité des scénarios d'inondation

Les enjeux stratégiques et sensibles ont également été repérés (services de secours, centres de décision, hôpitaux...). Leur localisation dans une des classes d'intensité d'aléa d'inondation a permis de pondérer la gravité des conséquences humaines du scénario considéré et éventuellement de surclasser le scénario.

8.1.3.4 **Evaluation de la criticité des scénarios d'inondation**

L'évaluation de la criticité des scénarios d'inondation repose sur l'utilisation d'une grille de criticité croisant la probabilité de réalisation du scénario et la gravité des conséquences du scénario. Elle a pour vocation de hiérarchiser les scénarios et de mettre en évidence les situations les plus préoccupantes en termes d'acceptabilité du risque.

Les données d'entrée de la grille de criticité sont :

- la probabilité de réalisation du scénario d'inondation ;
- la gravité des conséquences de ce scénario.

Les classes d'acceptabilité sont :

- risque acceptable ;
- risque préoccupant ;
- risque intolérable.

		Probabilité du scénario						
		0.01%	0.1%	0.2%	0.5%	1%	10%	
		très improbable	improbable	très peu probable	peu probable	moyennement probable	probable	très probable
gravité du scénario d'inondation	5. désastreux	risque acceptable			risque préoccupant			
	4. catastrophique	risque acceptable			risque intolérable			
	3. important	risque acceptable			risque intolérable			
	2. sérieux	risque acceptable			risque intolérable			
	1. modéré	risque acceptable			risque intolérable			

Tableau 22 : Grille de criticité des scénarios d'inondation

8.2 DÉTERMINATION DES SCÉNARIOS DE DÉFAILLANCE

Sur les levées domaniales, les probabilités de rupture ont été calculées pour chaque crue modélisée, chaque scénario de défaillance et chacun des 153 profils en travers du système de protection, espacés tous les 50 mètres.

La digue domaniale de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est découpée en cinq tronçons homogènes (cf. VTA et chapitre 3).

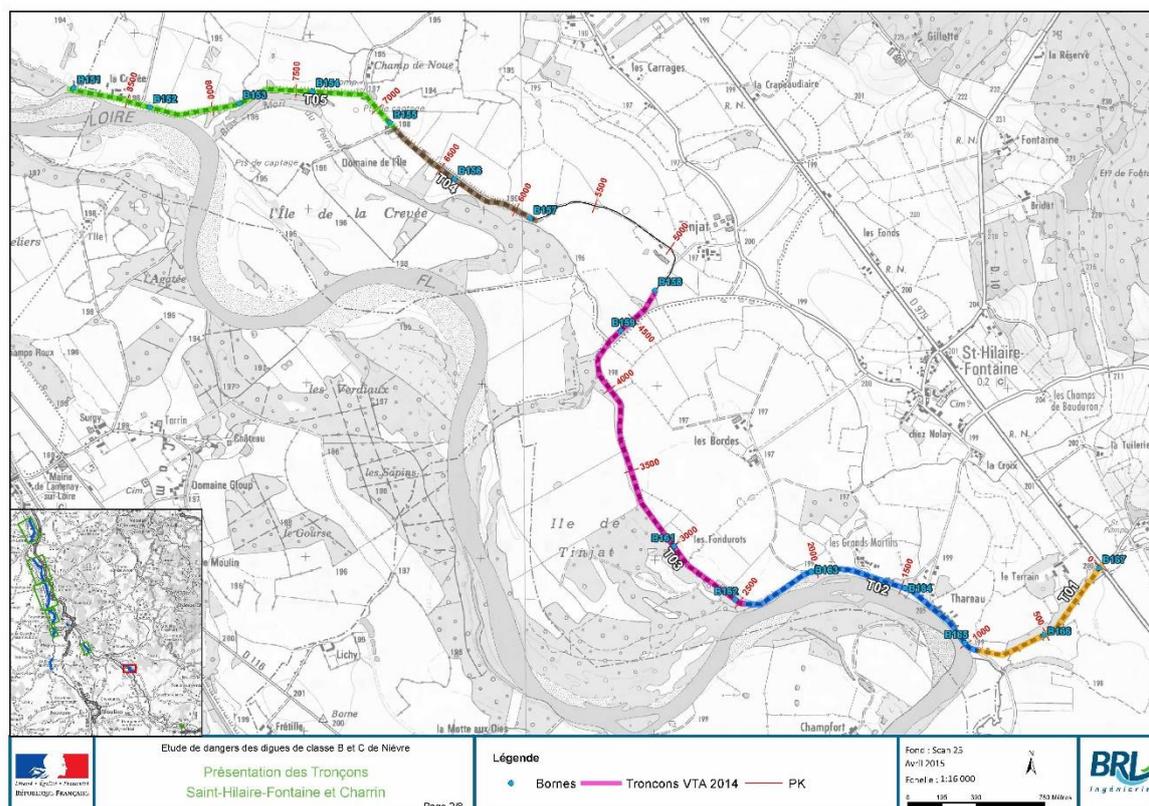


Figure 76 : carte de localisation des tronçons homogènes VTA (rappel)

8.2.1 Mode ou circonstances de défaillance de la digue domaniale

Chaque profil en travers espacé de 50 mètres a fait l'objet d'une analyse par le modèle d'aléas de rupture dont les résultats sont synthétisés dans une fiche spécifique (cf. annexe 6).

8.2.1.1 Rupture par surverse

La surverse intervient lorsque le niveau des eaux dépasse le niveau du sommet de la digue. L'eau qui passe alors par-dessus coule dans le val et, en se déversant, érode le talus en entraînant les matériaux constitutifs de la digue. L'érosion s'accélère rapidement avec l'augmentation de la pente du talus érodé et se développe de façon régressive jusqu'à aboutir à une rupture totale de la digue. L'initiation de ce phénomène est freinée par la qualité de l'enherbement du talus et par sa faible pente. Elle est en revanche facilitée par la concentration ou la perturbation des écoulements sur le talus.

La comparaison des lignes d'eau pour les différentes crues et du profil en long de la crête des digues permet d'identifier les zones de surverses.

Comme décrit dans les notes de principe et d'application jointes en annexes C et D, dans le modèle d'estimation de l'aléa de rupture (modèle CARDigue), la probabilité d'apparition de la surverse est influencée par différents paramètres dont la présence d'une rehausse côté Loire (considérée fusible, comme c'est le cas pour les banquettes en terre simple, ou non) Elle intègre également une incertitude sur les lignes d'eau et la topographie de la digue (probabilité non nulle si la revanche est inférieure à 50 cm). Aussi, une probabilité de rupture par surverse peut ne pas être nulle alors même que le niveau de protection apparent n'est pas atteint.

L'analyse fait apparaître des revanches (différence entre la hauteur des eaux de crues et le sommet de la digue) vis-à-vis de la surverse inférieure à 50 cm pour la crue Q100 sur la levée de Thareau et pour la crue Q200 sur la levée de Charrin. A noter que la partie centrale entre ces levées fait apparaître une digue arasée submergée dès la crue Q5.

Le tableau suivant présente les revanches pour tous les profils en travers avec notamment précision de type de banquette retenue.

Profil	Abscisse sur le tronçon	Tronçon	Calculs des hauteurs de surverse Hs (=ZQ _T - Z4)								
			Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	
1	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK0	T01	-2.76	-2.39	-2.24	-2.15	-2.03	-1.54	-1.45	-1.28	
2	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK50	T01	-2.40	-2.02	-1.87	-1.78	-1.67	-1.18	-1.09	-0.92	
3	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK100	T01	-2.27	-1.90	-1.74	-1.66	-1.54	-1.05	-0.96	-0.79	
4	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK150	T01	-2.33	-1.96	-1.80	-1.72	-1.60	-1.11	-1.02	-0.85	
5	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK200	T01	-2.21	-1.83	-1.68	-1.59	-1.48	-0.98	-0.89	-0.73	
6	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK250	T01	-2.17	-1.79	-1.64	-1.55	-1.44	-0.94	-0.85	-0.69	
7	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK300	T01	-2.23	-1.86	-1.70	-1.62	-1.50	-1.01	-0.92	-0.75	
8	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK350	T01	-2.21	-1.84	-1.68	-1.60	-1.48	-0.99	-0.90	-0.73	
9	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK400	T01	-2.10	-1.73	-1.58	-1.49	-1.37	-0.88	-0.79	-0.63	
10	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK450	T01	-2.24	-1.86	-1.71	-1.62	-1.51	-1.01	-0.92	-0.76	
11	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK500	T01	-2.19	-1.82	-1.67	-1.58	-1.46	-0.97	-0.88	-0.71	
12	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK550	T01	-2.13	-1.76	-1.61	-1.52	-1.40	-0.91	-0.82	-0.65	
13	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK600	T01	-2.14	-1.76	-1.61	-1.52	-1.41	-0.91	-0.82	-0.66	
14	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	T01	-2.03	-1.65	-1.50	-1.41	-1.30	-0.80	-0.71	-0.55	
15	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	T01	-2.01	-1.63	-1.48	-1.39	-1.28	-0.78	-0.69	-0.53	
16	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	T01	-2.08	-1.70	-1.55	-1.46	-1.34	-0.85	-0.76	-0.59	
17	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	T01	-2.21	-1.83	-1.68	-1.59	-1.48	-0.98	-0.89	-0.73	
18	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK850	T01	-2.09	-1.71	-1.56	-1.47	-1.36	-0.86	-0.77	-0.61	
19	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK900	T01	-2.17	-1.79	-1.64	-1.55	-1.44	-0.94	-0.85	-0.69	
20	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK950	T01	-2.05	-1.67	-1.52	-1.43	-1.31	-0.82	-0.73	-0.56	
21	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1000	T02	-2.22	-1.84	-1.69	-1.60	-1.48	-0.98	-0.89	-0.73	
22	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1050	T02	-2.08	-1.70	-1.55	-1.46	-1.34	-0.84	-0.75	-0.58	
23	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1100	T02	-2.13	-1.75	-1.59	-1.50	-1.39	-0.88	-0.79	-0.63	
24	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1150	T02	-1.84	-1.46	-1.30	-1.21	-1.09	-0.59	-0.50	-0.33	
25	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1200	T02	-1.96	-1.57	-1.41	-1.32	-1.20	-0.70	-0.60	-0.43	
26	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1250	T02	-2.01	-1.62	-1.46	-1.37	-1.25	-0.74	-0.65	-0.48	
27	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1300	T02	-2.00	-1.61	-1.45	-1.35	-1.23	-0.72	-0.63	-0.46	
28	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1350	T02	-1.92	-1.53	-1.37	-1.27	-1.15	-0.64	-0.54	-0.37	
29	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1400	T02	-1.98	-1.58	-1.41	-1.32	-1.20	-0.68	-0.59	-0.42	
30	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1450	T02	-1.81	-1.41	-1.25	-1.15	-1.03	-0.51	-0.42	-0.24	
31	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1500	T02	-1.93	-1.52	-1.36	-1.26	-1.14	-0.61	-0.52	-0.35	
32	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1550	T02	-1.81	-1.40	-1.23	-1.14	-1.01	-0.49	-0.39	-0.22	
33	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	T02	-1.98	-1.57	-1.40	-1.30	-1.18	-0.65	-0.56	-0.38	
34	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	T02	-2.03	-1.62	-1.45	-1.35	-1.22	-0.69	-0.60	-0.43	
35	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1700	T02	-1.91	-1.49	-1.32	-1.22	-1.10	-0.56	-0.47	-0.30	
36	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	T02	-1.85	-1.43	-1.25	-1.16	-1.03	-0.50	-0.40	-0.23	
37	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	T02	-1.88	-1.45	-1.28	-1.18	-1.05	-0.52	-0.42	-0.25	
38	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	T02	-1.95	-1.52	-1.34	-1.24	-1.11	-0.58	-0.48	-0.31	
39	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1900	T02	-2.10	-1.66	-1.48	-1.38	-1.25	-0.72	-0.62	-0.45	
40	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1950	T02	-1.83	-1.39	-1.21	-1.11	-0.98	-0.44	-0.35	-0.17	
41	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2000	T02	-1.90	-1.46	-1.28	-1.18	-1.05	-0.51	-0.41	-0.24	
42	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2050	T02	-1.93	-1.48	-1.30	-1.20	-1.07	-0.53	-0.43	-0.26	
43	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2100	T02	-1.66	-1.20	-1.02	-0.92	-0.79	-0.25	-0.15	0.02	
44	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2150	T02	-1.70	-1.24	-1.06	-0.95	-0.82	-0.28	-0.19	-0.01	
45	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2200	T02	-1.67	-1.21	-1.03	-0.93	-0.80	-0.25	-0.16	0.02	
46	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2250	T02	-1.86	-1.39	-1.21	-1.11	-0.98	-0.43	-0.34	-0.16	
47	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2300	T02	-1.91	-1.44	-1.26	-1.16	-1.02	-0.48	-0.39	-0.21	
48	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2350	T02	-1.82	-1.35	-1.16	-1.06	-0.92	-0.38	-0.29	-0.11	
49	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2400	T02	-1.94	-1.46	-1.27	-1.17	-1.04	-0.49	-0.40	-0.22	
50	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2450	T02	-1.99	-1.50	-1.31	-1.20	-1.07	-0.53	-0.43	-0.26	
51	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2500	T03	-2.23	-1.72	-1.53	-1.42	-1.29	-0.76	-0.66	-0.49	
52	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2550	T03	-2.28	-1.76	-1.57	-1.46	-1.33	-0.80	-0.70	-0.53	
53	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2600	T03	-2.30	-1.78	-1.59	-1.49	-1.36	-0.82	-0.73	-0.56	
54	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2650	T03	-2.19	-1.68	-1.49	-1.38	-1.25	-0.72	-0.63	-0.46	
55	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2700	T03	-2.32	-1.80	-1.61	-1.51	-1.38	-0.85	-0.76	-0.58	
56	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2750	T03	-2.17	-1.66	-1.47	-1.36	-1.23	-0.71	-0.61	-0.44	
57	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2800	T03	-2.47	-1.97	-1.78	-1.68	-1.55	-1.03	-0.93	-0.76	
58	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2850	T03	-2.41	-1.91	-1.73	-1.63	-1.50	-0.98	-0.89	-0.72	
59	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2900	T03	-2.33	-1.84	-1.66	-1.56	-1.43	-0.91	-0.82	-0.65	
60	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2950	T03	-2.29	-1.80	-1.62	-1.52	-1.40	-0.88	-0.79	-0.62	
61	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3000	T03	-2.28	-1.79	-1.62	-1.52	-1.39	-0.88	-0.79	-0.62	
62	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3050	T03	-2.20	-1.72	-1.54	-1.44	-1.32	-0.81	-0.72	-0.55	
63	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3100	T03	-2.06	-1.58	-1.40	-1.31	-1.19	-0.68	-0.59	-0.42	
64	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3150	T03	-2.42	-1.95	-1.77	-1.68	-1.56	-1.05	-0.96	-0.79	
65	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3200	T03	-2.39	-1.92	-1.74	-1.65	-1.53	-1.02	-0.93	-0.77	
66	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3250	T03	-2.42	-1.95	-1.78	-1.68	-1.56	-1.06	-0.97	-0.81	
67	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3300	T03	-2.44	-1.98	-1.81	-1.71	-1.59	-1.09	-1.00	-0.84	
68	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3350	T03	-2.29	-1.84	-1.67	-1.57	-1.45	-0.95	-0.87	-0.70	
69	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3400	T03	-2.15	-1.70	-1.53	-1.44	-1.32	-0.82	-0.73	-0.57	
70	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3450	T03	-2.35	-1.90	-1.73	-1.64	-1.52	-1.02	-0.94	-0.77	
71	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3500	T03	-2.46	-2.01	-1.84	-1.75	-1.64	-1.14	-1.05	-0.89	
72	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3550	T03	-2.48	-2.04	-1.87	-1.78	-1.66	-1.17	-1.08	-0.92	
73	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3600	T03	-2.40	-1.95	-1.79	-1.70	-1.58	-1.09	-1.00	-0.84	
74	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3650	T03	-2.25	-1.81	-1.65	-1.56	-1.44	-0.95	-0.86	-0.70	
75	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3700	T03	-2.32	-1.88	-1.71	-1.63	-1.51	-1.02	-0.93	-0.77	
76	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3750	T03	-2.31	-1.87	-1.71	-1.62	-1.51	-1.02	-0.93	-0.77	
77	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3800	T03	-2.15	-1.71	-1.55	-1.47	-1.35	-0.86	-0.77	-0.61	
78	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3850	T03	-1.98	-1.55	-1.39	-1.31	-1.19	-0.70	-0.62	-0.46	
79	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3900	T03	-2.18	-1.76	-1.60	-1.51	-1.40	-0.91	-0.83	-0.67	
80	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3950	T03	-2.13	-1.71	-1.55	-1.46	-1.35	-0.86	-0.78	-0.62	
81	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4000	T03	-2.01	-1.58	-1.43	-1.34	-1.23	-0.74	-0.66	-0.50	

Profil	Abscisse sur le tronçon	Tronçon	Calculs des hauteurs de surverse Hs (=ZQ _T - Z4)								
			Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	
82	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4050	T03	-2.05	-1.62	-1.47	-1.38	-1.27	-0.78	-0.70	-0.54	
83	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4100	T03	-1.16	-0.74	-0.56	-0.49	-0.38	0.10	0.19	0.35	
84	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4150	T03	-0.24	0.18	0.34	0.43	0.54	1.02	1.11	1.27	
85	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4200	T03	-0.28	0.14	0.30	0.39	0.50	0.98	1.07	1.23	
86	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4250	T03	-0.70	-0.28	-0.12	-0.04	0.06	0.56	0.64	0.81	
87	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4300	T03	-0.55	-0.13	0.03	0.11	0.23	0.71	0.79	0.96	
88	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4350	T03	-0.76	-0.34	-0.18	-0.10	0.02	0.50	0.58	0.75	
89	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4400	T03	-0.71	-0.29	-0.13	-0.05	0.07	0.55	0.63	0.79	
90	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4450	T03	-0.71	-0.29	-0.13	-0.05	0.07	0.55	0.64	0.80	
91	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4500	T03	-0.88	-0.46	-0.30	-0.21	-0.10	0.38	0.47	0.63	
92	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4550	T03	-0.80	-0.37	-0.21	-0.13	-0.01	0.47	0.56	0.72	
93	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4600	T03	-0.26	0.16	0.32	0.41	0.52	1.01	1.09	1.25	
94	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4650	T03	-0.41	0.01	0.17	0.26	0.37	0.86	0.94	1.11	
95	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK5900	T04	-0.89	-0.45	-0.29	-0.20	-0.09	0.41	0.49	0.66	
96	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK5950	T04	-0.72	-0.29	-0.13	-0.04	0.08	0.57	0.66	0.83	
97	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6000	T04	-0.55	-0.12	0.04	0.13	0.25	0.75	0.83	1.00	
98	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6050	T04	-0.69	-0.25	-0.09	0.00	0.12	0.61	0.70	0.87	
99	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6100	T04	-0.69	-0.26	-0.10	-0.01	0.11	0.61	0.70	0.87	
100	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6150	T04	-0.45	-0.01	0.15	0.24	0.36	0.85	0.94	1.11	
101	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6200	T04	-1.38	-0.94	-0.78	-0.69	-0.57	-0.07	0.02	0.19	
102	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6250	T04	-2.14	-1.70	-1.54	-1.45	-1.33	-0.83	-0.74	-0.57	
103	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6300	T04	-2.15	-1.71	-1.54	-1.45	-1.33	-0.83	-0.74	-0.57	
104	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6350	T04	-2.17	-1.73	-1.57	-1.47	-1.35	-0.85	-0.76	-0.59	
105	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6400	T04	-2.24	-1.80	-1.63	-1.54	-1.42	-0.91	-0.82	-0.65	
106	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6450	T04	-2.13	-1.69	-1.52	-1.43	-1.31	-0.80	-0.71	-0.54	
107	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6500	T04	-2.19	-1.75	-1.58	-1.49	-1.37	-0.86	-0.77	-0.60	
108	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6550	T04	-2.17	-1.72	-1.55	-1.46	-1.34	-0.83	-0.74	-0.57	
109	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6600	T04	-2.14	-1.69	-1.53	-1.43	-1.31	-0.80	-0.71	-0.54	
110	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6650	T04	-2.18	-1.73	-1.56	-1.47	-1.35	-0.84	-0.75	-0.57	
111	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6700	T04	-2.17	-1.72	-1.55	-1.45	-1.33	-0.82	-0.73	-0.56	
112	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6750	T04	-2.18	-1.73	-1.56	-1.47	-1.34	-0.83	-0.74	-0.57	
113	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6800	T04	-2.31	-1.85	-1.68	-1.59	-1.46	-0.95	-0.86	-0.69	
114	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6850	T04	-2.20	-1.75	-1.58	-1.48	-1.36	-0.84	-0.75	-0.58	
115	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6900	T05	-2.32	-1.86	-1.69	-1.59	-1.47	-0.95	-0.86	-0.69	
116	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6950	T05	-2.29	-1.83	-1.66	-1.56	-1.44	-0.92	-0.83	-0.65	
117	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7000	T05	-2.45	-1.99	-1.82	-1.73	-1.60	-1.08	-0.99	-0.82	
118	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7050	T05	-2.17	-1.70	-1.53	-1.44	-1.31	-0.79	-0.70	-0.53	
119	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7100	T05	-1.95	-1.48	-1.31	-1.21	-1.09	-0.57	-0.48	-0.30	
120	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7150	T05	-2.28	-1.81	-1.64	-1.54	-1.42	-0.90	-0.81	-0.63	
121	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7200	T05	-2.16	-1.69	-1.52	-1.43	-1.30	-0.78	-0.69	-0.51	
122	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7250	T05	-2.22	-1.75	-1.58	-1.48	-1.36	-0.83	-0.74	-0.57	
123	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7300	T05	-2.08	-1.61	-1.44	-1.34	-1.22	-0.69	-0.60	-0.43	
124	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7350	T05	-2.20	-1.73	-1.56	-1.46	-1.33	-0.81	-0.72	-0.54	
125	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7400	T05	-2.06	-1.59	-1.42	-1.32	-1.19	-0.67	-0.58	-0.40	
126	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7450	T05	-2.09	-1.61	-1.44	-1.34	-1.21	-0.69	-0.60	-0.42	
127	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7500	T05	-2.35	-1.87	-1.69	-1.60	-1.47	-0.95	-0.85	-0.68	
128	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7550	T05	-2.21	-1.73	-1.56	-1.46	-1.33	-0.81	-0.72	-0.54	
129	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7600	T05	-2.32	-1.83	-1.66	-1.56	-1.43	-0.91	-0.81	-0.64	
130	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7650	T05	-2.12	-1.64	-1.46	-1.36	-1.24	-0.71	-0.62	-0.44	
131	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7700	T05	-2.27	-1.78	-1.61	-1.51	-1.38	-0.86	-0.76	-0.59	
132	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7750	T05	-2.32	-1.82	-1.64	-1.54	-1.41	-0.88	-0.79	-0.61	
133	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7800	T05	-2.40	-1.90	-1.72	-1.62	-1.49	-0.95	-0.85	-0.67	
134	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7850	T05	-2.63	-2.13	-1.95	-1.85	-1.72	-1.17	-1.08	-0.89	
135	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7900	T05	-2.81	-2.32	-2.14	-2.04	-1.91	-1.36	-1.26	-1.08	
136	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7950	T05	-3.00	-2.51	-2.33	-2.23	-2.10	-1.55	-1.46	-1.27	
137	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8000	T05	-2.89	-2.40	-2.22	-2.12	-1.99	-1.44	-1.34	-1.16	
138	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8050	T05	-2.95	-2.45	-2.28	-2.18	-2.04	-1.49	-1.40	-1.21	
139	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8100	T05	-2.91	-2.42	-2.24	-2.14	-2.01	-1.46	-1.36	-1.17	
140	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8150	T05	-2.93	-2.44	-2.26	-2.16	-2.03	-1.47	-1.38	-1.19	
141	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8200	T05	-2.90	-2.41	-2.23	-2.13	-2.00	-1.45	-1.35	-1.16	
142	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8250	T05	-2.93	-2.45	-2.27	-2.17	-2.03	-1.48	-1.38	-1.19	
143	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8300	T05	-2.93	-2.44	-2.26	-2.16	-2.03	-1.48	-1.38	-1.19	
144	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8350	T05	-2.98	-2.49	-2.31	-2.21	-2.08	-1.52	-1.43	-1.24	
145	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8400	T05	-3.00	-2.52	-2.34	-2.24	-2.10	-1.55	-1.45	-1.26	
146	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8450	T05	-3.00	-2.52	-2.34	-2.24	-2.11	-1.55	-1.45	-1.26	
147	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8500	T05	-3.11	-2.63	-2.45	-2.35	-2.22	-1.66	-1.56	-1.37	
148	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8550	T05	-2.86	-2.38	-2.20	-2.10	-1.97	-1.41	-1.31	-1.12	
149	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8600	T05	-2.71	-2.24	-2.06	-1.95	-1.82	-1.27	-1.17	-0.97	
150	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8650	T05	-2.91	-2.44	-2.26	-2.16	-2.02	-1.47	-1.37	-1.17	
151	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8700	T05	-2.90	-2.43	-2.25	-2.15	-2.02	-1.46	-1.36	-1.16	
152	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8750	T05	-2.79	-2.32	-2.14	-2.04	-1.91	-1.35	-1.25	-1.06	
153	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8800	T05	-2.82	-2.35	-2.17	-2.06	-1.93	-1.37	-1.27	-1.08	

Tableau 23 : Hauteur de surverse (+) ou de revanche (-) au droit de la digue (m)

Probabilité de rupture :

Le risque de rupture par surverse est très improbable sur la quasi-totalité du linéaire des 2 levés, hormis au point bas du système d'endiguement (PK2200) où le risque est peu probable.

De fortes probabilités annuelles sont observées sur le tronçon de digue arasée (du PK4100 au PK6200), restant à relativiser compte tenu que la crête de digue est quasiment au même niveau que le terrain naturel.

Identification des Profils SHF-CHARIN			Surverse								Surverse
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléas de rupture : $P_{AT} \times Pr_A T$								Aléa Annuel
			Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	Σ
43	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2100	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	5.8%	26.0%	0.17%
45	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2200	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	5.8%	36.4%	0.23%
83	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4100	T03	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	2.1%	8.3%	8.3%	10.4%	0.21%
84	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4150	T03	6.5%	52.0%	52.0%	52.0%	52.0%	52.0%	52.0%	52.0%	19.50%
85	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4200	T03	4.0%	32.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	13.14%
86	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4250	T03	0.0%	2.0%	3.2%	3.6%	20.0%	40.0%	40.0%	40.0%	1.60%
87	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4300	T03	0.0%	4.2%	26.0%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	5.55%
88	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4350	T03	0.0%	2.1%	4.2%	4.7%	26.0%	52.0%	52.0%	52.0%	1.98%
89	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4400	T03	0.0%	2.6%	4.2%	4.7%	26.0%	52.0%	52.0%	52.0%	2.08%
90	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4450	T03	0.0%	2.6%	4.2%	4.7%	26.0%	26.0%	26.0%	26.0%	1.73%
91	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4500	T03	0.0%	2.2%	2.2%	2.6%	4.7%	52.0%	52.0%	52.0%	1.45%
92	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4550	T03	0.0%	3.7%	3.7%	5.8%	6.6%	52.0%	52.0%	52.0%	2.01%
93	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4600	T03	5.2%	41.6%	52.0%	52.0%	52.0%	52.0%	52.0%	52.0%	17.09%
94	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4650	T03	3.1%	36.4%	58.2%	72.8%	72.8%	72.8%	72.8%	72.8%	17.26%
95	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK5900	T04	0.0%	3.1%	5.2%	5.2%	9.4%	100.0%	100.0%	100.0%	2.66%
96	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK5950	T04	0.0%	3.3%	5.2%	5.9%	32.5%	65.0%	65.0%	65.0%	2.60%
97	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6000	T04	0.0%	10.4%	65.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	13.60%
98	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6050	T04	0.0%	3.3%	5.9%	32.5%	52.0%	65.0%	65.0%	65.0%	3.96%
99	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6100	T04	0.0%	3.3%	5.9%	5.9%	52.0%	65.0%	65.0%	65.0%	2.95%
100	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6150	T04	3.1%	8.4%	74.9%	93.6%	93.6%	93.6%	93.6%	93.6%	14.59%
101	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6200	T04	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.9%	32.5%	52.0%	0.38%

Tableau 24 : Probabilité de rupture des profils en travers soumis à la surverse ($\Sigma > 0,10\%$)

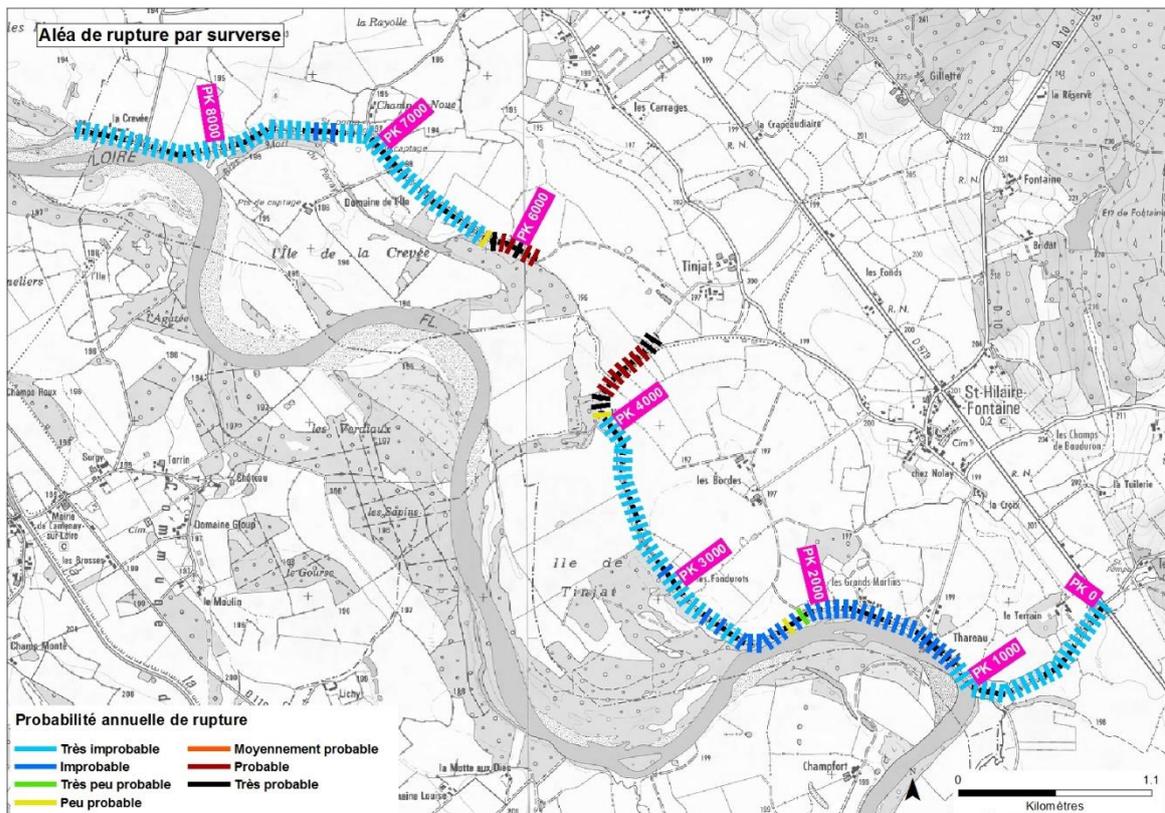
Carte de synthèse :

Figure 77 : carte de probabilité annuelle de rupture par surverse

8.2.1.2 Rupture par érosion interne

L'érosion interne est un phénomène lié à la qualité des matériaux constitutifs de la digue. Elle se produit lorsque deux conditions sont réunies :

- quand l'eau est capable de traverser la digue lorsque celle-ci est en charge ;
- quand les matériaux constitutifs de l'ouvrage sont entraînés par l'eau circulant dans la digue vers l'extérieur. Les particules les plus fines sont capables de traverser le squelette constitué par les éléments les plus gros, puis des éléments de plus en plus gros sont mobilisés et entraînés à l'extérieur de la digue. Le phénomène s'accélère avec la perméabilité du matériau qui augmente avec le départ des éléments les plus fins, pouvant ainsi engendrer une brèche.

L'érosion interne peut prendre plusieurs formes, de l'érosion généralisée, ou suffusion, à l'érosion localisée (de contact, de conduit ou régressive). L'érosion généralisée se produit lorsque la digue est saturée d'eau et lorsque les matériaux sont sensibles à l'érosion interne. L'érosion localisée se produit à partir d'une irrégularité dans la perméabilité du corps de la digue. Ce phénomène est couramment appelé renard hydraulique. Il est souvent lié à des facteurs externes tels que :

- les terriers d'animaux fouisseurs ;
- les racines d'arbres ;
- les ouvrages traversant ou inclus, tels que les canalisations.

L'érosion interne est un phénomène capable de provoquer à lui seul la rupture d'une digue. Il peut néanmoins être également associé à d'autres mécanismes de rupture, l'érosion interne restant le mécanisme final de la rupture.

Sur la base de l'arbre de défaillance retenu (cf. annexes C et D), la probabilité de rupture par érosion interne correspond au produit de la probabilité d'apparition d'érosion interne et de la probabilité de rupture une fois l'érosion interne établie.

Le critère utilisé pour quantifier la probabilité d'apparition d'érosion interne au sein de l'ouvrage est le critère de Bligh défini comme le rapport de la largeur de l'ouvrage par la charge hydraulique, éventuellement corrigé de l'incidence des différentes anomalies présentes sur la digue. La correspondance entre la valeur du critère de Bligh et la probabilité d'apparition d'érosion interne a été établie sur la base de retours d'expérience des crues historiques et des principes de dimensionnement du bureau d'études NEDECO dans les années 60 et 70. Elle est fournie par l'échelle ci-après.

Probabilités d'apparition en fonction des valeurs du critère de Bligh $c=L/\Delta H$		Proba
Intervalles du critère de Bligh		
l'eau n'atteint pas la cote du pied de digue coté Val		0
0	< Bligh < 2	1
2	< Bligh < 3	0.99
3	< Bligh < 3.5	0.95
3.5	< Bligh < 4	0.8
4	< Bligh < 4.5	0.5
4.5	< Bligh < 5	0.2
5	< Bligh < 5.5	0.1
5.5	< Bligh < 6	0.02
6	< Bligh < 7	0.01
7	< Bligh < 8	0.001
8	< Bligh	0.0001

Tableau 25 : correspondance entre valeur du critère de Bligh (modifié) et probabilité d'apparition d'érosion interne

La probabilité de rupture une fois l'érosion interne établie est par défaut considérée comme certaine mais peut-être réduite par la prise en compte des barrières de sécurité que constituent la surveillance et la présence d'un massif drainant et filtrant (cf. annexes C et D).

Probabilité de rupture :

Les probabilités de rupture annuelle par érosion interne calculées par le modèle sont modérées à fortes et peuvent atteindre 53.33%.

Identification des Profils SHF-CHARIN			Erosion Interne								Erosion interne
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléas de rupture : $P_{AT} \times Pr_{AT}$								Aléa Annuel
			Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	Σ
14	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	T01	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	10.0%	10.0%	20.0%	0.20%
15	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	T01	0.0%	1.0%	2.0%	2.0%	10.0%	20.0%	50.0%	50.0%	1.06%
16	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	T01	0.0%	0.0%	0.1%	1.0%	1.0%	10.0%	20.0%	20.0%	0.27%
17	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	T01	1.0%	20.0%	50.0%	80.0%	80.0%	99.0%	99.0%	99.0%	13.54%
18	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK850	T01	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.0%	20.0%	50.0%	80.0%	0.67%
19	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK900	T01	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	1.0%	20.0%	20.0%	50.0%	0.46%
31	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1500	T02	0.0%	2.0%	10.0%	20.0%	20.0%	80.0%	80.0%	80.0%	3.28%
32	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1550	T02	0.0%	2.0%	10.0%	20.0%	50.0%	95.0%	95.0%	95.0%	3.93%
33	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	T02	0.0%	0.1%	1.0%	2.0%	2.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.47%
34	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	T02	0.0%	0.1%	1.0%	2.0%	2.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.47%
36	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	T02	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	0.36%
37	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	T02	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	20.0%	20.0%	3.41%
38	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	T02	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	0.13%
39	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1900	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	20.0%	50.0%	50.0%	0.79%
40	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1950	T02	0.0%	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	2.0%	2.0%	2.0%	0.16%
42	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2050	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.28%
43	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2100	T02	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.33%
44	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2150	T02	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	2.0%	2.0%	0.34%
45	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2200	T02	0.0%	1.0%	2.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	1.01%
46	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2250	T02	0.0%	0.0%	2.0%	2.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.51%
47	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2300	T02	0.0%	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.14%
49	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2400	T02	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	2.0%	2.0%	2.0%	0.35%
50	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2450	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	20.0%	50.0%	0.43%
52	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2550	T03	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	50.0%	50.0%	50.0%	0.67%
74	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3650	T03	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	1.33%
93	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4600	T03	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	1.33%
97	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6000	T04	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	2.0%	20.0%	0.12%
100	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6150	T04	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	2.0%	2.0%	2.0%	0.35%
105	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6400	T04	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.13%
119	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7100	T05	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.67%
121	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7200	T05	0.0%	0.1%	1.0%	1.0%	1.0%	2.0%	2.0%	2.0%	0.18%
122	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7250	T05	0.0%	0.1%	1.0%	2.0%	2.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.47%
123	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7300	T05	0.0%	1.0%	2.0%	2.0%	10.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.84%
130	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7650	T05	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	13.33%
134	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7850	T05	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	33.33%
135	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7900	T05	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	53.33%

Tableau 26 : Probabilité de rupture des profils en travers soumis à l'érosion interne ($\Sigma > 0,10\%$)

Le tableau présenté ci-après fournit le récapitulatif des principaux désordres affectant les tronçons soumis aux plus fortes probabilités de rupture par érosion interne. Le détail de la signification des codes utilisés est disponible en annexe C et D.

N° du Profil utilisé	PK Digue (km/OrigineVal)	Tronçon VTA	Hauteur de la digue	Pente (°) Côte Val	Présence et Position de Maison encastree	Mur de soutènement ou mur de Quai	Végétation	Présence et Position canalisation	Présence et Position Terriers	Désordres sur le talus Coté Val	Facteur aggravant de l'érosion interne
14	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	T01	2.71	17.67			VLG2			OBSV	
15	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	T01	3.24	20.47			VLG2			OBSV	
16	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	T01	3.03	27.91			VLG2			OBSV	
17	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	T01	3.14	58.39			VLG2			DECAP+OBSV	GLI
18	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK850	T01	2.38	90.00	Val		VLG1			OBSV	
19	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK900	T01	2.82	34.17			VLG2			OBSV	
31	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1500	T02	2.82	29.02			VLG2			OBSV	
32	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1550	T02	2.57	90.00	Val		VLG2			OBSV	
33	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	T02	2.90	31.81			VLG2			OBSV	
34	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	T02	2.90	20.23			VLG2			OBSV	
36	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	T02	3.92	21.81			VLG2			OBSV	
37	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	T02	3.67	25.84			VLG2			OBSV	
38	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	T02	4.11	19.82			VLG2			OBSV	
39	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1900	T02	3.09	25.42			VLG2			OBSV	
40	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1950	T02	2.86	16.93			VLG2			OBSV	
42	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2050	T02	2.46	22.94			VLG2			OBSV	
43	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2100	T02	2.80	17.30			VLG2			OBSV	
44	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2150	T02	2.82	16.84			VLG2			OBSV	
45	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2200	T02	2.63	18.19			VLG2			OBSV	
46	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2250	T02	2.76	17.59			VLG2			OBSV	
47	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2300	T02	3.58	17.63			VLG2		H	OBSV	
49	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2400	T02	3.39	25.50			VLG2			OBSV	
50	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2450	T02	1.85	25.75			VLG2			OBSV	
52	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2550	T03	1.97	90.00	Val		VLG2			OBSV	
74	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3650	T03	3.20	20.44			VLG2		B	OBSV	D20
93	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4600	T03	1.93	14.84			VLG2			OBSV	
97	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6000	T04	-0.04	-0.83			VLG2			OBSV	
100	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6150	T04	1.27	19.92			VLG2			OBSV	
105	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6400	T04	2.38	24.50			VLG2			OBSV	
119	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7100	T05	4.35	13.05	Loire		VLG2			OBSV	DEP
121	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7200	T05	2.93	23.70			VLG2			OBSV	
122	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7250	T05	2.95	24.86			VLG2		H	DECAP+OBSV	
123	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7300	T05	2.73	25.39			VLG2			OBSV	
130	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7650	T05	4.37	22.44			VLG2			OBSV	DEP
134	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7850	T05	4.89	22.83			VLG2			OBSV	DEP
135	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7900	T05	5.34	20.96			VLG2			OBSV	DEP

Tableau 27 : Caractéristiques, désordres et anomalies des profils en travers soumis à l'érosion interne ($\Sigma > 0,10\%$)

Ceci est cohérent avec d'une part les caractéristiques géométriques de l'ouvrage et notamment quelques abaissements localisés du terrain naturel côté val (ce qui induit des charges hydrauliques importantes) et, d'autre part, la présence de végétations ligneuse, parfois des deux côtés de l'ouvrage, des maisons encastrees et l'identification ponctuelle de terriers.

Il ressort principalement 3 secteurs sensibles à ce type de mécanisme :

- ▶ PK800 : la présence d'un glissement côté val avec forte pente du talus côté val,
- ▶ PK1500 au PK1550 : végétation sur les 2 talus avec maison encastree,
- ▶ PK7650 et PK7850 au PK7900 : zones avec dépressions en eau côté val (charge hydraulique importante) et hauteur importante de la digue.

La prise en compte d'une remontée de nappe dans les dépressions côté val est traitée ci-dessous. Elle tend à réduire significativement les probabilités de rupture concernant l'érosion interne (voir §8.2.2).

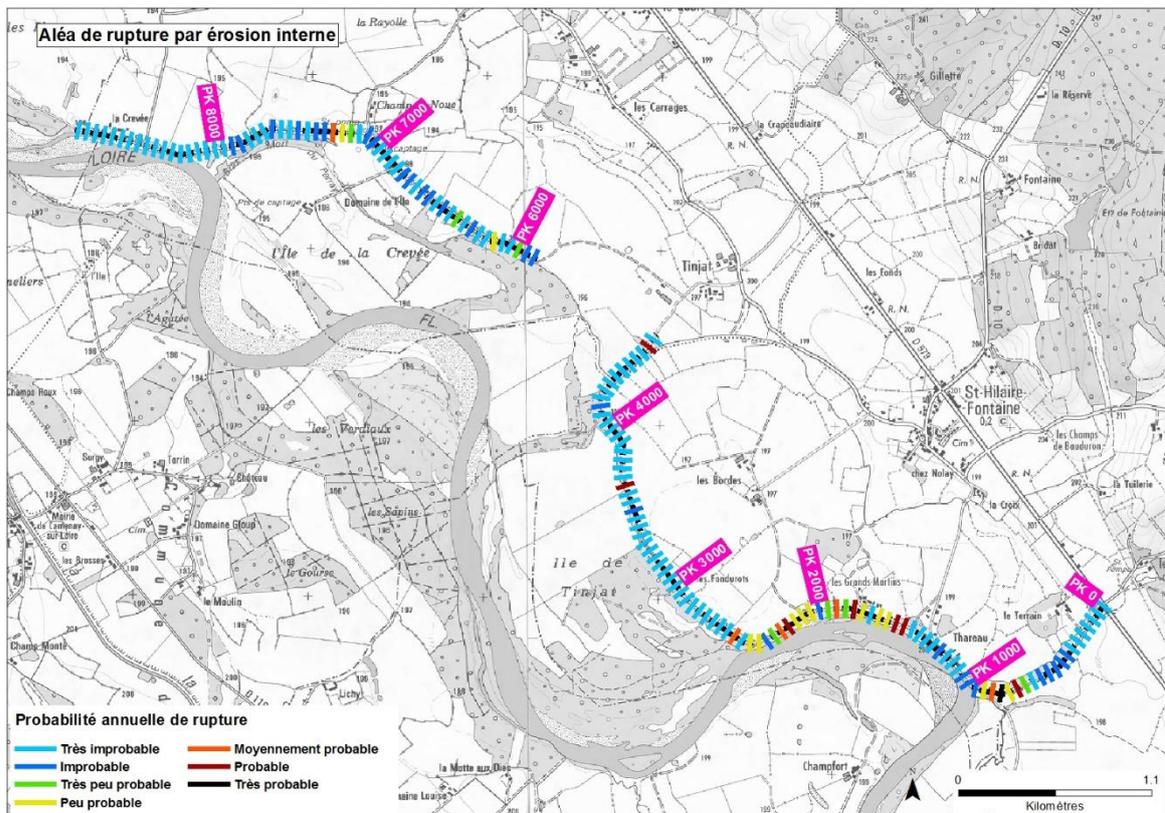
Carte de synthèse :

Figure 78 : carte de probabilité annuelle de rupture par érosion interne

8.2.1.3 Rupture par défaut de stabilité de la digue ou de sa fondation

Le défaut de stabilité d'une digue ou de sa fondation peut prendre plusieurs formes qui relèvent soit :

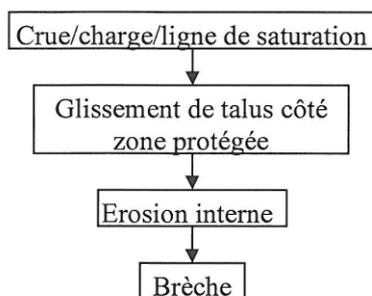
- d'une déstabilisation d'ensemble, lorsque la digue n'est pas capable de résister mécaniquement à la charge de l'eau, ce qui peut se traduire par un glissement sur sa fondation ou un basculement de l'ouvrage, situation qui se rencontre souvent au niveau des ouvrages de rehausse telles que les parapets construits en crête de digue pour en relever le niveau de protection ;
- d'une déstabilisation de talus par glissement, qui est favorisée par la saturation des matériaux de la digue ;
Elle peut se produire côté val quand le corps de digue est saturée, ou côté fleuve à la décrue.
- d'une déstabilisation de la fondation, qui peut se produire si celle-ci est très perméable et si elle est surmontée d'une couche imperméable.

Si la pression hydrostatique de l'eau dans la fondation perméable est susceptible de soulever la couche imperméable, il peut y avoir claquage de cette couche : un phénomène appelé « soulèvement hydraulique côté val ».

Seule la déstabilisation d'ensemble est susceptible de provoquer directement la rupture de la digue, les autres défauts de stabilité n'en sont généralement pas capables.

Cette rupture peut être initiée par ce type de défaillance, puis accentuée par d'autres phénomènes, le plus souvent par érosion interne. L'arbre de défaillance simplifié considère que la digue, une fois affectée par un glissement, voit sa géométrie amputée et sa résistance à l'érosion interne diminuée au point d'en occasionner la rupture. Il convient de noter que ce scénario de défaillance induit une forte corrélation entre la probabilité de rupture par défaut de stabilité et par érosion interne.

3.a - Rupture par glissement de talus côté zone protégée



Pour le profil 3 :

Fonctions	Composants
Drainage	Drain côté val
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil 2 :

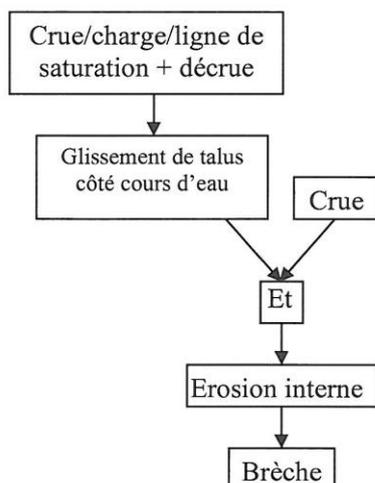
Fonctions	Composants
Étanchéité	Renforcement amont
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil 1 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Figure 79 : Arbre de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté val

3.b - Rupture par glissement de talus côté cours d'eau



Pour le profil 3 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil 2 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil 1 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Figure 80 : Arbre de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté rivière

Nota1 : L'inondation suite à un **glissement côté fleuve** est possible, mais dans des conditions hydrauliques particulières. En effet, lors d'une crue, le niveau d'eau côté Loire joue un rôle stabilisateur vis-à-vis du risque de glissement côté fleuve ; la rupture peut être initiée par une décrue rapide et une circulation des eaux de saturation de l'ouvrage vers la Loire, ce qui déstabilise le talus. L'inondation de la zone protégée nécessite donc d'une que le niveau d'eau soit redescendu à un niveau suffisamment bas après la crue, en engendrant une rupture, puis qu'une seconde crue agisse à nouveau sur le système d'endiguement. La probabilité d'inondation est donc très faible du fait des occurrences de crue. Ce scénario n'a pu être intégré dans le modèle d'aléa de rupture, qui n'est pas conçu pour affecter une probabilité à un double événement. Le mécanisme de glissement côté cours d'eau est, en revanche, pris en compte dans le cadre de l'érosion externe en cas d'affouillement des fondations par le fleuve.

Nota2 : Dans le cas d'un substratum karstique sous la fondation de la digue, les effondrements ou fontis, en capacité de se produire, sont susceptibles de la déstabiliser. Aujourd'hui, les conditions et les modes de rupture en regard de cette éventualité ne sont pas encore connus, cependant des études sont en cours pour améliorer la connaissance.

Probabilité de rupture

Le risque de rupture par glissement côté val est localement probable. Les probabilités de rupture annuelle par glissement côté val, calculées par le modèle, sont modérées à fortes et peuvent atteindre 20% (dépressions côté val au PK7850).

La prise en compte d'une remontée de nappe dans les dépressions côté val est traitée ci-dessous. Elle tend à réduire significativement les probabilités de rupture concernant le glissement de talus (voir §8.2.2).

Identification des Profils SHF-CHARIN			Glissement								Glissement
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléas de rupture : $P_{AT} \times Pr_{AT}$								Aléa Annuel
			Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	Σ
8	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK350	T01	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	8.8%	8.8%	10.0%	0.13%
9	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK400	T01	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	8.8%	8.8%	10.0%	0.13%
11	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK500	T01	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	10.0%	10.0%	0.14%
12	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK550	T01	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.8%	8.8%	10.0%	0.12%
14	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	T01	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.6%	10.0%	10.0%	10.0%	0.16%
15	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	T01	2.2%	8.8%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	3.84%
16	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	T01	0.1%	6.6%	16.5%	16.5%	26.4%	30.0%	30.0%	30.0%	3.98%
17	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	T01	12.7%	43.2%	43.2%	43.2%	43.2%	43.2%	43.2%	43.2%	18.62%
19	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK900	T01	0.0%	0.1%	0.7%	3.3%	6.6%	30.0%	30.0%	30.0%	0.70%
20	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK950	T01	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	5.5%	10.0%	10.0%	10.0%	0.24%
21	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1000	T02	0.7%	6.6%	16.5%	16.5%	16.5%	16.5%	16.5%	16.5%	3.83%
22	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1050	T02	0.0%	0.2%	1.1%	1.1%	2.2%	5.5%	5.5%	5.5%	0.28%
31	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1500	T02	0.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	10.00%
33	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	T02	0.1%	16.5%	26.4%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	7.19%
34	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	T02	0.0%	0.6%	0.9%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.84%
36	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	T02	0.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	10.00%
37	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	T02	0.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	10.00%
38	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	T02	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.67%
39	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1900	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	0.86%
40	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1950	T02	0.0%	0.0%	8.8%	8.8%	8.8%	8.8%	10.0%	10.0%	1.27%
41	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2000	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.13%
42	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2050	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.8%	30.0%	30.0%	30.0%	0.53%
49	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2400	T02	0.0%	1.1%	1.1%	1.1%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	0.40%
74	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3650	T03	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.67%
100	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6150	T04	0.0%	0.6%	0.6%	0.6%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.20%
101	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6200	T04	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	1.1%	1.1%	1.1%	0.16%
103	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6300	T04	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.6%	8.8%	8.8%	8.8%	0.14%
105	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6400	T04	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.13%
107	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6500	T04	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.13%
110	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6650	T04	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.13%
113	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6800	T04	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.1%	30.0%	30.0%	30.0%	0.43%
116	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6950	T05	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%	16.5%	26.4%	0.19%
118	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7050	T05	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	3.67%
119	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7100	T05	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	0.73%
130	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7650	T05	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	20.00%
131	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7700	T05	0.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	0.40%
132	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7750	T05	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.15%
134	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7850	T05	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	20.00%
135	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7900	T05	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	20.00%
142	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8250	T05	0.0%	0.2%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	0.20%

Tableau 28 : Probabilités de rupture des profils en travers soumis au glissement côté val ($\Sigma > 0,10\%$)

Ceci est cohérent avec les caractéristiques géométriques de l'ouvrage et notamment quelques abaissements localisés du terrain naturel côté val (ce qui induit une hauteur d'ouvrage côté val importante).

N° du Profil utilisé	PK Digue (km/OrigineVal)	Tronçon VTA	Hauteur de la digue	Pente (°) Côte Val	Profil Type
8	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK350	T01	2.23	24.46	F1
9	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK400	T01	2.14	23.43	F1
11	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK500	T01	2.80	16.98	F1
12	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK550	T01	2.44	21.62	F1
14	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	T01	2.71	17.67	F1
15	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	T01	3.24	20.47	F1
16	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	T01	3.03	27.91	F1
17	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	T01	3.14	58.39	F1
19	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK900	T01	2.82	34.17	F1
20	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK950	T01	2.86	21.24	F1
21	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1000	T02	3.88	23.10	F1
22	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1050	T02	3.31	17.85	F1
31	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1500	T02	2.82	29.02	F1
33	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	T02	2.90	31.81	F1
34	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	T02	2.90	20.23	F1
36	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	T02	3.92	21.81	F1
37	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	T02	3.67	25.84	F1
38	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	T02	4.11	19.82	F1
39	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1900	T02	3.09	25.42	F1
40	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1950	T02	2.86	16.93	F1
41	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2000	T02	3.54	18.93	F1
42	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2050	T02	2.46	22.94	F1
49	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2400	T02	3.39	25.50	F1
74	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3650	T03	3.20	20.44	F1
100	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6150	T04	1.27	19.92	F1
101	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6200	T04	2.59	27.73	F1
103	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6300	T04	2.50	21.83	F1
105	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6400	T04	2.38	24.50	F1
107	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6500	T04	2.71	21.84	F1
110	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6650	T04	2.34	23.14	F1
113	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6800	T04	2.52	53.15	F1
116	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6950	T05	1.97	56.75	F1
118	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7050	T05	4.03	15.93	F1
119	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7100	T05	4.35	13.05	F1
130	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7650	T05	4.37	22.44	F1
131	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7700	T05	3.48	17.84	F1
132	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7750	T05	3.86	19.19	F1
134	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7850	T05	4.89	22.83	F1
135	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7900	T05	5.34	20.96	F1
142	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8250	T05	3.47	23.47	F1

Il convient également de noter la cohérence avec les profils d'ores et déjà caractérisés par une probabilité initiale de rupture par érosion interne non négligeable.

Carte de synthèse :

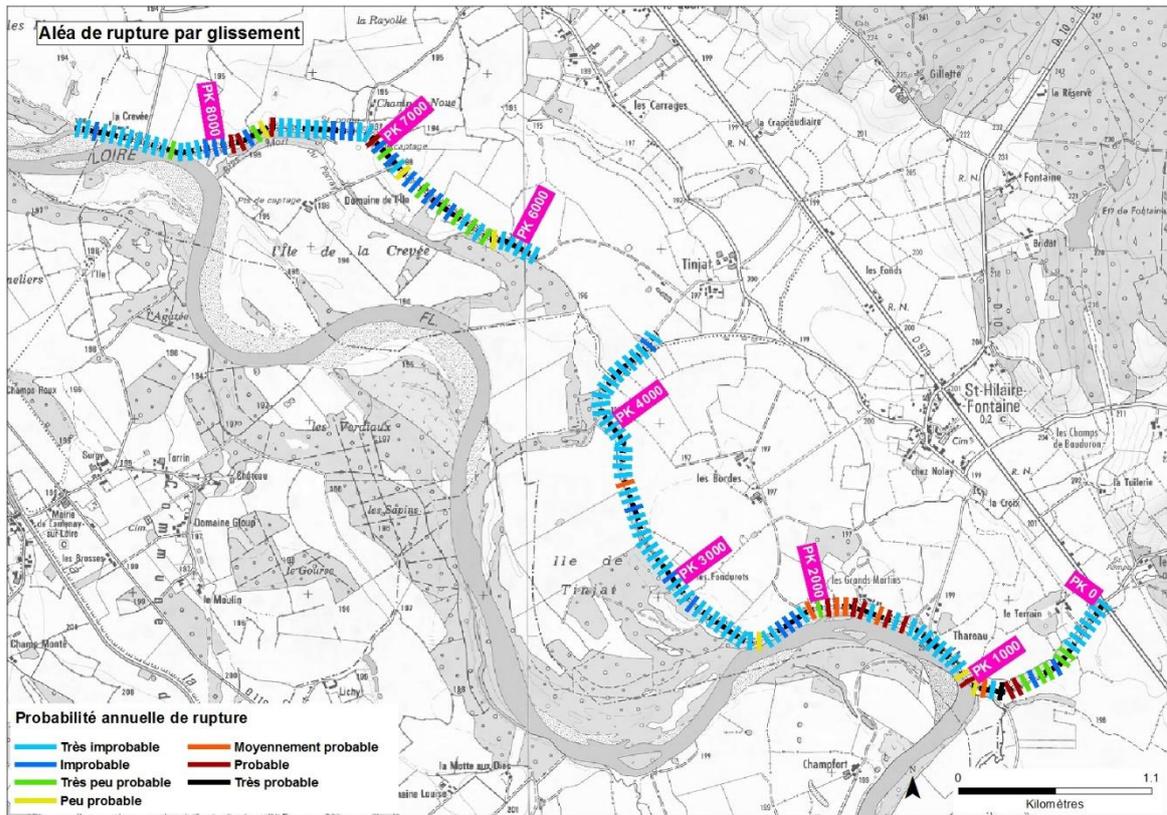


Figure 81 : Carte de Probabilité annuelle de rupture par glissement

8.2.1.4 Rupture par soulèvement hydraulique

La sensibilité au **soulèvement hydraulique** est très improbable sur l'ensemble des tronçons. Ceci est en cohérence avec le contexte géotechnique des tronçons (absence d'assise peu perméable).

8.2.1.5 Rupture par érosion externe

L'érosion externe est un phénomène qui se produit quand un courant d'eau à l'extérieur de la digue est capable d'entraîner ses matériaux constitutifs ou ceux de sa fondation.

On rencontre 3 types principaux d'érosion externe :

- en contact avec le fleuve, la fondation peut être affouillée en pied de digue ;
- en crue, le talus côté cours d'eau peut être érodé par le courant ;
- en cas de surverse, le talus côté val peut être érodé par les écoulements.

À l'exception du cas des surverses où l'érosion externe du talus côté val est la cause directe de la rupture, l'érosion externe côté Loire est rarement capable d'en produire une. Elle est, en revanche, initiatrice d'un glissement qui, associé à une érosion interne, provoque la rupture de la digue.

L'érosion externe au niveau des pieds de levée doit être traitée car elle intervient quand le fleuve n'est pas en crue et peut donc endommager la levée à tout moment.

Les probabilités de rupture annuelle par érosion externe, calculées par le modèle, sont modérées à fortes, et peuvent atteindre 7.1% au PK1800 (également soumis au glissement du talus côté val).

Identification des Profils SHF-CHARIN			Erosion Externe									Erosion externe
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléas de rupture : $P_{AT} \times Pr_{AT}$									Aléa Annuel
			Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	Σ	
21	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1000	T02	1.1%	11.0%	27.5%	27.5%	27.5%	27.5%	27.5%	27.5%	27.5%	6.39%
22	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1050	T02	0.1%	1.1%	5.5%	5.5%	11.0%	27.5%	27.5%	27.5%	27.5%	1.39%
32	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1550	T02	0.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	0.71%
33	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	T02	0.0%	1.1%	1.8%	2.0%	2.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	1.00%
34	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	T02	0.0%	11.0%	17.6%	20.0%	20.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	5.17%
36	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	T02	0.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	7.07%
37	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	T02	0.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	7.07%
38	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	T02	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	2.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	0.17%
142	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8250	T05	0.0%	2.2%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	1.99%
151	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8700	T05	0.0%	0.0%	0.1%	1.1%	11.0%	22.0%	22.0%	22.0%	22.0%	0.51%

Tableau 29 : Probabilités de rupture des profils en travers soumis à l'érosion externe hydraulique ($\Sigma > 0,10\%$)

Suivant les échanges effectués avec la DDT58, il est signalé la présence d'un perré du PK1000 au PK1050 côté Loire (masqué par la végétation lors de la VTA 2014). Après ajout dans le modèle Cardigue de ce renforcement de pied de talus, le risque de rupture par érosion externe est nettement revu à la baisse sur ces 2 profils.

Identification des Profils SHF-CHARIN			Erosion Externe									Erosion externe
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléas de rupture : $P_{AT} \times Pr_{AT}$									Aléa Annuel
			Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	Σ	
21	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1000	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.01%
22	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1050	T02	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.00%

Tableau 30 : Probabilités de rupture des profils en travers soumis à l'érosion externe hydraulique ($\Sigma > 0,10\%$) après intégration du perré au PK1000 et PK1050

Compte tenu des limites de l'outil CARDigue (cf. annexes C et D), les résultats quantitatifs fournis par le modèle de calcul de l'aléa de rupture doivent cependant être remis en perspective avec ceux, qualitatifs, issus de l'analyse morphodynamique (cf. §6.4 et annexe 5).

Carte de synthèse :

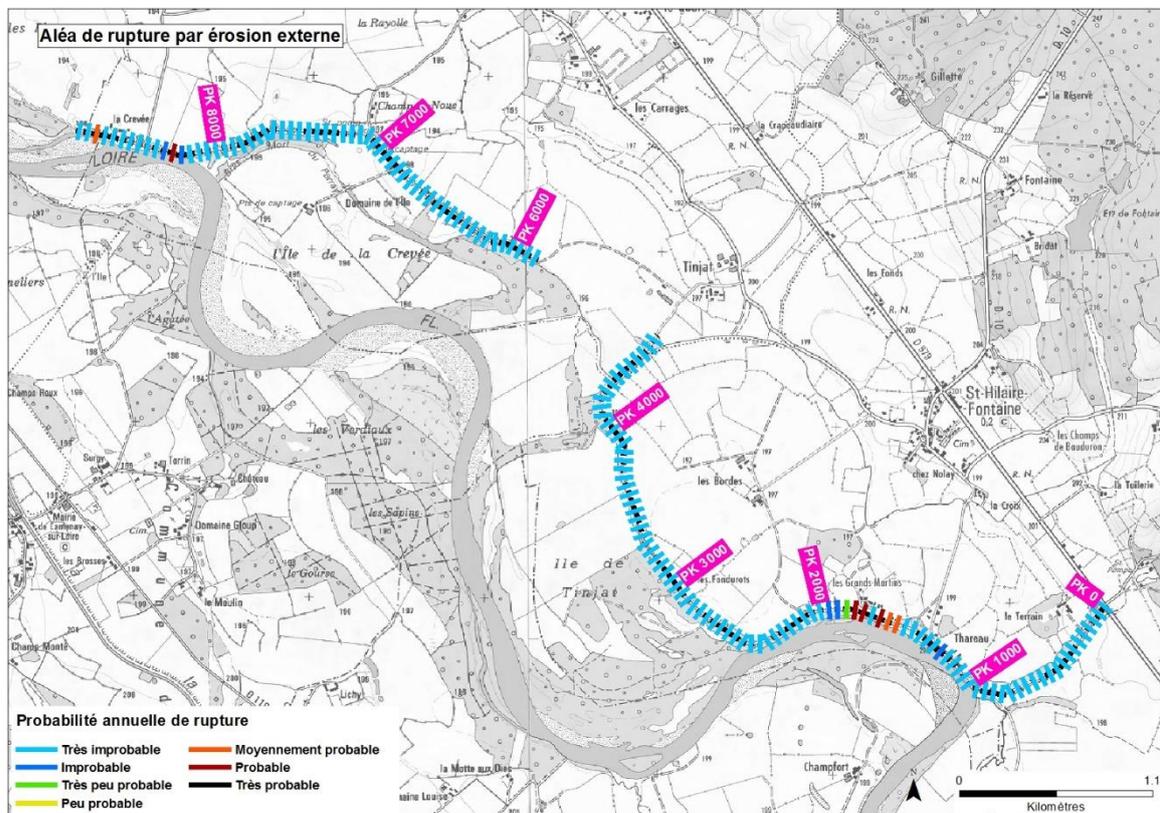


Figure 82 : Carte de Probabilité annuelle de rupture par érosion externe

8.2.2 Rupture de la levée de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin tous modes confondus

Les probabilités de rupture tous modes de défaillance confondus, pour chaque crue sont présentées page suivante.

Compte tenu des incertitudes du modèle d'aléa de rupture, le seuil de probabilité de rupture retenu pour la définition du niveau de sûreté est de 1 %. Au-dessus de ce seuil, la probabilité de rupture ne peut plus être considérée comme négligeable.

Les résultats des modélisations réalisées à l'aide de CARDigue mettent ponctuellement en évidence des probabilités de rupture supérieures à 1% dès Q2. Compte tenu de la spécificité du val, il convient néanmoins, à dire d'expert, de nuancer ces résultats. En effet seul un profil, le PK800 présente réellement un risque non négligeable de rupture dès Q2. Tous les autres profils identifiés correspondent en effet à un risque de rupture par érosion interne qui est estimée sur l'hypothèse d'une mise en saturation quasi-totale de l'ouvrage (régime permanent). Or, au droit de ces profils :

- d'une part, soit la durée de la crue de période de retour Q2 ne sera pas assez longue pour permettre la mise en saturation de la digue ;

- soit, d'autre part, la crue sera de période de retour légèrement supérieure à Q2 et le pied de digue côté val se retrouvera inondé par remous, réduisant ainsi la charge hydraulique.

Ainsi, il est recommandé de retenir comme niveau de sûreté pour l'ensemble des deux sous-vals de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin une période de retour de 5 ans, soit une hauteur à l'échelle de référence de Gilly de 6,22 m et un débit de 1700 m³/s.

NOTA SUR LA PRISE EN COMPTE DU PHÉNOMÈNE DE REMONTÉE DU NIVEAU DE LA NAPPE ALLUVIALE CÔTÉ VAL :

Il apparaît que les calculs effectués à partir du logiciel CARDigue (v28) ne prennent pas en compte les phénomènes de remontée de nappes, notamment au droit des dépressions côté val. Ce phénomène tend à réduire la charge hydraulique en cas de crue, et donc à réduire les probabilités d'apparition de rupture par érosion interne et glissement.

Sur les levées du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, plusieurs dépressions en eau sont observées côté val entre la station d'eau potable et le hameau de la Crevée (PK7100, PK7650, PK7850 et PK7900). Sur ce secteur, les caractéristiques sableuses de la digue et de sa fondation laissent supposer une possible remontée de nappe en cas de crue de la Loire. Afin de tenir compte de ce phénomène, il est appliqué sur ce secteur une réduction de la charge hydraulique, à dire d'expert, afin de tendre vers des valeurs de charge hydraulique équivalente aux profils situés en amont et en aval de ces dépressions.

Cette correction permet de réduire significativement les probabilités concernant la rupture par érosion interne et glissement côté val.

NOTA SUR LE GLISSEMENT OBSERVÉ SUR LE TALUS CÔTÉ LOIRE PRÈS DU HAMEAU DE LA CREVÉE (PK8700) :

Ce glissement du talus côté Loire a provoqué ponctuellement des modifications sur la géométrie de la digue avec réduction de la largeur du pied de digue et de la crête, un raidissement de la pente du talus côté Loire et une mise à nu de la partie sableuse de la digue. Les caractéristiques de la digue ont donc été modifiées au droit du profil PK8700 dans CARDigue et il apparaît désormais sur ce profil problématique un risque de rupture par érosion externe moyennement probable (0.5% de probabilité annuelle). Ce résultat est à relativiser du fait que :

- ▶ la charge hydraulique reste modeste quel que soit l'occurrence de la crue, compte tenu que le système d'endiguement est ouvert et que le val se remplit simultanément,
- ▶ la rupture par érosion externe se ferait à la décrue.

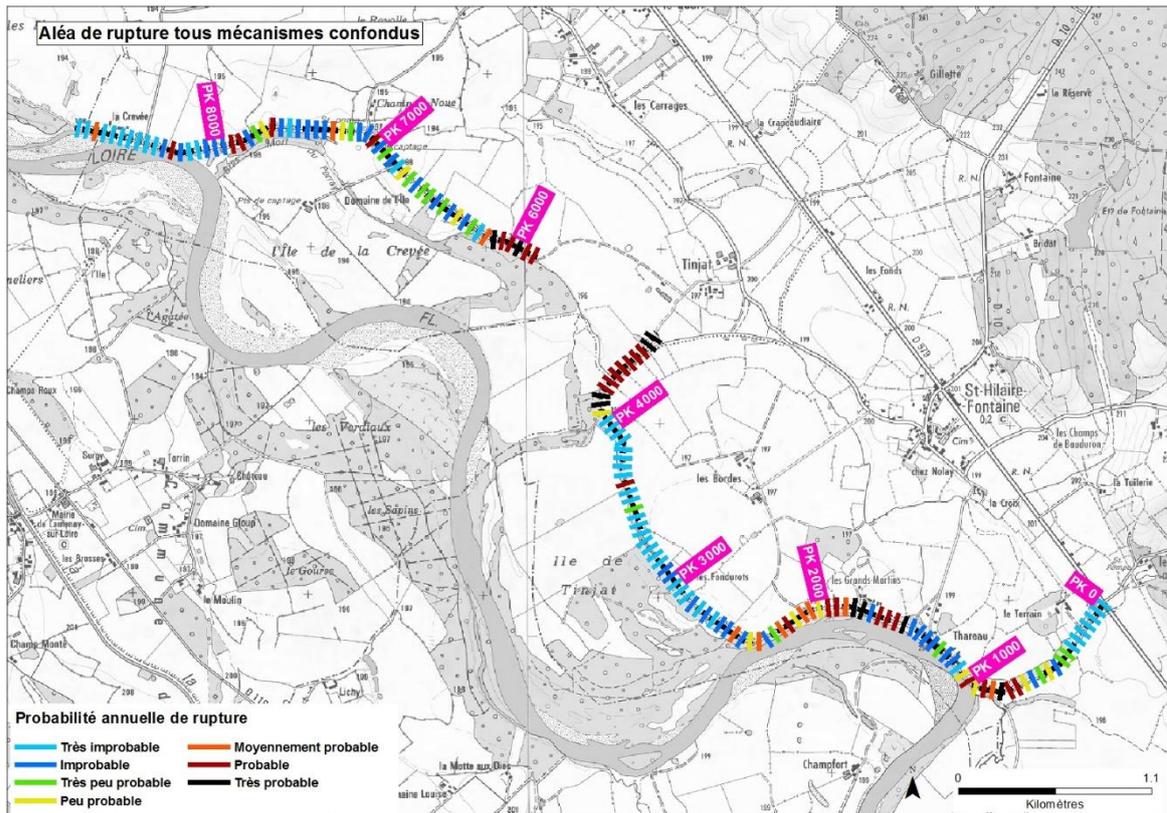


Figure 83 : Carte des probabilités annuelles de rupture tous modes confondus avec prise en compte de la remontée de nappe, en l'absence de surveillance

Identification des Profils SHF-CHARIN			Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement hydraulique	Aléa global : Probabilité de Rupture tous modes confondus								Probabilité annuelle
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel									Σ
			Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	
8	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK350	T01	0.00%	0.06%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	9.7%	9.7%	19.0%	0.18%
9	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK400	T01	0.00%	0.06%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	9.7%	9.7%	19.0%	0.18%
11	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK500	T01	0.00%	0.09%	0.14%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	11.8%	19.0%	19.0%	0.23%
12	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK550	T01	0.00%	0.02%	0.12%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	9.7%	9.7%	11.8%	0.14%
14	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	T01	0.00%	0.20%	0.16%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.6%	19.0%	19.0%	28.0%	0.34%
15	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	T01	0.00%	1.06%	3.84%	0.00%	0.00%	2.2%	9.7%	11.8%	11.8%	19.0%	28.0%	55.0%	55.0%	4.80%
16	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	T01	0.00%	0.27%	3.98%	0.00%	0.00%	0.1%	6.6%	16.6%	17.3%	27.1%	37.0%	44.0%	44.0%	4.18%
17	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	T01	0.00%	13.54%	18.62%	0.00%	0.00%	13.5%	54.6%	71.6%	88.6%	88.6%	99.4%	99.4%	99.4%	26.42%
18	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK850	T01	0.00%	0.67%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.0%	20.0%	50.0%	80.0%	0.67%
19	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK900	T01	0.00%	0.46%	0.70%	0.00%	0.00%	0.0%	0.1%	0.8%	3.4%	7.5%	44.0%	44.0%	65.0%	1.03%
20	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK950	T01	0.00%	0.10%	0.24%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	5.6%	11.9%	19.1%	19.1%	0.33%
21	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1000	T02	0.00%	0.04%	3.83%	0.01%	0.00%	0.7%	6.7%	16.6%	16.6%	16.6%	16.6%	16.6%	16.6%	3.87%
22	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1050	T02	0.00%	0.02%	0.28%	0.00%	0.00%	0.0%	0.2%	1.1%	1.1%	2.3%	5.6%	6.5%	6.5%	0.29%
26	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1250	T02	0.02%	0.09%	0.00%	0.03%	0.00%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	4.0%	11.8%	14.9%	0.14%
31	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1500	T02	0.02%	3.28%	10.00%	0.00%	0.00%	0.0%	31.4%	37.0%	44.0%	44.0%	86.0%	86.0%	86.5%	12.30%
32	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1550	T02	0.06%	3.93%	0.00%	0.71%	0.00%	0.0%	4.0%	11.8%	21.6%	51.0%	95.4%	95.5%	95.5%	4.53%
33	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1600	T02	0.02%	0.47%	7.19%	1.00%	0.00%	0.1%	17.5%	28.4%	32.8%	45.1%	55.2%	55.2%	56.8%	8.23%
34	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1650	T02	0.01%	0.47%	0.84%	5.17%	0.00%	0.0%	11.6%	19.1%	29.4%	29.4%	64.0%	64.0%	64.8%	6.09%
36	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1750	T02	0.03%	0.36%	10.00%	7.07%	0.00%	0.0%	44.6%	44.6%	44.6%	45.1%	66.2%	66.2%	66.6%	15.15%
37	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1800	T02	0.02%	3.41%	10.00%	7.07%	0.00%	0.0%	49.6%	49.6%	49.6%	49.6%	68.5%	72.5%	72.9%	16.82%
38	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1850	T02	0.01%	0.13%	0.67%	0.17%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	13.6%	13.6%	16.2%	17.5%	17.5%	0.95%
39	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1900	T02	0.01%	0.79%	0.86%	0.06%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	45.1%	45.1%	65.7%	66.6%	1.45%
40	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK1950	T02	0.05%	0.16%	1.27%	0.04%	0.00%	0.0%	0.0%	9.9%	9.9%	9.9%	12.7%	16.1%	18.6%	1.49%
41	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2000	T02	0.02%	0.09%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	11.8%	20.3%	21.1%	0.22%
42	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2050	T02	0.03%	0.28%	0.53%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	9.7%	44.0%	46.0%	46.5%	0.75%
43	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2100	T02	0.17%	0.33%	0.01%	0.00%	0.00%	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.1%	4.7%	6.9%	26.8%	0.52%
44	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2150	T02	0.06%	0.34%	0.02%	0.00%	0.00%	0.0%	1.0%	1.1%	1.1%	1.1%	4.7%	7.8%	7.8%	0.43%
45	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2200	T02	0.23%	1.01%	0.06%	10.00%	0.00%	0.0%	1.1%	2.2%	10.2%	10.5%	13.8%	15.8%	43.1%	1.28%
46	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2250	T02	0.05%	0.51%	0.03%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	2.1%	2.2%	10.5%	12.5%	13.2%	15.8%	0.59%
47	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2300	T02	0.03%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	1.0%	1.0%	1.0%	2.7%	3.2%	3.7%	0.18%
49	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2400	T02	0.03%	0.35%	0.40%	0.00%	0.00%	0.0%	2.1%	2.1%	2.1%	3.2%	6.0%	6.7%	7.3%	0.78%
50	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2450	T02	0.04%	0.43%	0.01%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.4%	23.6%	53.4%	0.46%
52	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK2550	T03	0.00%	0.67%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	50.0%	50.0%	50.0%	0.67%
71	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3500	T03	0.00%	0.01%	0.10%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.4%	9.7%	9.7%	0.11%
74	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK3650	T03	0.00%	1.33%	0.67%	0.00%	0.00%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	1.99%
83	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4100	T03	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	2.1%	8.3%	8.3%	10.4%	0.21%
84	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4150	T03	19.50%	0.07%	0.01%	0.00%	0.00%	6.6%	52.1%	52.1%	52.1%	52.1%	52.1%	52.1%	52.1%	19.55%
85	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4200	T03	13.14%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	4.0%	32.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	13.15%
86	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4250	T03	1.60%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	2.0%	3.2%	3.6%	20.0%	40.0%	40.0%	40.0%	1.61%
87	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4300	T03	5.55%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	4.2%	26.0%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	5.55%
88	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4350	T03	1.98%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	2.1%	4.2%	4.7%	26.0%	52.0%	52.0%	52.0%	1.98%
89	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4400	T03	2.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	2.6%	4.2%	4.7%	26.0%	52.0%	52.0%	52.0%	2.08%
90	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4450	T03	1.73%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	2.6%	4.2%	4.7%	26.0%	26.0%	26.0%	26.0%	1.73%
91	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4500	T03	1.45%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	2.2%	2.2%	2.6%	4.7%	52.0%	52.0%	52.0%	1.45%
92	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4550	T03	2.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	3.7%	3.7%	5.8%	6.6%	52.0%	52.0%	52.0%	2.01%
93	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4600	T03	17.09%	1.33%	0.07%	0.00%	0.00%	7.2%	42.8%	53.0%	53.0%	53.0%	53.0%	53.0%	53.0%	18.13%
94	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK4650	T03	17.26%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.1%	36.4%	58.2%	72.8%	72.8%	72.8%	72.8%	72.8%	17.26%

Identification des Profils SHF-CHARIN			Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement hydraulique	Aléa global : Probabilité de Rupture tous modes confondus								Probabilité annuelle
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel									Σ
			Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	
8	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK350	T01	0.00%	0.06%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	9.7%	9.7%	19.0%	0.18%
9	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK400	T01	0.00%	0.06%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	9.7%	9.7%	19.0%	0.18%
11	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK500	T01	0.00%	0.09%	0.14%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	11.8%	19.0%	19.0%	0.23%
12	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK550	T01	0.00%	0.02%	0.12%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	9.7%	9.7%	11.8%	0.14%
14	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK650	T01	0.00%	0.20%	0.16%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.6%	19.0%	19.0%	28.0%	0.34%
15	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK700	T01	0.00%	1.06%	3.84%	0.00%	0.00%	2.2%	9.7%	11.8%	11.8%	19.0%	28.0%	55.0%	55.0%	4.80%
16	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK750	T01	0.00%	0.27%	3.98%	0.00%	0.00%	0.1%	6.6%	16.6%	17.3%	27.1%	37.0%	44.0%	44.0%	4.18%
17	3_Saint-Hilaire-Fontaine_1_PK800	T01	0.00%	13.54%	18.62%	0.00%	0.00%	13.5%	54.6%	71.6%	88.6%	88.6%	99.4%	99.4%	99.4%	26.42%
95	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK5900	T04	2.66%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	3.1%	5.2%	5.2%	9.4%	100.0%	100.0%	100.0%	2.66%
96	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK5950	T04	2.60%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	3.3%	5.2%	5.9%	32.5%	65.0%	65.0%	65.7%	2.60%
97	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6000	T04	13.60%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	10.4%	65.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	13.60%
98	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6050	T04	3.96%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	3.3%	5.9%	32.5%	52.0%	65.0%	65.0%	65.0%	3.96%
99	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6100	T04	2.95%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%	3.3%	5.9%	5.9%	52.0%	65.0%	65.0%	65.0%	2.95%
100	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6150	T04	14.59%	0.35%	0.20%	0.00%	0.00%	3.2%	9.8%	75.3%	93.7%	93.7%	93.8%	93.8%	93.8%	14.91%
101	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6200	T04	0.38%	0.01%	0.16%	0.00%	0.00%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	6.9%	33.2%	52.5%	0.54%
103	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6300	T04	0.00%	0.02%	0.14%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.6%	9.7%	9.7%	9.7%	0.15%
105	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6400	T04	0.00%	0.13%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	19.0%	19.0%	19.0%	0.25%
107	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6500	T04	0.00%	0.03%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	11.8%	11.8%	11.8%	0.16%
109	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6600	T04	0.00%	0.01%	0.10%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.4%	9.7%	9.7%	0.11%
110	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6650	T04	0.00%	0.03%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	11.8%	11.8%	11.8%	0.16%
112	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6750	T04	0.00%	0.01%	0.10%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	9.7%	10.6%	0.11%
113	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6800	T04	0.00%	0.03%	0.43%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.1%	31.4%	31.4%	31.4%	0.44%
116	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK6950	T05	0.00%	0.01%	0.19%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.3%	17.3%	27.1%	0.20%
118	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7050	T05	0.00%	0.07%	3.67%	0.00%	0.00%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	3.73%
121	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7200	T05	0.00%	0.18%	0.02%	0.00%	0.00%	0.0%	0.1%	1.1%	1.1%	1.1%	2.2%	2.2%	2.2%	0.19%
122	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7250	T05	0.00%	0.47%	0.03%	0.00%	0.00%	0.0%	0.1%	1.1%	2.2%	2.2%	20.4%	20.4%	20.4%	0.50%
123	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7300	T05	0.01%	0.84%	0.06%	0.00%	0.00%	0.0%	1.0%	2.2%	2.5%	10.5%	20.7%	20.7%	22.9%	0.91%
130	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7650	T05	0.00%	0.10%	6.00%	0.00%	0.00%	1.1%	16.6%	16.6%	17.3%	17.3%	27.1%	27.1%	27.4%	6.08%
131	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7700	T05	0.00%	0.01%	0.40%	0.00%	0.00%	0.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	0.41%
132	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7750	T05	0.00%	0.01%	0.15%	0.00%	0.00%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.15%
134	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7850	T05	0.00%	0.07%	3.67%	0.00%	0.00%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	3.73%
135	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK7900	T05	0.00%	0.07%	3.67%	0.00%	0.00%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	3.73%
142	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8250	T05	0.00%	0.01%	0.20%	1.99%	0.00%	0.0%	2.4%	12.0%	12.0%	12.0%	12.0%	12.0%	12.0%	2.18%
151	3_Saint-Hilaire-Fontaine_3_PK8700	T05	0.00%	0.00%	0.05%	0.51%	0.00%	0.0%	0.0%	0.1%	1.2%	12.0%	23.7%	23.7%	23.7%	0.56%

Tableau 31 : Probabilités de rupture annuelle tous modes confondus des différents profils élémentaires ($\Sigma > 0,10\%$) avec prise en compte de la remontée de nappe

8.2.3 Hypothèses de surveillance

Dans le cadre des modélisations présentées ci-dessus, et comme précisé au paragraphe 4.3, la DDT ne dispose pas des moyens techniques, humains et financier pour mettre en place une surveillance susceptible d'avoir une influence sur la probabilité de rupture.

De fait il n'a pas été retenu de surveillance de l'ouvrage (ASONA : absence de surveillance et/ou organisation non adaptée).

8.3 ESTIMATION DU RISQUE D'INONDATION PAR DÉFAILLANCE DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL SAINT HILAIRE FONTAINE

Cette estimation repose sur la sélection d'un certain nombre de scénarios de défaillance et sur l'évaluation de la criticité des scénarios d'inondation associés.

Les paragraphes suivants synthétisent les principaux résultats des différents scénarios de brèches simulés.

8.3.1 Identification et choix des scénarios d'inondation caractérisés en termes de probabilité d'occurrence

La sélection des scénarios de défaillance répond à des objectifs de représentativité et de diversité des situations pouvant être rencontrées, que ce soit en termes de probabilité d'occurrence, de mode de défaillance ou de conséquences (localisation et gravité). Elle s'appuie de ce fait sur :

- l'exploitation des résultats issus de CARDigue permettant d'identifier les secteurs de défaillance les plus probables
- la localisation des enjeux permettant de définir les scénarios a priori les plus graves
- les recommandations formulées dans la circulaire du 16/04/2010
- les discussions avec le gestionnaire des ouvrages

Les scénarios retenus sont récapitulés dans le tableau et figurés sur la carte ci-après.

n°	intitulé du scénario	Scénario hydrologique	Mode de rupture	Probabilité du scénario	localisation (PK début)	longueur de la brèche (m)
SHF_1	brèche en amont du val	Q200	érosion interne	0.27%	800	100
SHF_2	brèche des Grands Martins	Q20	glissement	2.48%	1800	100
SHF_2bis	brèche aval des Grands Martins	Q200	surverse	0.22%	2200	150
SHF_3	brèche sur la levée de Charrin	Q10	érosion interne + glissement	1.66%	7750	150

Tableau 32 : Tableau de synthèse des scénarios de brèches retenus

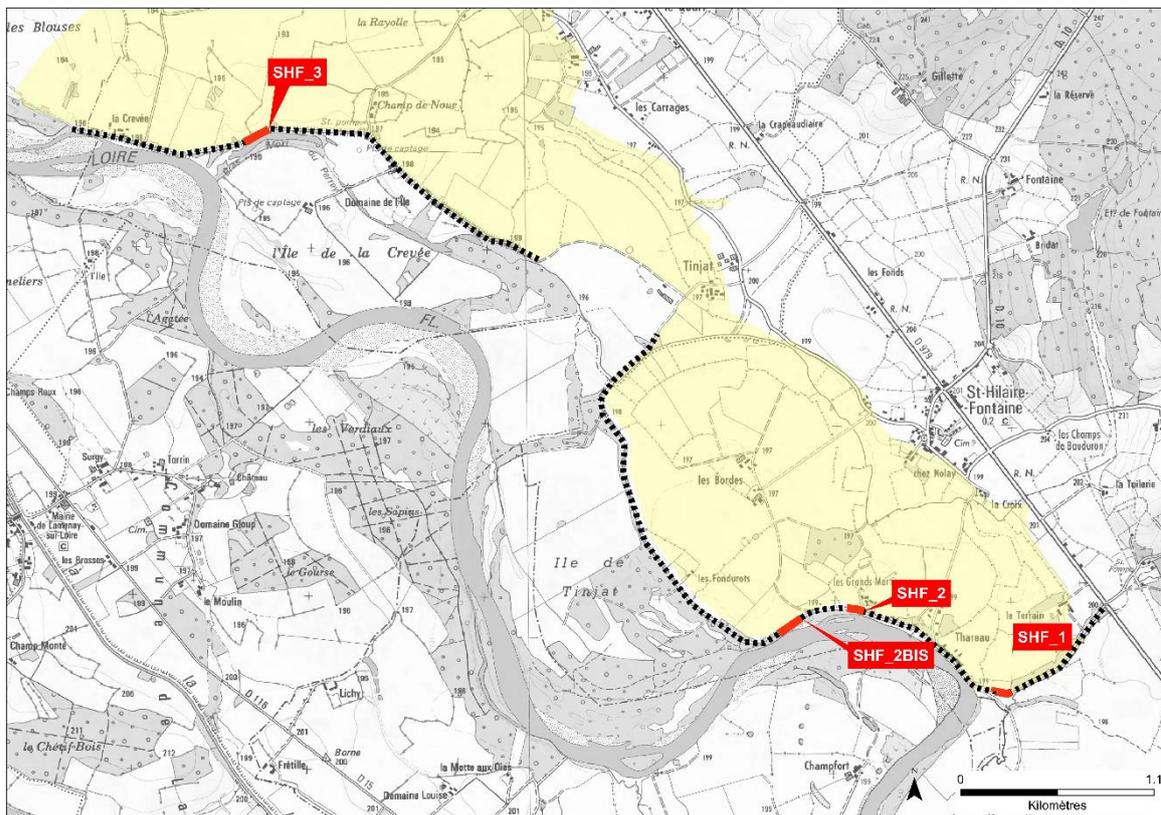


Figure 84 : Carte de localisation des scénarios retenus

8.3.1.2 Scénario n°1 : brèche en amont du val (crue T=200 ans)

Ce scénario peut être qualifié de « peu probable ».

La rupture s'initie à l'atteinte du niveau de la crue d'occurrence 5 ans. La probabilité de rupture de l'ouvrage est justifiée par l'observation d'un glissement côté val lors de la VTA réalisée en 2014. S'ajoute à cela une pente de talus globale très marquée qui favorise ce genre de phénomène. Il est à noter également la présence du hameau de Thareau à proximité.

La crue simulée dans le scénario a une période de retour de 200 ans.

8.3.1.3 Scénario n°2 : brèche des Grands Martins (crue T=20 ans)

Ce scénario peut être qualifié de « probable ».

Le scénario considère une formation de brèche par glissement du talus à partir de l'atteinte du niveau de crue d'occurrence 5 ans. Une forte érosion externe a été observée lors de la visite de terrain. De plus, une végétation ligneuse généralisée recouvre les talus. Le scénario est également motivé par la présence du hameau des Grands Martins en aval immédiat de la brèche.

La crue simulée dans le scénario a une période de retour de 20 ans.

8.3.1.4 Scénario n°2BIS : brèche aval des Grands Martins (crue T=200 ans)

Ce scénario peut être qualifié de « peu probable ».

Le scénario considère un risque de rupture par surverse pour une crue d'occurrence 200 ans. Au droit de ce qui constitue le point bas du système d'endiguement. Il convient de noter qu'au moment du déclenchement de la brèche, le val est déjà inondé par une trentaine de cm d'eau.

La crue simulée dans le scénario a une période de retour de 200 ans.

8.3.1.5 Scénario n°3 : brèche sur la levée de Charrin (crue T=10 ans)

Ce scénario peut être qualifié de « probable ».

Les mécanismes de rupture mis en jeu dans ce scénario sont l'érosion interne et le glissement. Le risque est justifié en partie par la présence d'une dépression côté val et d'un lit vif côté Loire constitué par un ancien méandre en eau. Le déclenchement de la brèche a lieu à l'atteinte du niveau de la crue décennale.

La crue simulée dans le scénario a une période de retour de 10 ans.

8.3.2 Intensité et cinétique des scénarios

L'intensité et la cinétique des scénarios sont appréciées au moyen du modèle hydraulique 1D à casiers LB11 développé à l'aide du logiciel HydraRiv.

La figure suivante présente des points de référence au sein du val de Saint Hilaire Fontaine qui seront utilisés dans les paragraphes suivants pour décrire l'intensité et la cinétique des scénarios, notamment l'évolution temporelle des niveaux d'eau.

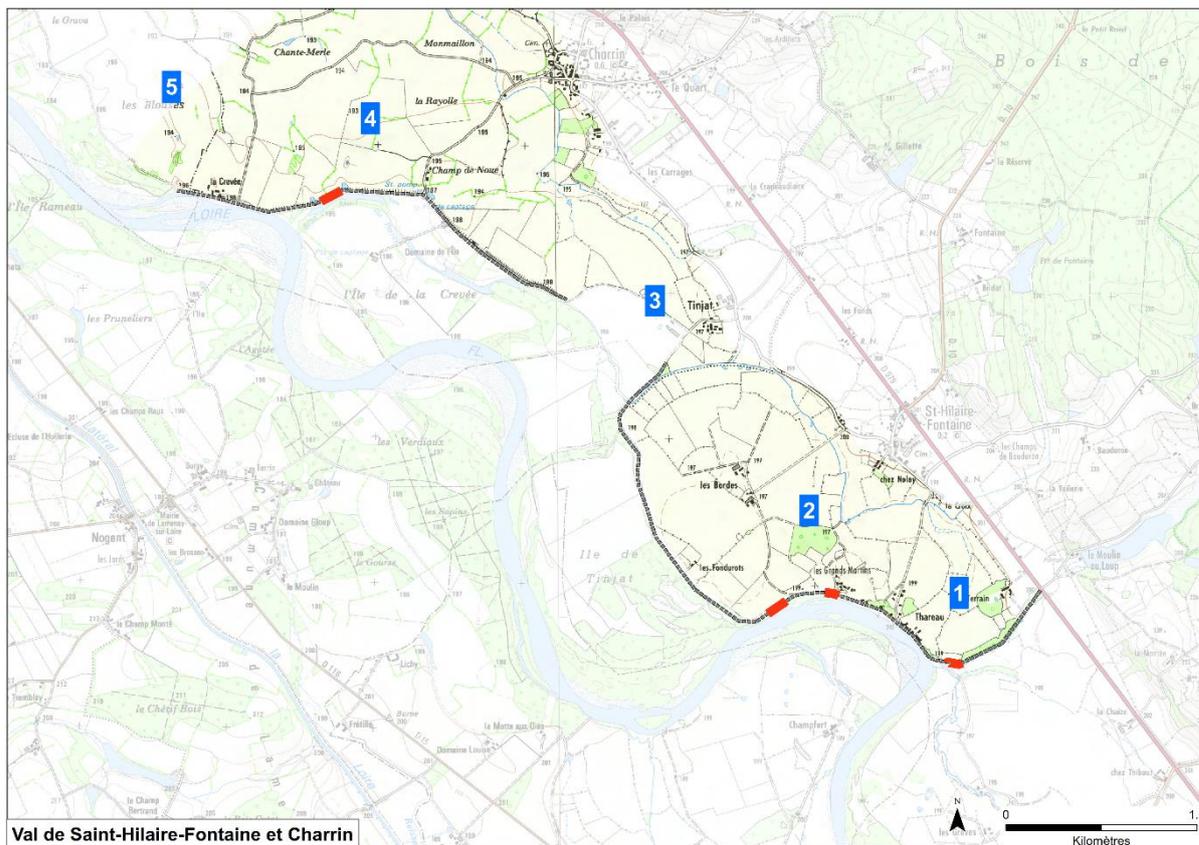


Figure 85 : Carte de localisation des points de référence du val de Saint Hilaire Fontaine

8.3.2.1 Scénario n°1 : brèche en amont du val (cruée $T=200$ ans)

8.3.2.1.1 Hypothèses

La simulation correspond à une rupture en amont du val par érosion interne au niveau d'une zone de glissement du talus. La largeur de la brèche est de 100 m. La brèche est supposée s'initier à compter de l'atteinte de Q5 et s'ouvre sur une durée de 1h30. La charge hydraulique au moment de la rupture est de 1,3 m.

Comme le montre la Figure 86 ci-après, le débit maximal entrant dans le val est de 550 m³/s. Le volume entrant dans le val est de 186 Hm³. L'hydrogramme de La Loire correspond à une crue type Q200.

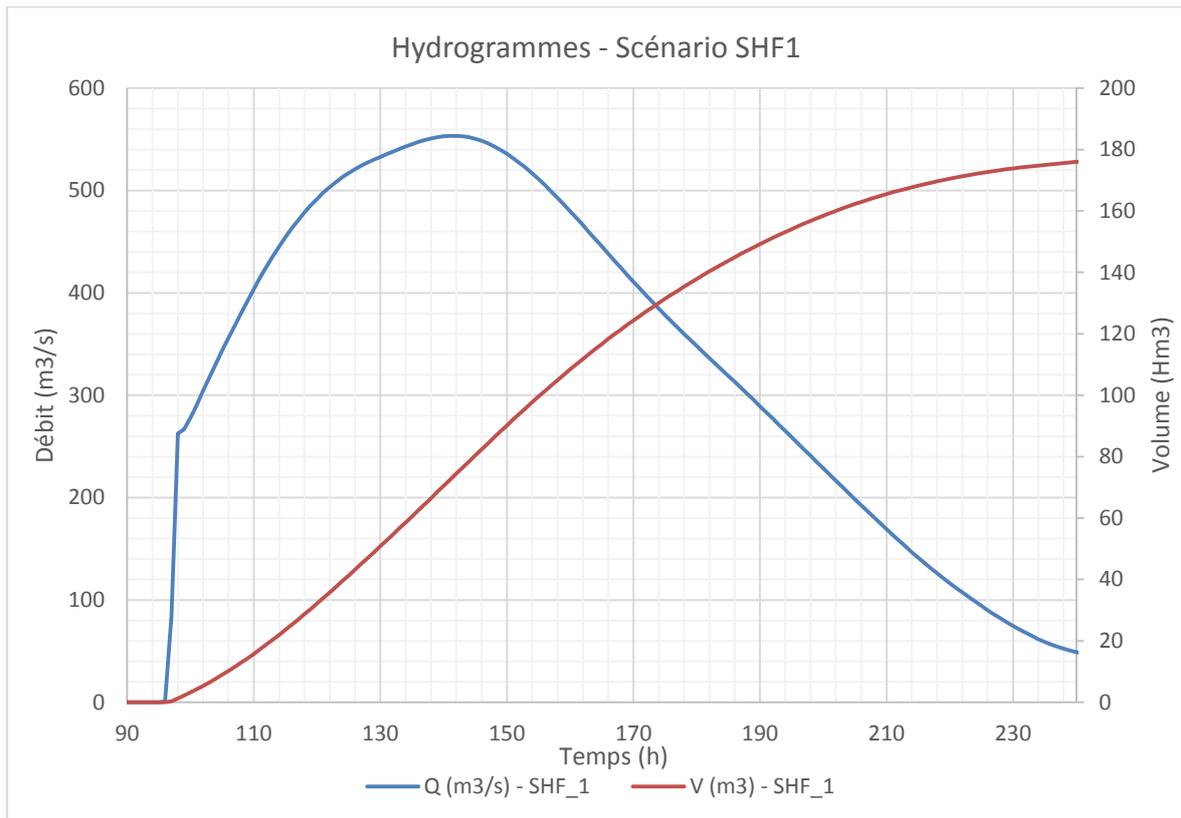


Figure 86 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche - Scénario 1

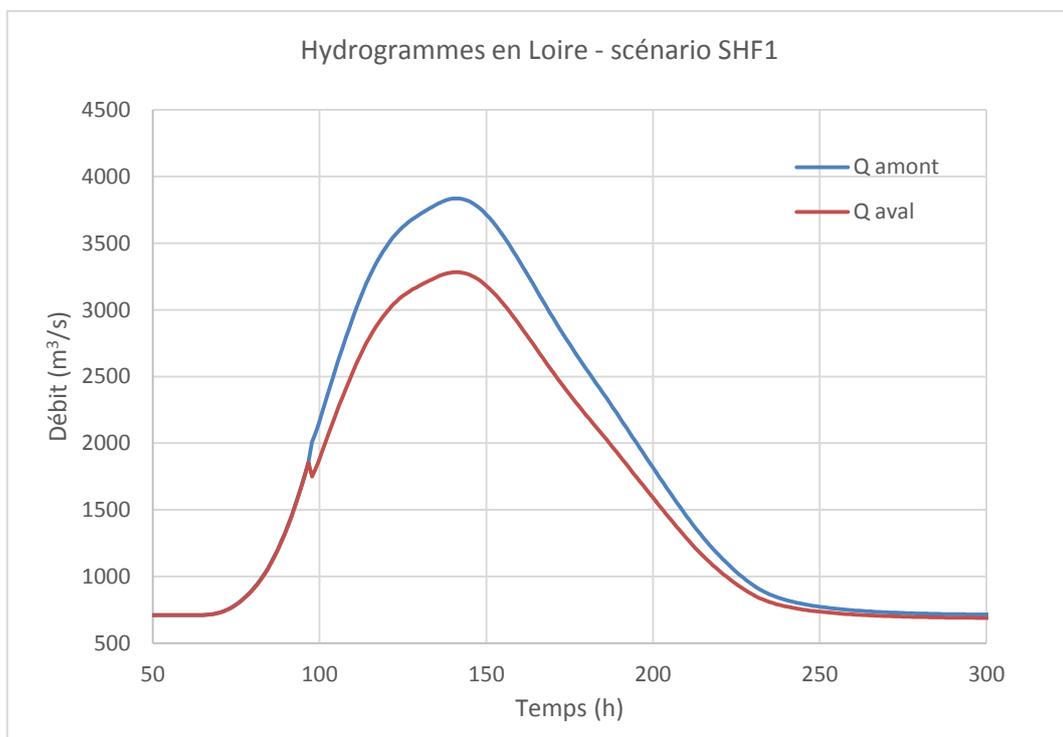


Figure 87 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche - Scénario 1

L'hydrogramme de rupture a une forme classique. On observe une augmentation rapide du débit au moment du déclenchement de la brèche. Le niveau augmente rapidement dans le val en aval de la brèche, la valeur du débit est ensuite liée à l'évolution du niveau en Loire.

8.3.2.1.2 Résultats

Hauteurs d'eau maximales et zone inondée :

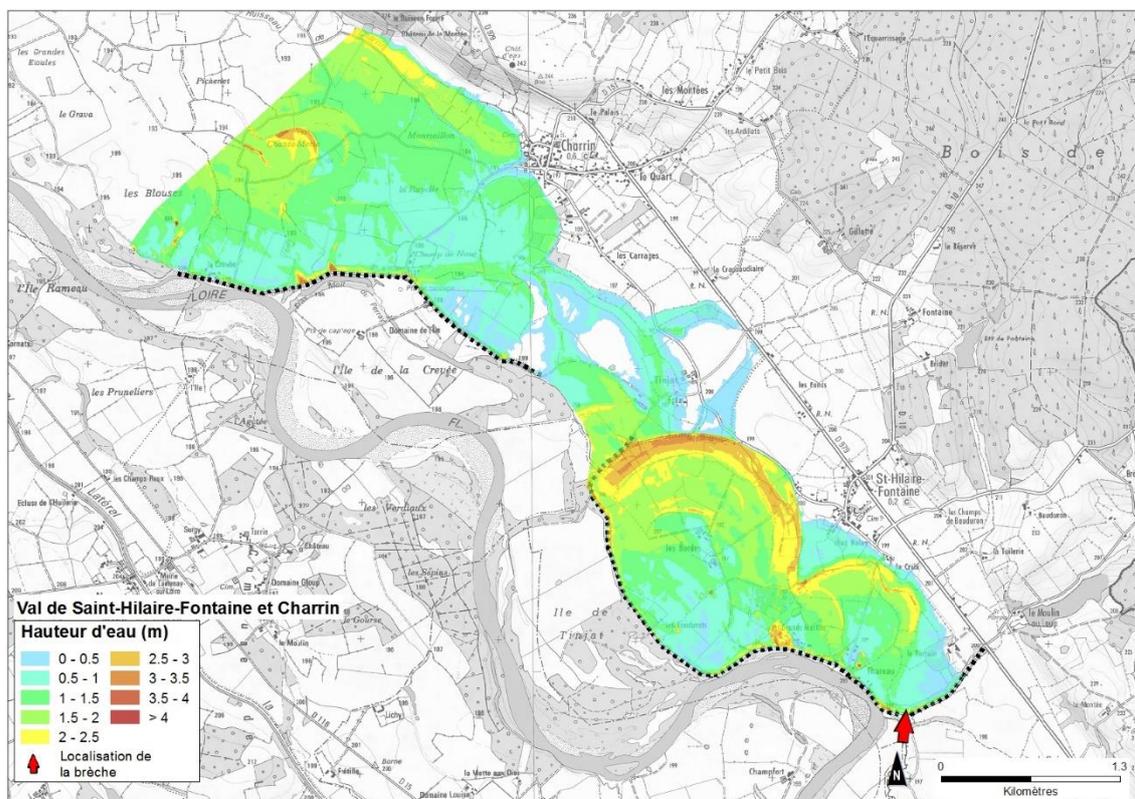


Figure 88 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario 1

Les hauteurs d'eau sont supérieures à 1,5 m dans les anciens méandres de la Loire. Les enjeux amont (Thareau, Grands Martins et les Bordes) sont impactés par une lame d'eau de l'ordre de 50 cm.

Cinétique :

Remarque : compte tenu du mode de représentation de ce val (casiers), les temps de propagation indiqués sont à considérer avec précaution et ne sont fournis qu'à titre informatif.

Le graphique ci-après présente l'évolution temporelle du niveau d'eau en plusieurs points du val (cf. carte de localisation Figure 85 ci-avant). Cela permet de visualiser la cinétique de propagation et de montée des eaux.

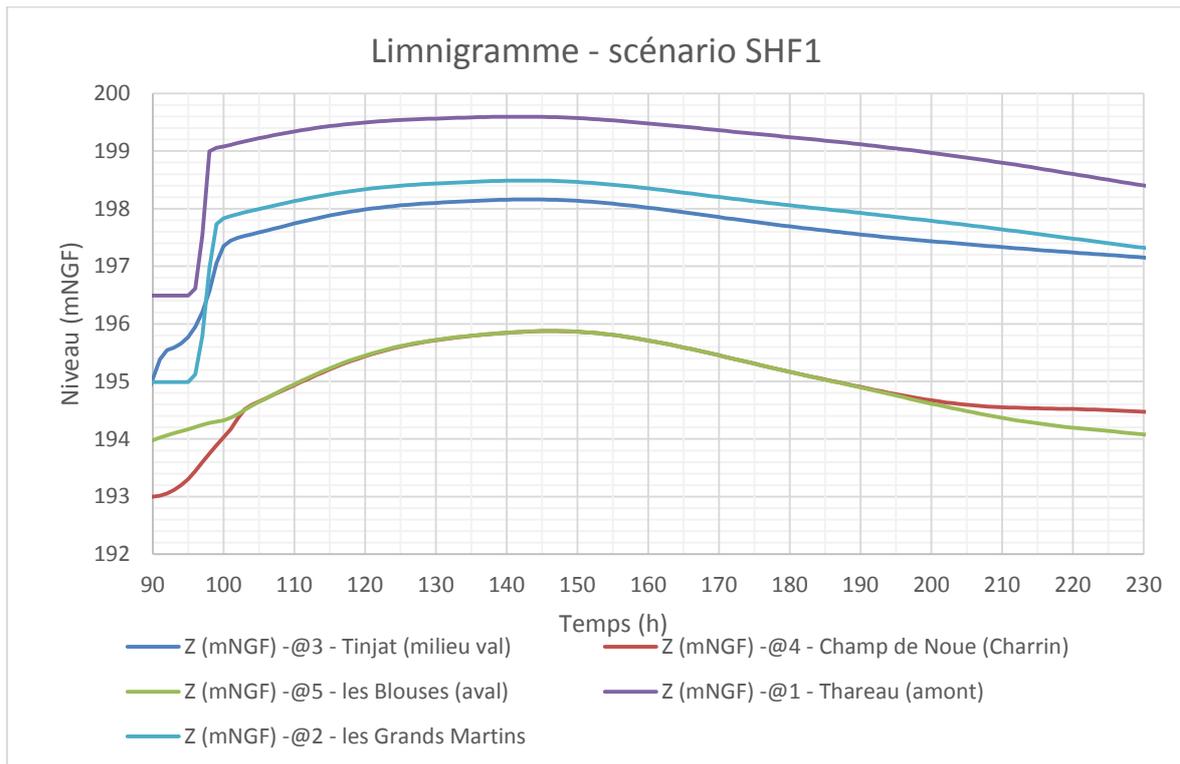


Figure 89 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine - Scénario 1

La montée des eaux se fait en environ 2 heures en aval immédiat de la brèche. L'onde de rupture se propage de l'amont vers l'aval : les Grands Martins (Point 2) et le Tinjat (Point 3) sont impactés 1 heure après le début de la rupture. Pour les autres points situés dans le sous-val de Charrin en aval, l'onde de rupture n'est pas perceptible car ils sont déjà inondés par le remous de la Loire.

8.3.2.2 Scénario n°2: brèche des Grands Martins (crue $T=20$ ans)

8.3.2.2.1 Hypothèses

La simulation correspond à une rupture au niveau des Grands Martins. Il s'agit d'une zone de forte érosion externe et de risque de rupture par glissement. De plus, des enjeux sont situés juste derrière la digue. La largeur de la brèche est de 100 m. La brèche est supposée s'initier à compter de l'atteinte de Q5 et s'ouvre en 3 heures. La charge hydraulique au moment de la rupture est de 1.8 m.

Comme le montre la Figure 90 ci-après, le débit maximal entrant dans le val est de $674 \text{ m}^3/\text{s}$. Le volume entrant dans le val est de 220 Hm^3 . L'hydrogramme de La Loire correspond à une crue type Q20.

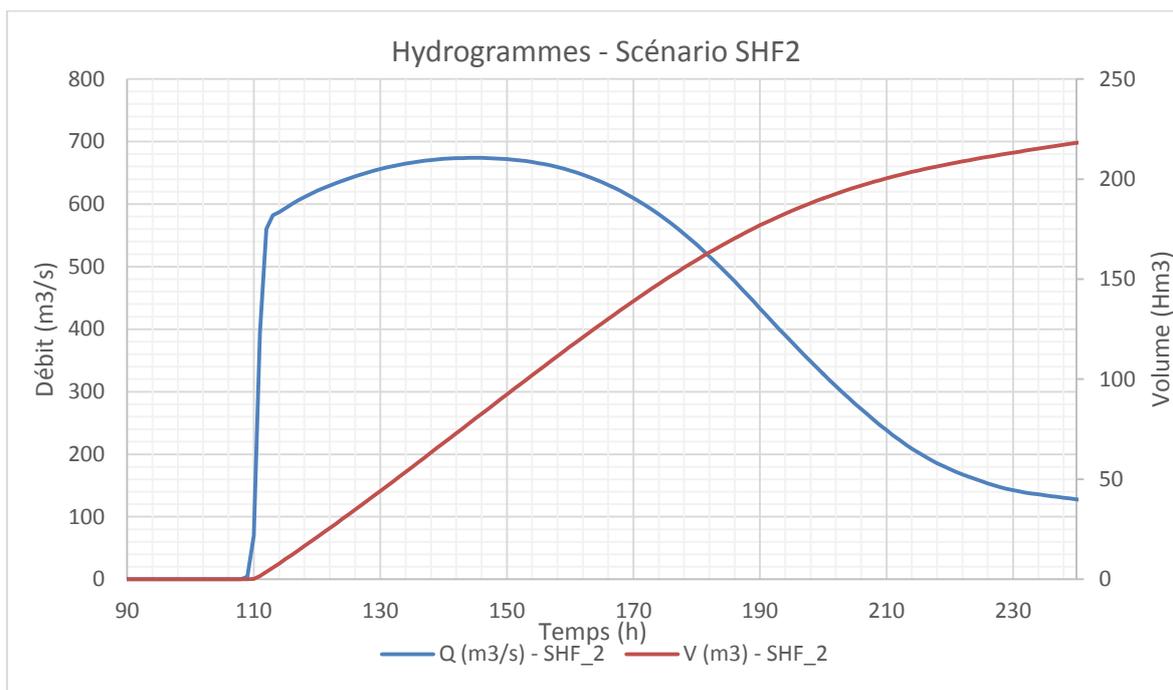


Figure 90 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche - Scénario 2

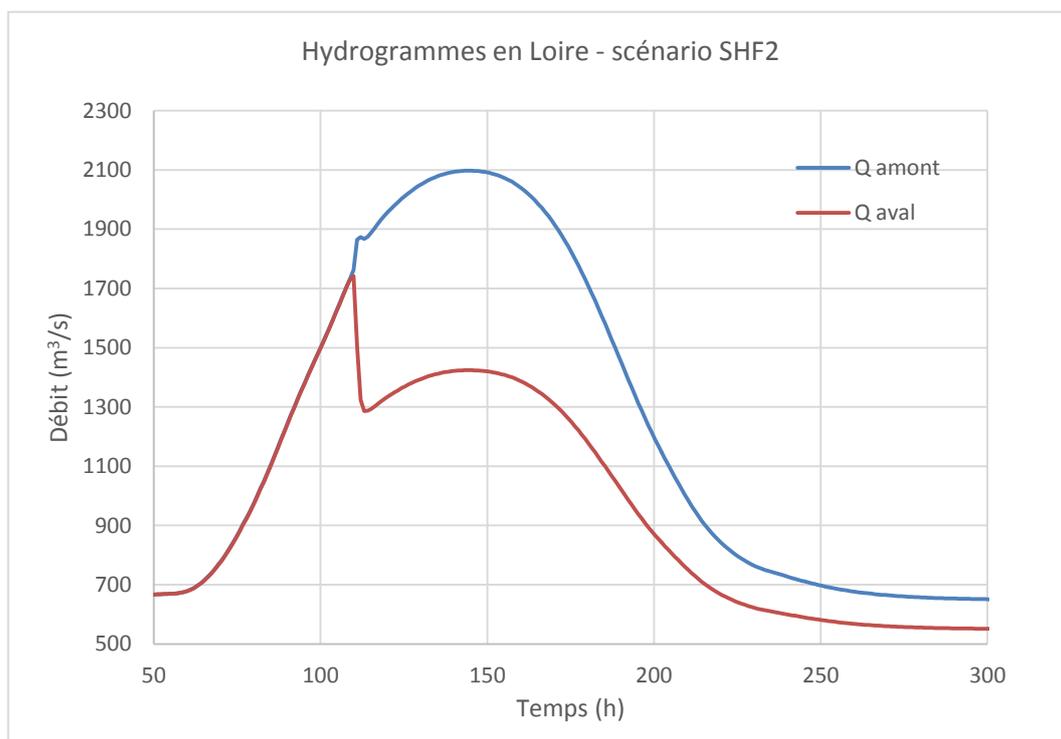


Figure 91 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche - Scénario 2

L'hydrogramme de rupture se caractérise par une augmentation rapide du débit à mesure que la brèche s'ouvre. Le niveau augmente rapidement dans le val en aval de la brèche, le débit augmente ensuite progressivement en suivant l'évolution du niveau en Loire. Le val étant ouvert, on observe un écoulement parallèle à la Loire à travers le val.

8.3.2.2 Résultats

Hauteurs d'eau maximales et zone inondée :

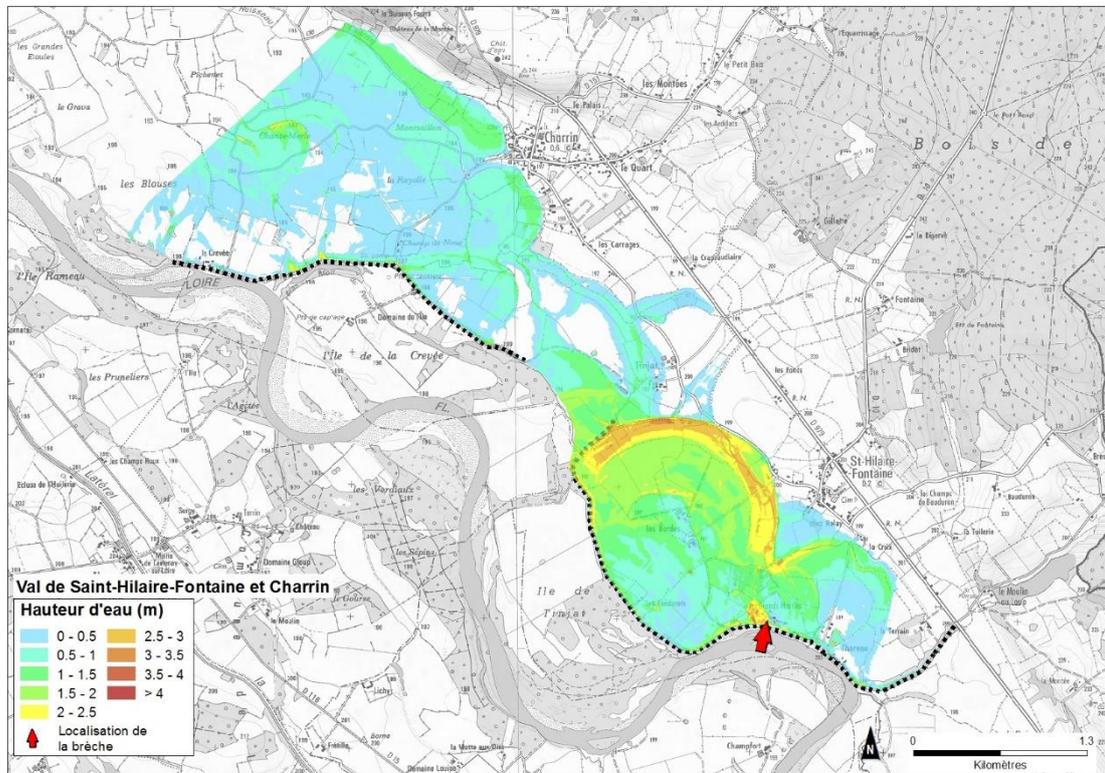


Figure 92 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario 2

Les hauteurs d'eau maximales sont semblables au scénario précédent dans le val amont. Le val aval est moins inondé par le remous de la Loire.

Cinétique :

Rappel : compte tenu du mode de représentation de ce val (casiers), les temps de propagation indiqués sont à considérer avec précaution et ne sont fournis qu'à titre informatif.

Le graphique ci-après présente l'évolution temporelle du niveau d'eau en plusieurs points du val (cf. carte de localisation Figure 85 ci-avant). Il permet de visualiser la cinétique de propagation et de montée des eaux.

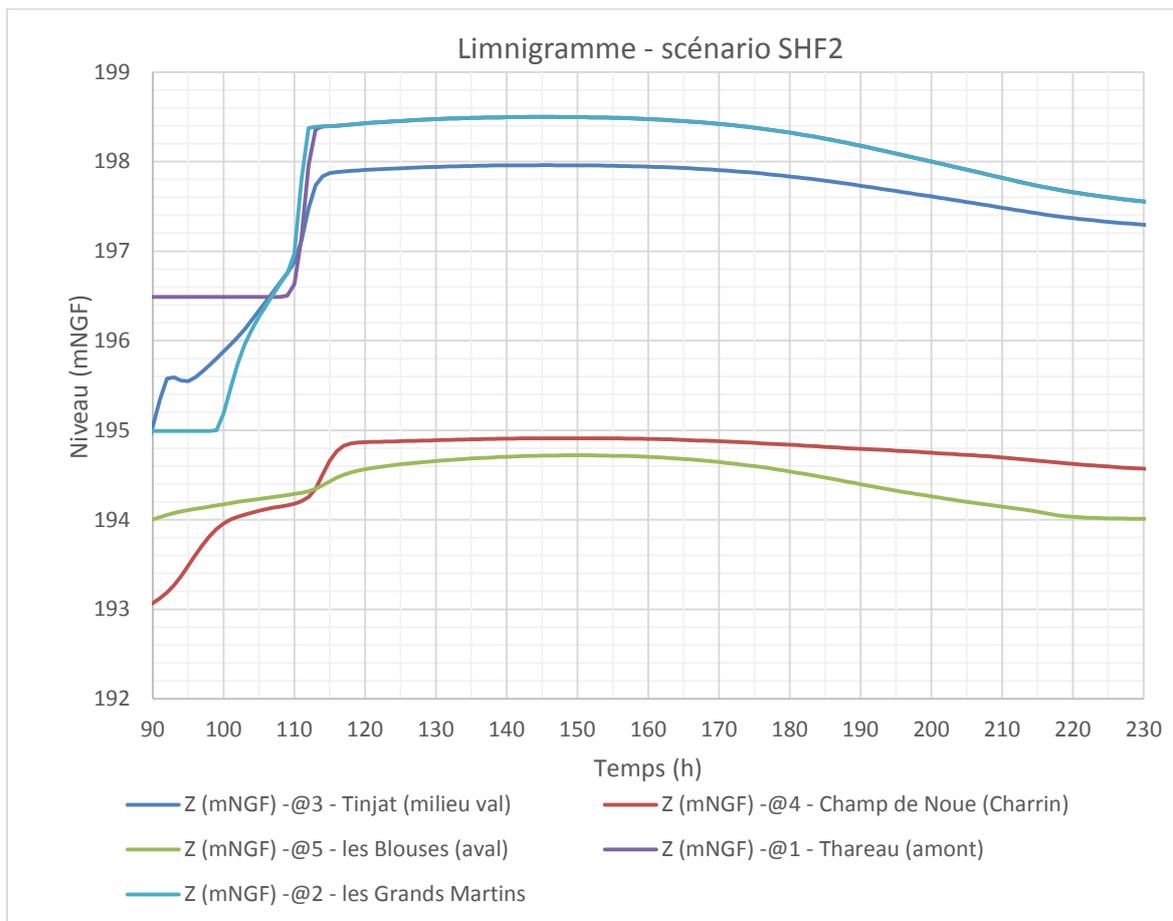


Figure 93 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine - Scénario 2

Comme pour le scénario 1, on observe une montée rapide des eaux en aval immédiat de la brèche. Les lieux situés à proximité (point 1 et 3) sont impactés par l'onde rupture en moins d'une heure. A l'inverse du scénario 1, on observe également un exhaussement du niveau aux points 4 et 5 situés à l'aval. En effet, le remous est moins marqué pour la crue Q20 simulée dans ce scénario 2. L'onde de rupture arrive au Champ de Noue et aux Blouses environ 3 heures après le début de la formation de la brèche.

8.3.2.3 Scénario n°2bis : brèche en aval des Grands Martins (crue T=200 ans)

8.3.2.3.1 Hypothèses

La simulation correspond à une rupture par surverse en aval des Grands Martins pour une crue de la Loire d'occurrence 200 ans. Il s'agit du point bas du système d'endiguement. A noter que pour cette occurrence, le remous qui entre par la zone non endiguée en milieu de val inonde ce dernier d'environ 30 cm. La brèche a une largeur de 150 m et s'ouvre en 2h30. La charge hydraulique au moment de la rupture est de 1,8 m.

Comme le montre la Figure 94 ci-après, le débit maximal entrant dans le val est de 1250 m³/s. Le volume entrant dans le val est de l'ordre de 290 Hm³. L'hydrogramme de La Loire correspond à une crue type Q200.

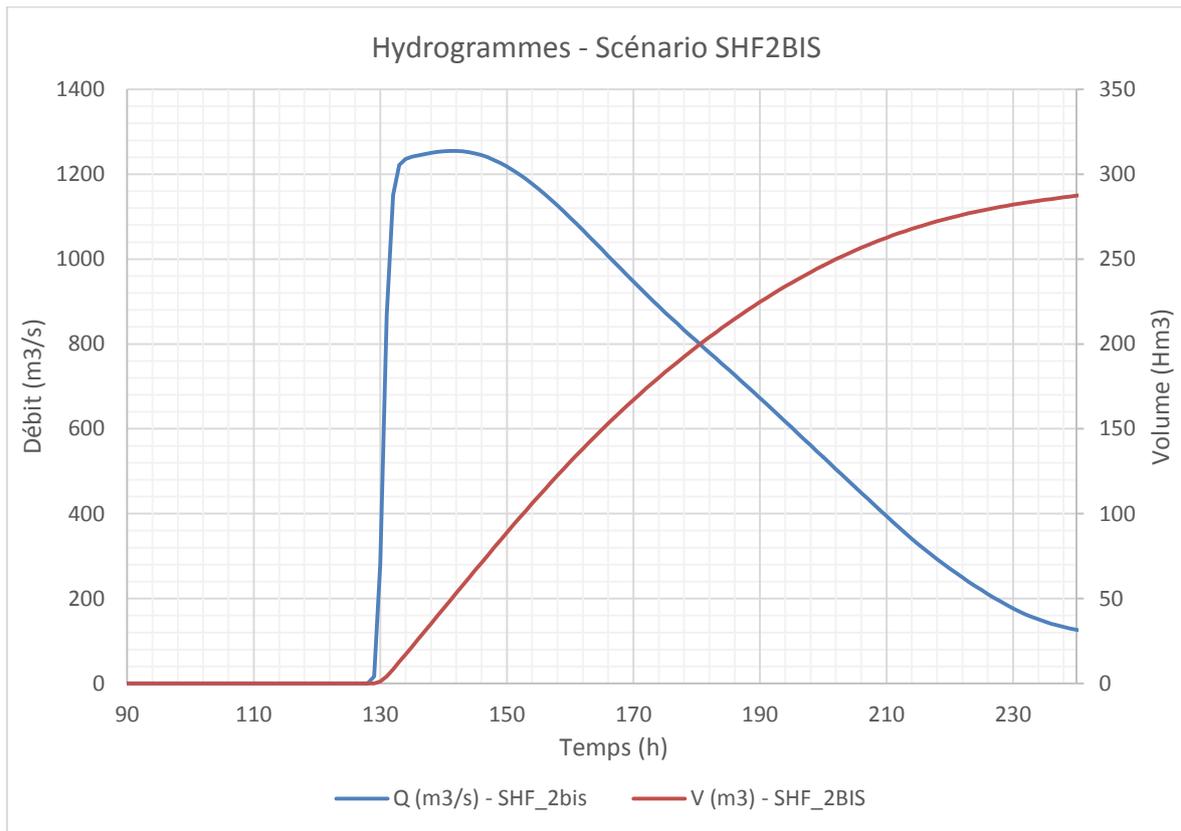


Figure 94 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche - Scénario 2BIS

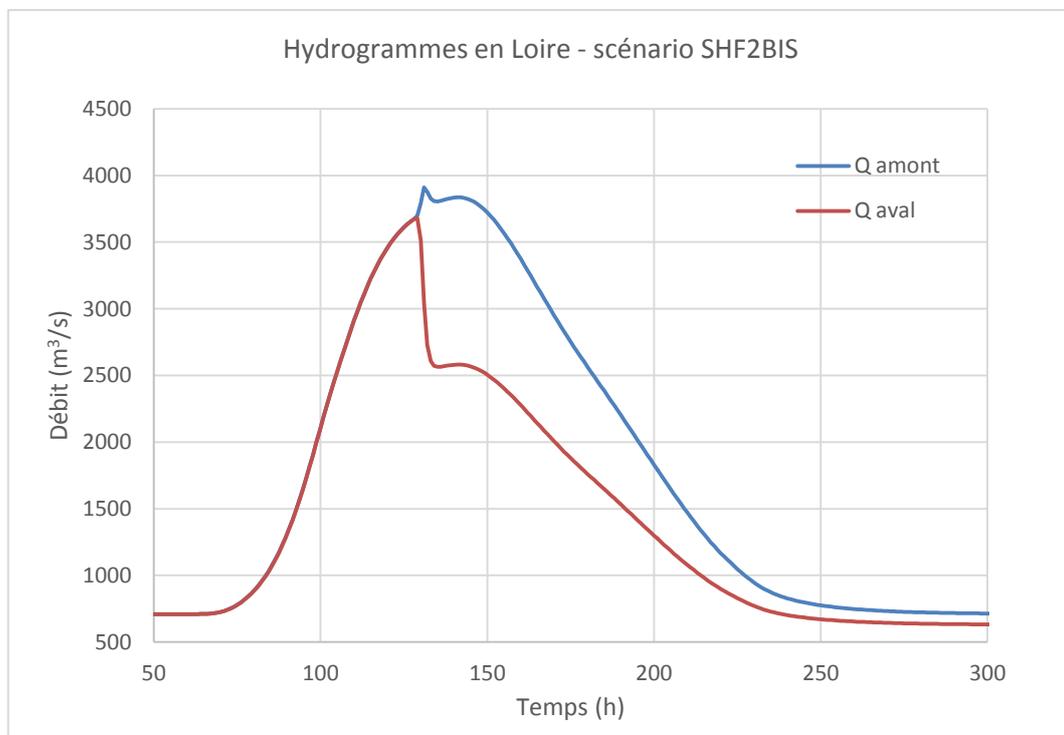


Figure 95 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche - Scénario 2BIS

La forme de l'hydrogramme se caractérise par une augmentation soudaine du débit due à l'ouverture de la brèche. Une fois les niveaux équilibrés, un écoulement parallèle à la Loire s'établit à travers le val. Le débit diminue ensuite progressivement en suivant l'évolution du niveau en Loire.

8.3.2.3.2 Résultats

Hauteurs d'eau maximales et zone inondée :

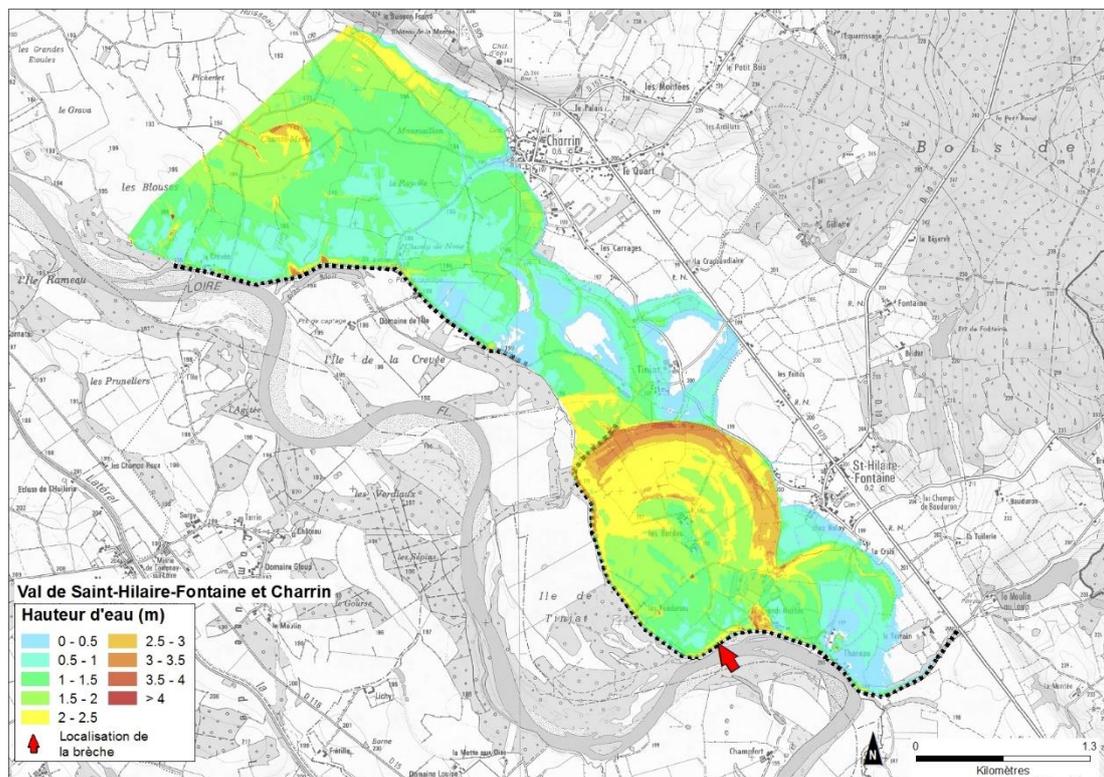


Figure 96 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario 3

Les hauteurs d'eau maximales sont supérieures aux scénarios précédents. Cela s'explique par la forte charge hydraulique au moment de la rupture et la crue d'occurrence 200 ans simulée. Ainsi, on constate des hauteurs d'environ 2,5 m dans les anciens méandres. Les enjeux des Grands Martins et des Bordes sont inondés par des hauteurs d'eau d'environ 1 m, voir localement 1,5 m.

Cinétique :

Rappel : compte tenu du mode de représentation de ce val (casiers), les temps de propagation indiqués sont à considérer avec précaution et ne sont fournis qu'à titre informatif.

Le graphique ci-après présente l'évolution temporelle du niveau d'eau en plusieurs points du val (cf. carte de localisation Figure 85 ci-avant). Il permet de visualiser la cinétique de propagation et de montée des eaux.

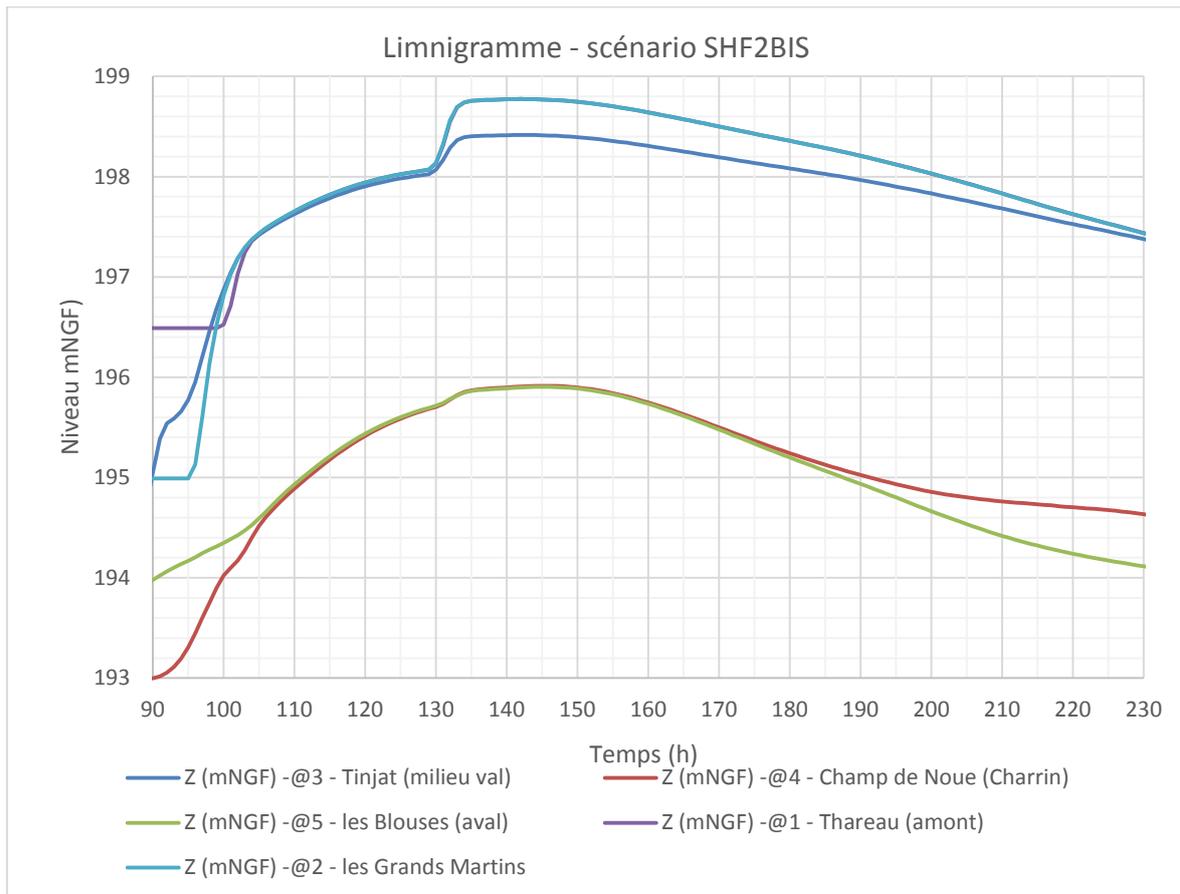


Figure 97 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine - Scénario 2BIS

Les limnigrammes 1, 2 et 3 mettent en évidence l'établissement du remous provenant du milieu du val, avant la formation de la brèche à la cote de 198 mNGF. On note l'augmentation soudaine du niveau à $t=130h$, au moment de la rupture, en particulier aux Grands Martins, situés en aval immédiat. L'onde de rupture se fait faiblement ressentir aux points 4 et 5. Cela s'explique par le fait que ces secteurs sont fortement noyés par le remous de la Loire pour cette occurrence de crue.

8.3.2.4 Scénario n°3 : brèche sur la levée de Charrin (crue $T=10$ ans)

8.3.2.4.1 Hypothèses

La simulation correspond à une rupture de la levée de Charrin par érosion interne ou par glissement dès la crue décennale. Un bras mort est présent côté Loire tandis qu'une dépression en eau est observée côté val. De plus, une brèche historique s'est déjà produite dans ce secteur. La brèche a une largeur 150m et s'ouvre en 3 heures. La charge hydraulique au moment de la rupture est de 1.5 m.

Comme le montre la figure 91 ci-après, le débit maximal entrant dans le val est de $261 \text{ m}^3/\text{s}$. Le volume entrant dans le val est de 150 Hm^3 . hydrogramme de La Loire correspond à une crue type Q10.

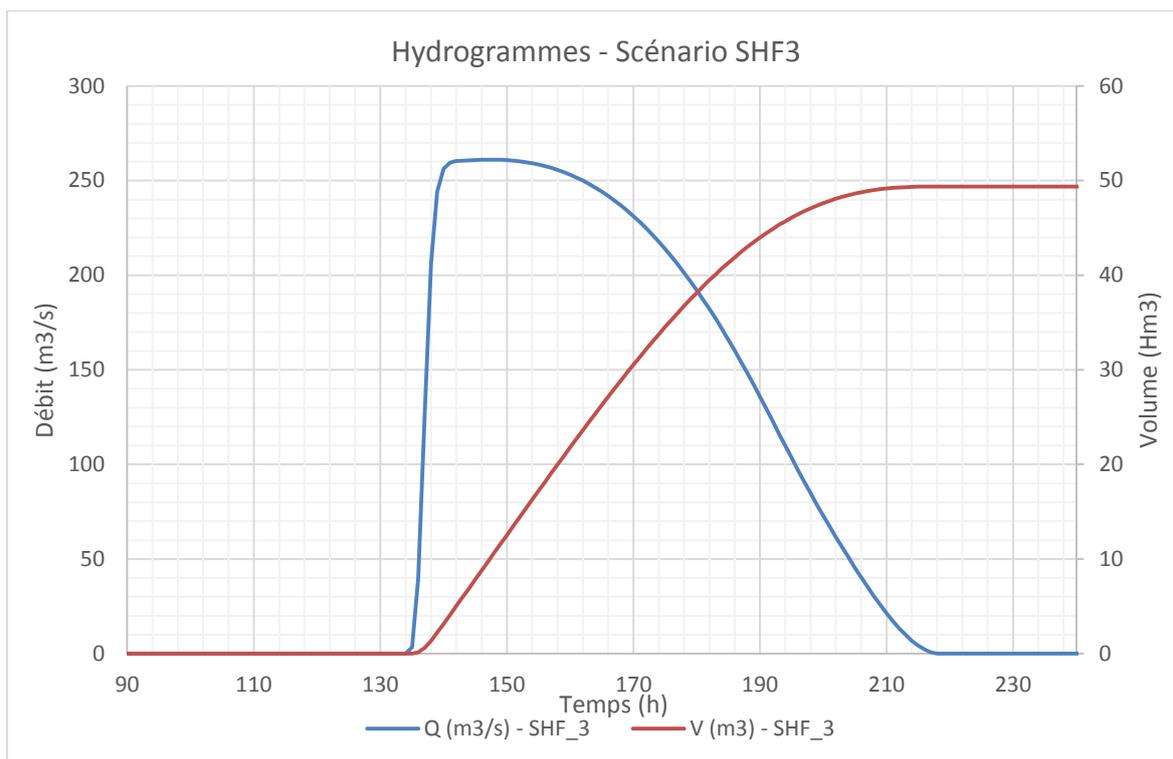


Figure 98 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche - Scénario 3

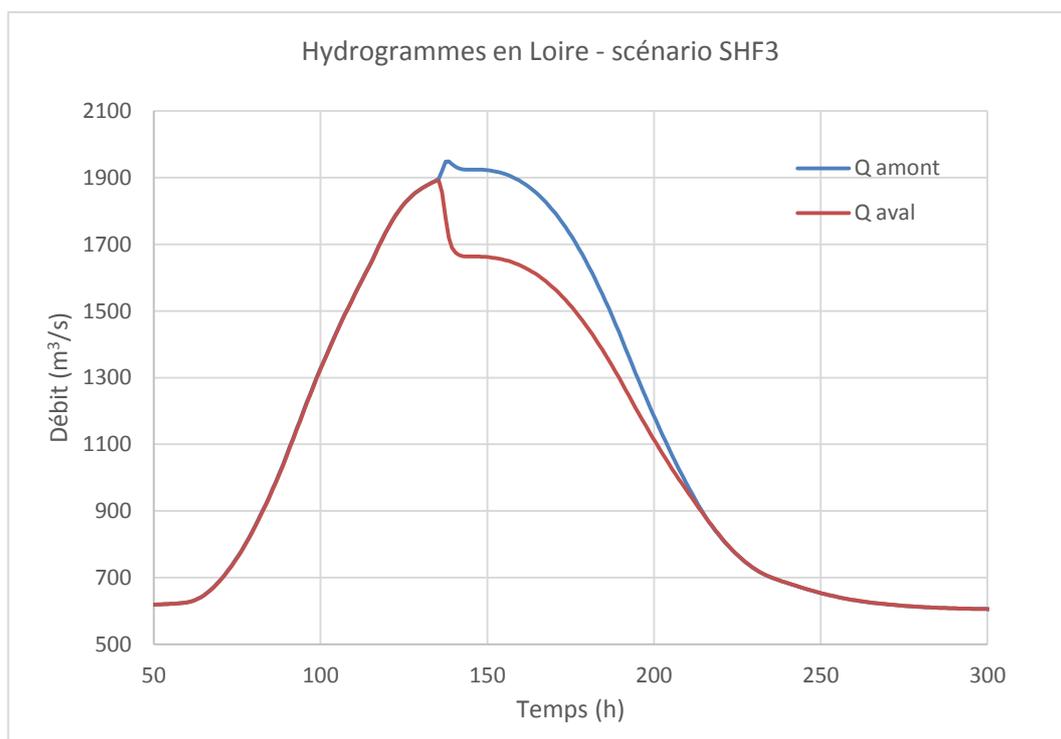


Figure 99 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche - Scénario 3

L'hydrogramme est semblable à ceux des scénarios précédents, soit une augmentation rapide du débit jusqu'à ouverture totale de la brèche et établissement d'un écoulement parallèle à travers le val.

8.3.2.4.2 Résultats

Hauteurs d'eau maximales et zone inondée :

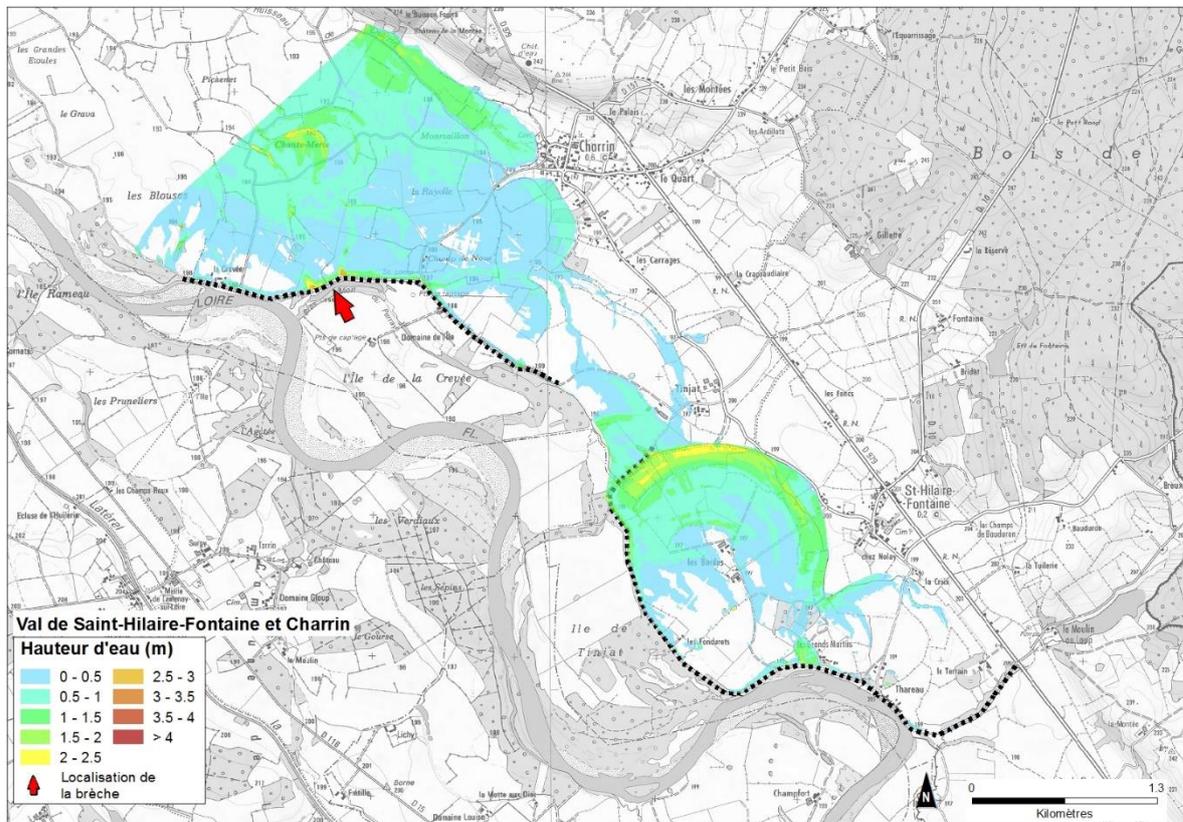


Figure 100 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario 4

Cinétique :

Rappel : compte tenu du mode de représentation de ce val (casiers), les temps de propagation indiqués sont à considérer avec précaution et ne sont fournis qu'à titre informatif.

Le graphique ci-après présente l'évolution temporelle du niveau d'eau en plusieurs points du val (cf. carte de localisation Figure 85 ci-avant). Il permet de visualiser la cinétique de propagation et de montée des eaux.

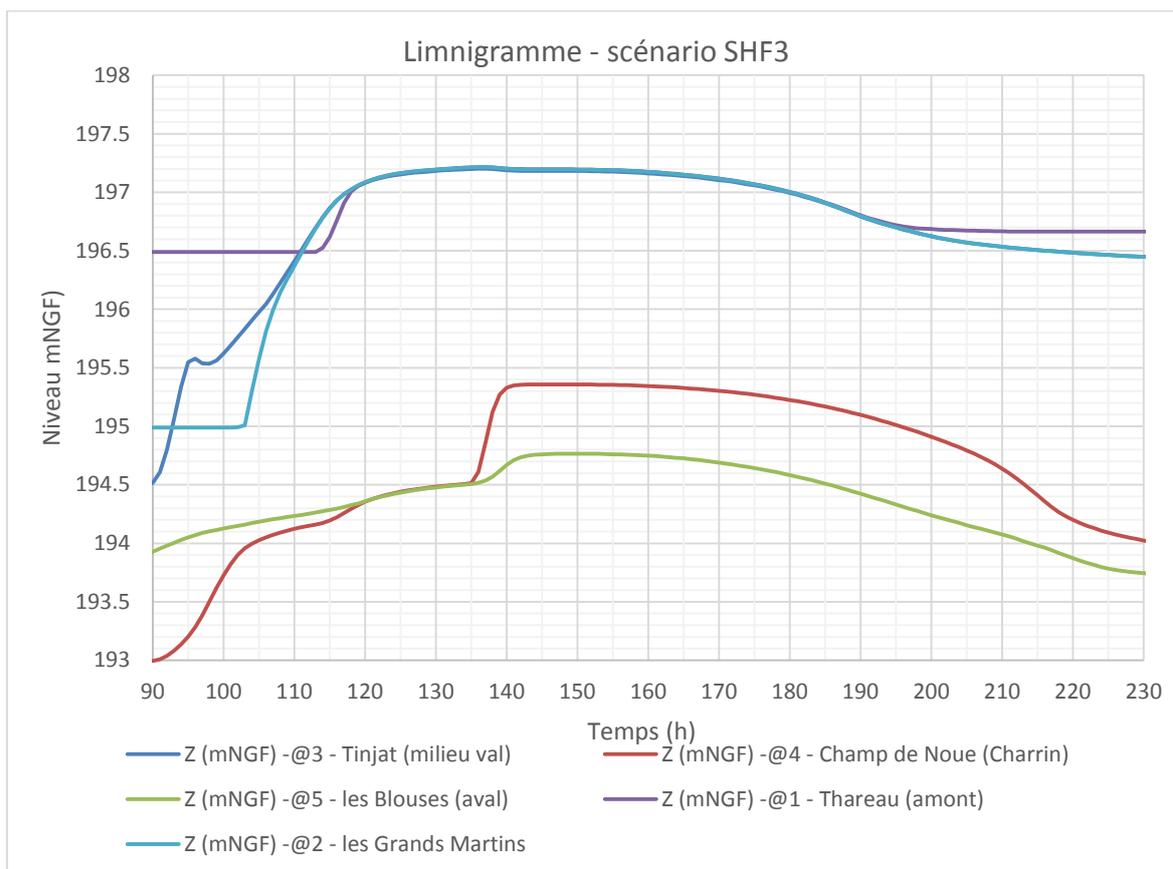


Figure 101 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Saint Hilaire Fontaine - Scénario 3

Les points 1, 2 et 3 en amont sont faiblement inondés par remous, principalement au niveau des points bas. Ils ne sont cependant pas impactés par la rupture. En revanche, on observe bien l'augmentation rapide du niveau d'environ 1 m au droit de Champ de Noue à proximité de Charrin (Point 4). L'impact est plus faible en aval au niveau des Blouses (Point 5). La propagation se fait en moins d'une heure.

8.3.2.5 Zone de destruction du bâti derrière une brèche

Les études historiques menées sur la Loire ont montré qu'en cas de brèche, la longueur de l'affouillement en arrière de la levée (fosse d'érosion) avait pour ordre de grandeur cent fois la hauteur d'eau au moment de la rupture.

Aussi, en complément aux zones d'aléa déterminées précédemment pour les différents scénarios de brèches, une zone de destruction du bâti en arrière des levées est définie en considérant que l'effet de destruction du bâti lié à la dissipation de l'énergie derrière une brèche potentielle s'étend à une distance, mesurée à partir du pied de digue, égale à cent fois la différence entre le niveau de protection, soit la crue Q200, et le niveau du terrain naturel dans le val.

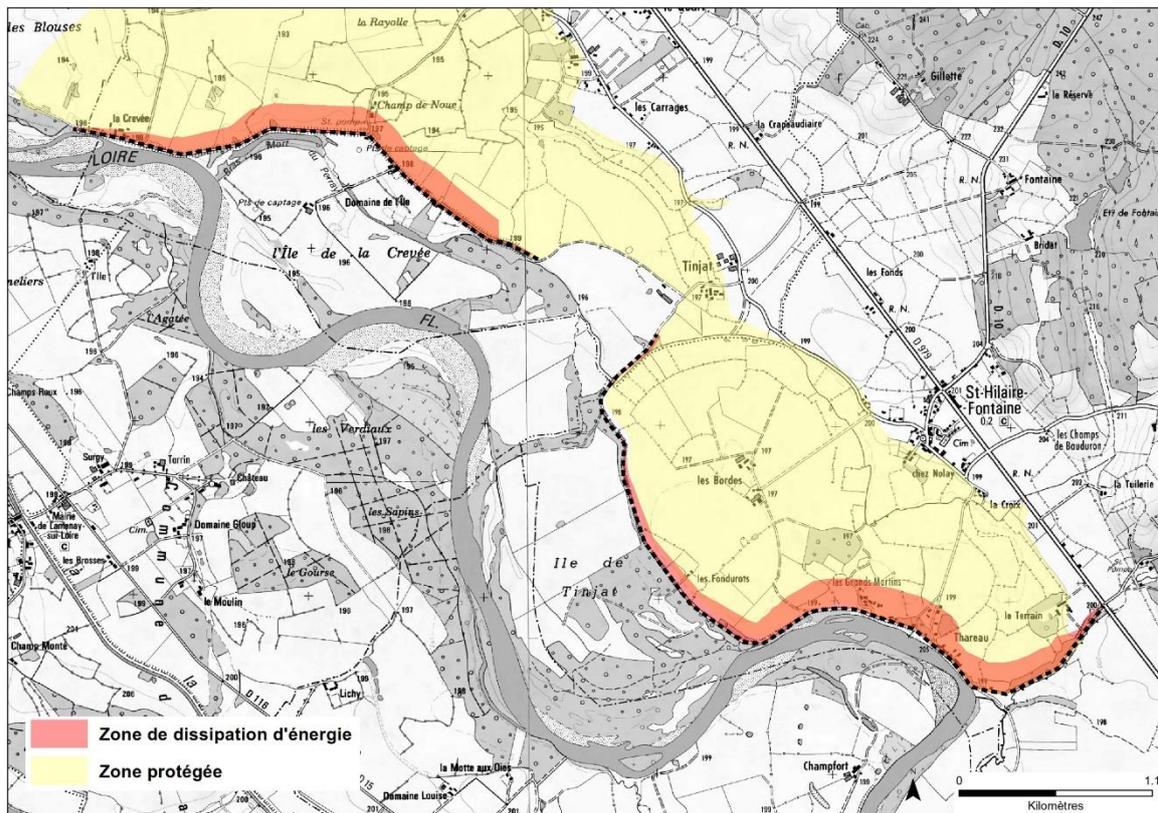


Figure 102 : zone de destruction du bâti en arrière des levées

8.3.3 Gravité des scénarios

La caractérisation de l'aléa d'inondation se base sur la seule hauteur d'eau maximale. Ces hauteurs d'eau sont obtenues par spatialisation des cotes casiers calculées par le modèle hydraulique et soustraction des cotes du terrain naturel (TN) issues du MNT Loire amont.

hauteur d'eau	supérieure à 2.5 m	4. Très fort	5. zone de destruction du bâti
	entre 1 m et 2.5 m	3. Fort	
	entre 50cm et 1 m	2. Moyen	
	entre 0 et 50 cm	1. Faible	

Tableau 33 (rappel) : Grille de définition de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau

La mise en application de cette grille de classes d'aléa permet d'obtenir les cartes d'aléa pour les différents scénarios d'inondation étudiés.

Comme indiqué précédemment, la gravité des scénarios est évaluée au travers du dénombrement des personnes exposées et en danger.

8.3.3.1 Scénario n°1 : brèche en amont du val (crue T=200 ans)

- Débit maximal de la brèche : 550 m³/s
- Volume entrant dans le val : 186 Mm³.

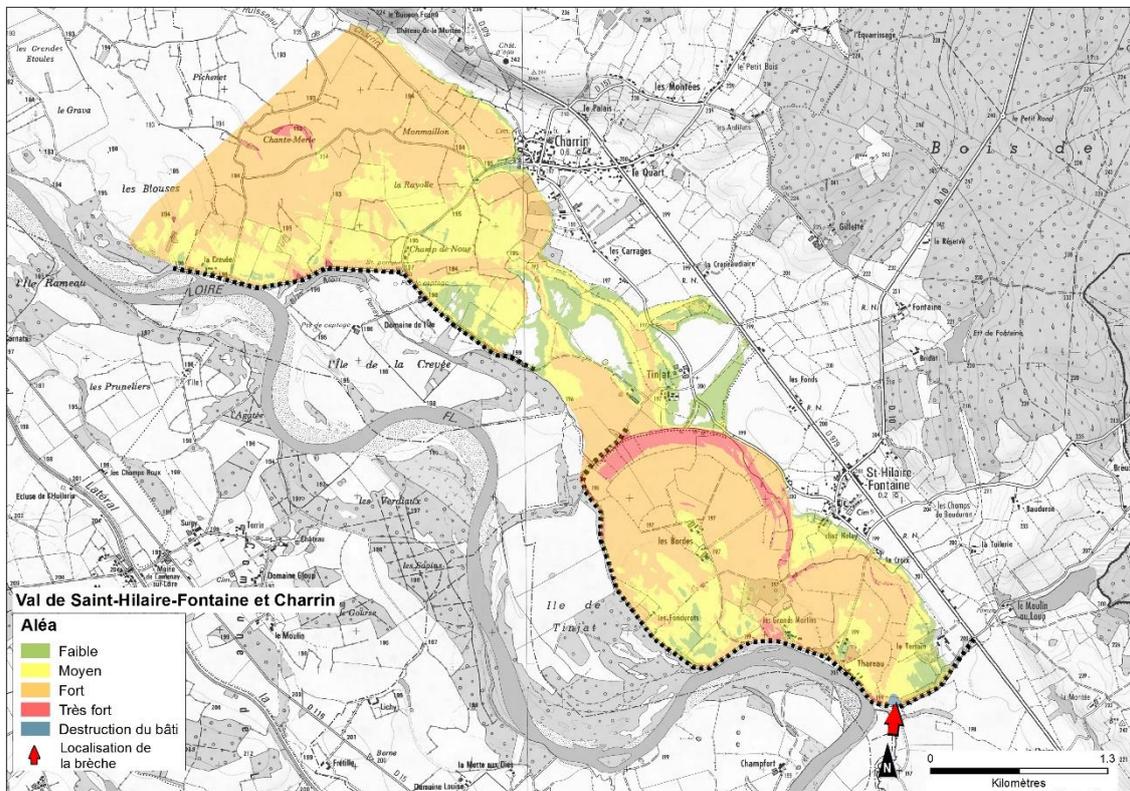


Figure 103 : Carte des aléas - Scénario 1

Le chapitre 8.3.2.1 a montré que l'onde de rupture impacte uniquement le val de Saint Hilaire à l'amont. En effet, le val de Charrin à l'aval est inondé par remous et on ne constate pas d'exhaussement du niveau consécutivement à l'onde de rupture. Ainsi, l'analyse de la gravité portera seulement sur les enjeux inondés sur la commune de Saint Hilaire (en y ajoutant le hameau de Tinjat).

intensité de l'aléa d'inondation	nombre d'habitants	nombre de personnes en danger
1. Faible	6	0
2. Moyen	11	1
3. Fort	5	1
4. Très fort	0	0
5. Zone de destruction du bâti	0	0
Total tous aléa	22	2

Tableau 34 : Nombres d'habitants impactés et en danger - Scénario 1

Aucun enjeu sensible n'est impacté par ce scénario de rupture.

Compte tenu de ces éléments, le niveau de gravité de ce scénario de rupture peut être qualifié de « modéré ».

8.3.3.2 Scénario n°2: brèche des Grands Martins (crue T=20 ans)

- Débit maximal de la brèche : 674 m³/s
- Volume entrant dans le val : 220 Mm³.

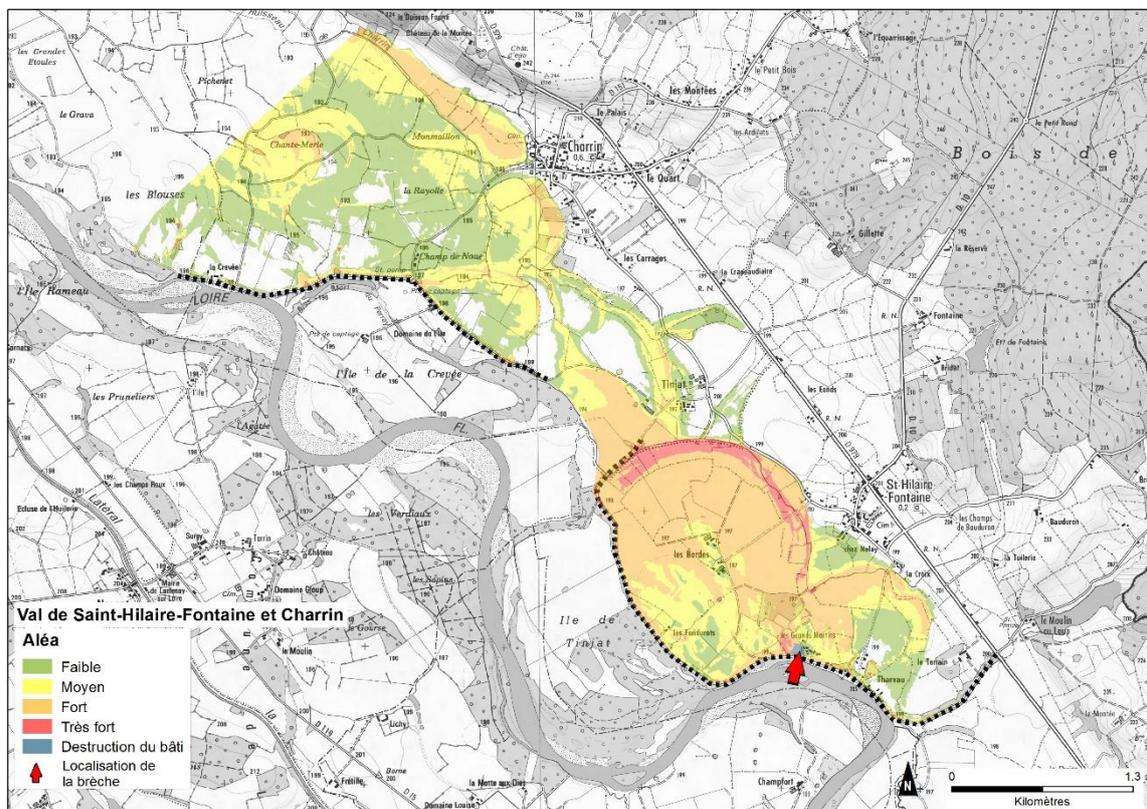


Figure 104 : Carte des aléas - Scénario 2

Le chapitre 8.3.2.2 a montré que l'onde de rupture impactait le val de Charrin à l'aval. Ainsi, l'analyse de la gravité portera sur l'ensemble du val (Thareau + Charrin).

intensité de l'aléa d'inondation	nombre d'habitants	nombre de personnes en danger
1. Faible	15	0
2. Moyen	6	1
3. Fort	1	0
4. Très fort	0	0
5. Zone de destruction du bâti	0	0
Total tous aléas	22	1

Tableau 35 : Nombres d'habitants impactés et en danger - Scénario 2

Aucun enjeu sensible n'est impacté par ce scénario de rupture.

Compte tenu de ces éléments, le niveau de gravité de ce scénario de rupture peut être qualifié de « modéré ».

8.3.3.3 Scénario n°2BIS : brèche en aval des Grands Martins (crue T=200 ans)

- Débit maximal de la brèche : 1250 m³/s
- Volume entrant dans le val : 290 Mm³.

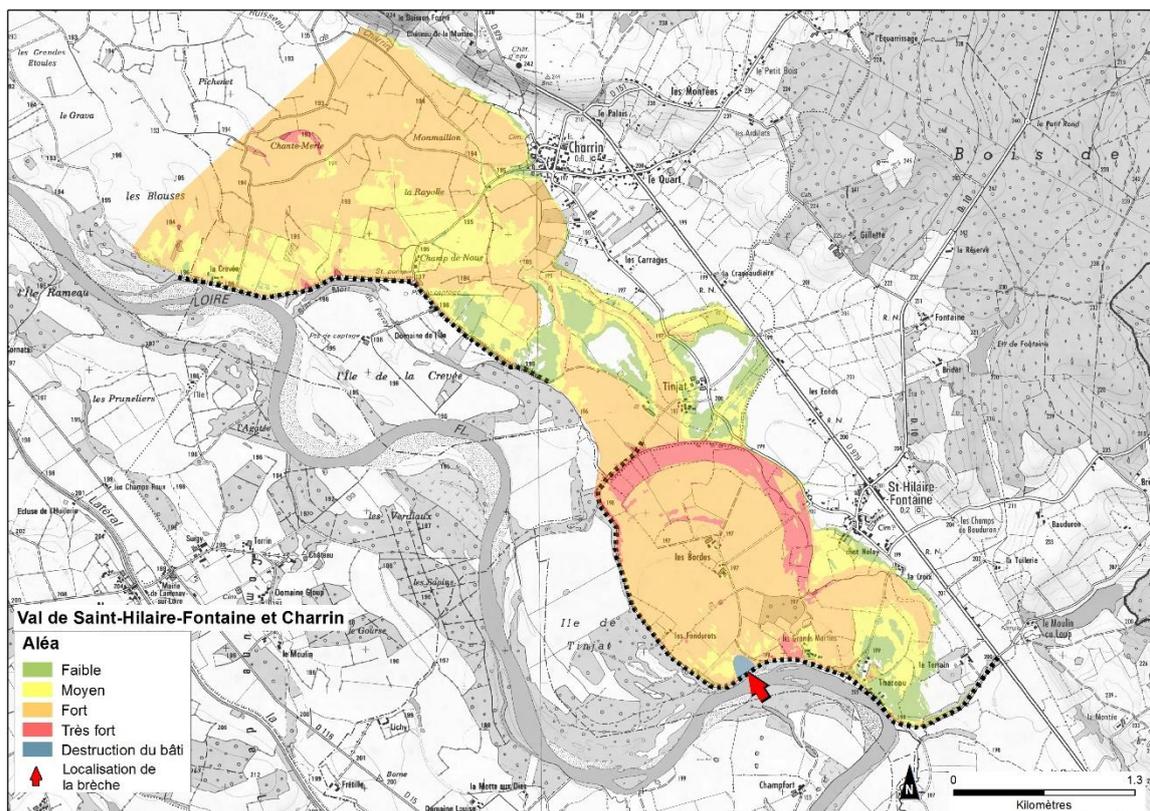


Figure 105 : Carte des aléas - Scénario 2BIS

Comme pour le scénario 1, il sera considéré seulement la commune de Saint Hilaire pour l'analyse de la gravité, en y ajoutant le hameau de Tinjat. Dans le cas de ce scénario, l'onde de rupture se fait ressentir dans le val de Charrin mais elle ne provoque pas un impact significatif sur les niveaux maximaux.

intensité de l'aléa d'inondation	nombre d'habitants	nombre de personnes en danger
1. Faible	9	0
2. Moyen	7	1
3. Fort	5	1
4. Très fort	0	0
5. Zone de destruction du bâti		
Total tous aléas	21	2

Tableau 36 : Nombres d'habitants impactés et en danger - Scénario 2BI5

Aucun enjeu sensible n'est impacté par ce scénario de rupture.

Compte tenu de ces éléments, le niveau de gravité de ce scénario de rupture peut être qualifié de « modéré ».

8.3.3.4 Scénario n°3 : brèche sur la levée de Charrin (crue T=10 ans)

- Débit maximal de la brèche : 261 m³/s
- Volume maximal dans le val : 150 Mm³.

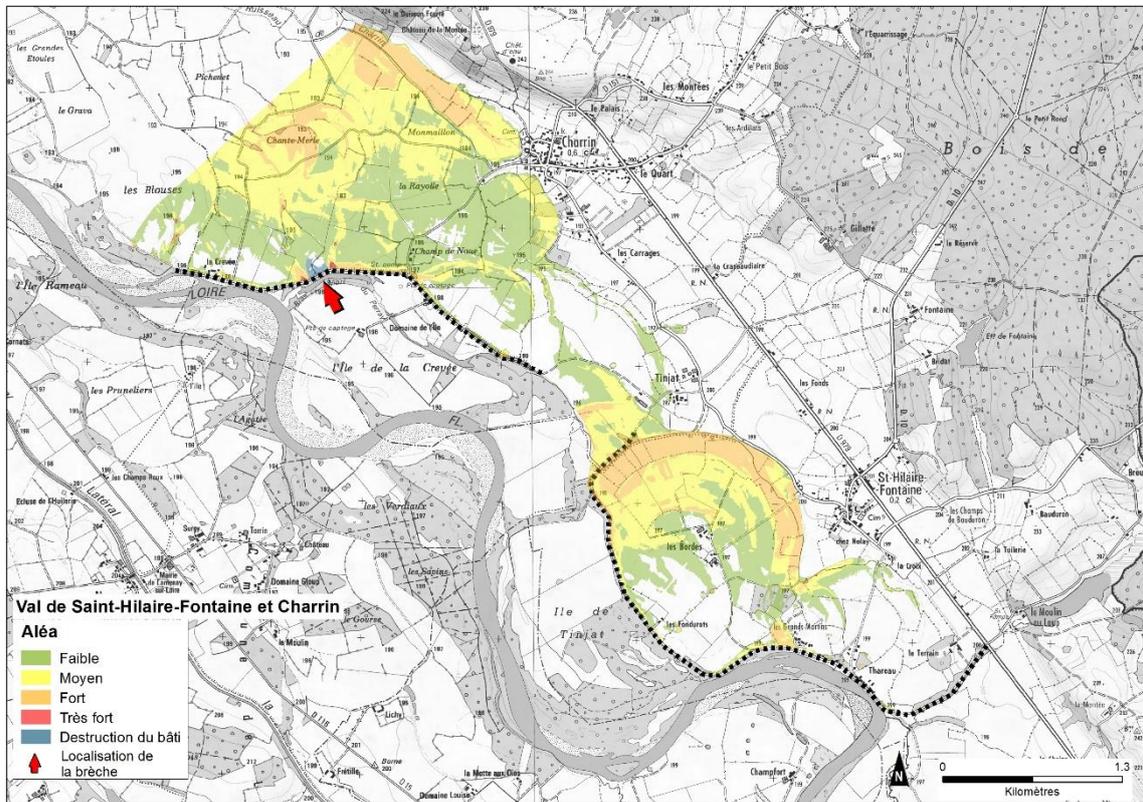


Figure 106 : Carte des aléas - Scénario 3

A l'inverse des trois scénarios précédents, seuls les enjeux de la commune de Charrin seront considérés dans l'analyse de la gravité. En effet, l'inondation du val amont se fait par remous depuis l'ouverture médiane du val et n'est pas générée par la brèche.

intensité de l'aléa d'inondation	nombre d'habitants	nombre de personnes en danger
1. Faible	5	0
2. Moyen	0	0
3. Fort	0	0
4. Très fort	0	0
5. Zone de destruction du bâti		
Total tous aléas	5	0

Tableau 37 : Nombres d'habitants impactés et en danger - Scénario 3

Aucun enjeu sensible n'est impacté par ce scénario de rupture.

Compte tenu des faibles aléas auxquels se retrouverait exposée la population, aucune personne ne peut être considérée en danger suite au scénario de rupture envisagé.

8.3.3.5 Synthèse des niveaux de gravité

n°	intitulé du scénario	population exposée	population en danger	enjeux sensibles exposés	enjeux sensibles en danger	niveau de gravité
1	brèche en amont du val	22	2	0	0	1. Modéré
2	brèche des Grands Martins	22	1	0	0	1. Modéré
2b	brèche aval des Grands Martins	21	2	0	0	1. Modéré
3	brèche sur la levée Charrin	5	0	0	0	0. Résiduel

Tableau 38 : Synthèse des niveaux de gravité des différents scénarios

8.3.4 Criticité des scénarios

Le croisement de la probabilité et de la gravité de chaque scénario d'inondation permet de lui affecter un niveau de criticité. Le tableau ci-après fournit la synthèse de ce croisement.

		probabilité du scénario						
		0.01%	0.1%	0.2%	0.5%	1%	10%	
		très improbable	improbable	très peu probable	peu probable	moyennement probable	probable	très probable
gravité du scénario d'inondation	5. désastreux	risque acceptable			risque intolérable			
	4. catastrophique	risque acceptable			risque intolérable			
	3. important	risque acceptable		Risque préoccupant			risque intolérable	
	2. sérieux	risque acceptable			Risque préoccupant			
	1. modéré	risque acceptable			1	2b	2	
	0. résiduel	risque acceptable			3			

Tableau 39 : Synthèse des indices de criticité des différents scénarios

:

Le tableau ci-après synthétise l'ensemble des résultats

n°	intitulé du scénario	Probabilité du scénario		gravité du scénario					criticité du scénario
				population exposée	population en danger	enjeux sensibles exposés	enjeux sensibles en danger	indicateur de gravité	
1	brèche en amont du val	0.27%	Peu probable	22	2	0	0	1. Modéré	Risque acceptable
2	brèche des Grands Martins	2.48%	Probable	22	1	0	0	1. Modéré	Risque préoccupant
2b	brèche aval des Grands Martins	0.22%	Peu probable	21	2	0	0	1. Modéré	Risque acceptable
3	brèche sur la levée de Charrin	1.66%	Probable	5	0	0	0	0. Résiduel	Risque acceptable

Tableau 40 : Synthèse globale des résultats

9. ETUDE DE RÉDUCTION DES RISQUES

9.1 BILAN DU FONCTIONNEMENT ACTUEL DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT

Concernant les levées de Saint Hilaire et de Charrin, la présente étude de dangers a montré que :

- ▶ Le niveau de protection apparent du système de protection correspond à celui atteint
 - par la crue Q200 dans le sous val amont de Saint Hilaire. Pour cette crue, la hauteur d'eau à l'échelle de référence de Gilly est de 9.19 m et le débit est de 3900 m³/s ;
 - par la crue Q10 dans le sous val aval de Charrin. Pour cette crue, la hauteur d'eau à l'échelle de référence de Gilly est de 6.64 m et le débit est de 1950 m³/s.

Ce niveau de protection n'est qu'apparent dans la mesure où le système de protection est susceptible de rompre avant ce niveau.

- ▶ Comme précisé au §8.2.2 le niveau de sûreté (niveau d'eau maximum pour lequel la probabilité de rupture de la digue reste négligeable) des deux sous-système d'endiguement est Q5, soit une hauteur à l'échelle de référence de Gilly de 6.22 m et un débit de 1700 m³/s.
- ▶ En cas de rupture de défaillance du système d'endiguement, pour une crue type Q200, près de 22 personnes résidant dans le val seraient inondées, dont 2 sont considérées comme en danger.

Il convient de noter qu'à partir du PK4100, la crête de la levée s'abaisse vers l'aval pour atteindre le niveau du terrain naturel vers le PK4650. Puis à partir du PK6150, la crête de la levée s'élève significativement (la hauteur de digue passe de 20cm à plus de 2m) vers l'aval. Il s'agit ici de l'ouverture médiane du val qui a conduit à séparer le val en un sous-val de Saint Hilaire à l'amont et un sous-val de Charrin à l'aval.

9.2 RÉDUCTION DU RISQUE PAR DES MESURES DE GESTION

Compte tenu des résultats de l'étude de dangers du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, il convient de mettre au point une stratégie destinée à limiter les dangers potentiellement encourus.

9.2.1 Mesures relevant du gestionnaire

Comme indiqué au chapitre 1, le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin (levées de Thareau et de Charrin) possède un seul propriétaire à savoir l'État et fait partie du domaine public fluvial.

Agissant pour le compte du Préfet de la Nièvre, la Direction Départementale des Territoires de la Nièvre (DDT 58) est le gestionnaire des levées domaniales de Thareau et de Charrin.

9.2.1.1 Consignes écrites

La DDT 58 a élaboré des consignes écrites qui sont satisfaisantes pour les ouvrages dont elle est gestionnaire.

Conformément à la réglementation, y sont décrites les dispositions de gestion adoptées par la DDT de la Nièvre et par , que ce soit en temps normal, en temps de crue, ou bien en post-crue.

- S'agissant de la gestion en temps normal ou en post-crue, les dispositions sont explicitement détaillées dans le document. Elle est adaptée et à poursuivre ;
- S'agissant de la gestion en situation de crue, les consignes écrites renvoient au Plan de Surveillance des Levées (PSL), qui fait partie intégrante du dispositif de crise préfectoral déclenché en cas d'inondation. Ce plan décrit les modalités spécifiques de surveillance des ouvrages mises en œuvre lors de crues importantes.

Les consignes écrites relatives à la digue de Thareau et de Charrin gagneraient quant à elles à être étoffées.

9.2.1.2 Surveillance de l'ouvrage

9.2.1.2.1 Surveillance hors crue

Concernant la surveillance hors crue, le rédacteur de l'étude n'a pas de remarques à formuler.

9.2.1.2.2 Surveillance en crue

Comme indiqué au chapitre 4, la surveillance en crue réalisée par la DDT sur les levées dont elle a la gestion est encadrée, depuis 2008, par le Plan de Surveillance des Levées (PSL).

À ce jour, les moyens humains du gestionnaire ne lui permettent pas de le mettre en œuvre de manière optimale. Aussi, une réflexion globale à l'échelle de l'ensemble des vals doit être menée afin de définir les priorités de surveillance à attribuer en fonction :

- ▶ Des faiblesses de chaque secteur
- ▶ Des enjeux protégés par chaque levée
- ▶ Des niveaux de protection apparent et des niveaux de sûreté de chaque système d'endiguement des moyens humains et matériels disponibles.

Sur cette base la mise en place de deux type de surveillance est recommandée.

- La première aura pour objectif de réduire le risque de rupture de digue, au droit des secteurs jugés prioritaire. Cette surveillance dénommée SOA (surveillance de l'ouvrage adaptée) aura pour objectif principal de détecter en période de crue au plus tôt tout désordre lié à la mise en charge de la levée et susceptible de conduire à sa ruine, d'en suivre son évolution et d'engager, le cas échéant, les actions d'urgence nécessaires (cf. § 9.2.1.6). Il est précisé que l'efficacité de cette surveillance est assujettie à l'identification préalable d'une entreprise de travaux, mobilisable en période d'astreinte et ayant les compétences et la capacité de réaliser des travaux d'urgence. Il est notamment attendue l'élaboration préalable de fiches d'action décrivant les travaux à réaliser selon le diagnostic établi, l'élaboration préalable de fiches de cheminement décrivant le cheminement à emprunter selon la localisation du désordre et la constitution préalable de stocks de matériaux prêt à l'emploi.
- Le deuxième type de surveillance recommandé a pour objectif de pouvoir déclencher, si besoin, une évacuation de la zone protégée en fonction des désordres détectés. De fait, cette surveillance doit être menée simultanément sur l'ensemble du linéaire constituant le système d'endiguement du val.

Il est précisé, dans les deux cas, que cette surveillance doit permettre le suivi du comportement de l'ouvrage en charge par du personnel qualifié et devant travailler dans des conditions rendus difficiles (accessibilité, sécurité,...).

9.2.1.3 Entretien de l'ouvrage

L'entretien des levées de la Loire a été inscrit dans le plan Loire, dès son origine, comme une action indispensable du socle de la stratégie pour la réduction du risque d'inondation. Cette action comprend :

- le traitement de la végétation herbacée et la suppression de toute végétation ligneuse ;
- la création et l'entretien des chemins de service ;
- la gestion des animaux fouisseurs (préventive, en empêchant les animaux de s'installer ; curative, en réparant les dégâts en urgence dans l'attente d'une réparation lourde, si nécessaire) ;
- l'entretien des vannes et des clapets.

L'entretien des digues doit bien évidemment être maintenu, mais aussi s'ajuster aux besoins identifiés par la présente étude et par les différents rapports de surveillance.

9.2.1.4 Entretien et restauration du lit de la Loire

L'entretien du lit de la Loire a lui aussi été inscrit dans le plan Loire, dès son origine, comme une des actions de la stratégie globale de réduction du risque d'inondation. Depuis 1994, des opérations d'entretien et de restauration du lit de la Loire ont été menées régulièrement.

Concernant le présent val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, on constate notamment que quatre obstacles sont à l'origine d'écoulements sécants (atterrissements et îlots à proximité de la berge) au droit des zones de contact des levées avec le lit vif (cf. §6.4).

L'entretien du lit de la Loire doit donc être poursuivi et intensifié pour enrayer cette évolution. Des mesures de gestion des atterrissements sont notamment à envisager au niveau des secteurs de levées les plus sollicités.

9.2.1.5 Gestion de l'usage des digues

Les levées domaniales de Loire font partie du Domaine Public Fluvial (DPF). Elles peuvent être utilisées pour satisfaire différents usages :

- accès unique à des parcelles enclavées (aménagement de rampes d'accès) ;
- canalisations traversantes pour irrigation ou réseaux divers (gaz, électricité, etc.) ;
- aménagements de riverains (clôtures, haies, remblai, etc.) et communaux (tobogans, bancs, fossés, etc.);
- voies de circulation supportées par les digues et chemins de service.

Tous ces usages sont encadrés par les DDT qui ont pour mission d'instruire les dossiers de demande correspondants. Selon les cas, il leur revient d'attribuer des autorisations d'occupation temporaire ou de contractualiser des conventions de superposition d'affectation. La DDT doit ainsi s'assurer, lors de l'instruction, que les aménagements ou l'utilisation des lieux envisagés sont sans impact sur la pérennité des levées, leur niveau de protection et les conditions de surveillance. Les contraintes à respecter et les points de vigilance doivent être clairement spécifiés au pétitionnaire, soit dans l'arrêté préfectoral d'AOT, soit dans les conventions signées par les deux parties.

Une surveillance est également exercée durant toute la durée de vie des AOT, car l'expérience montre que certains riverains ne sont pas conscients ou sont mal informés des contraintes à respecter, conformément au code général de la propriété des personnes publiques (article L.2124-8).

9.2.1.5.1 Les canalisations traversantes

Les résultats de l'étude de dangers mettent clairement en avant les effets très préjudiciables des canalisations traversantes sur la tenue des levées en cas de crue.

En conséquence, toute demande de nouvelle canalisation traversante sera dorénavant refusée, seule une argumentation étayée, expliquant qu'il n'y a pas d'alternative et qui sera jugée recevable par le gestionnaire, permettra de déroger à cette règle. Des techniques non préjudiciables (ex : franchissement type « siphon-inversé » par-dessus l'ouvrage et/ou forage dirigé dans le substratum) ou justifiées techniquement (ex : avec réalisation d'écran anti-renard) devront dès lors être mises en œuvre. Elles seront définies en concertation avec les services spécialisés. Les travaux seront suivis par un bureau d'études agréé, à la charge du pétitionnaire.

De même, une vigilance particulière sera apportée à toute demande de résiliation d'AOT concernant une canalisation traversante. Elle ne pourra être prononcée qu'après remise en état des lieux, c'est-à-dire après enlèvement de la canalisation et réparation de la digue.

Une réflexion sur les solutions techniques d'enlèvement ainsi que sur le financement de ces opérations a été lancée avec la DREAL Centre-Val de Loire. Elle devrait déboucher sur la proposition d'un programme technique à financer dans le cadre d'une action coordonnée.

9.2.1.5.2 Recours à une maîtrise d'œuvre agréée

Pour tous les travaux sur les levées qui pourraient être envisagés par un tiers (passage de canalisation, rampe d'accès, etc.) et qui sont jugés inévitables par le gestionnaire, le recours à une maîtrise d'œuvre agréée au sens du décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques est exigée, tant en phase d'étude qu'en phase de réalisation. De même, pour les interventions qui relèvent du gestionnaire, la DDT58 demande systématiquement un appui technique au Département Études et Travaux de la Loire de la DREAL Centre-Val de Loire, qui est titulaire de cet agrément.

D'une manière générale, la présente étude montre l'importance de la gestion des AOT pour la sécurité de l'ouvrage en ce qui concerne les canalisations dans les levées. Il apparaît donc important de mettre en place :

- si elle n'est pas d'ores et déjà existante, une procédure d'autorisation ou de refus des canalisations dans la levée.
- un programme de résorption des canalisations impactant le niveau de sûreté (altitude dans la digue, condition de mise en œuvre, abandonnées ou non indispensables, etc.) avec des travaux à programmer dans un prochain contrat de plan.

9.2.1.5.3 Sensibilisation du public

D'une manière générale, l'ensemble des études de dangers relatives ont mis en évidence la nécessité de renforcer la sensibilisation du public vis-à-vis de la vocation de protection des ouvrages constitutifs du système d'endiguement, dont le rôle a parfois été oublié du fait de l'absence de crue majeure récente et de ses autres usages.

Une telle campagne de sensibilisation pourrait, par exemple, prendre la forme de panneaux d'information disposés en des points stratégiques (bonne visibilité, lieu de passage, etc.) et ayant pour objectif de rappeler l'importance du maintien de l'intégrité de ces ouvrages.

9.2.1.6 Actions d'urgence en crue

Les retours d'expérience mettent en évidence l'importance de l'action au moment de la crue, que ce soit juste avant, pendant ou juste après. En conséquence, il est nécessaire de mettre au point un plan d'actions ainsi que sa procédure d'activation en lien avec les procédures de gestion de crise.

En outre, des fiches de procédures claires et détaillées devront être élaborées afin de garantir que la solution de confortement temporaire mise en œuvre par l'entreprise est adaptée au problème rencontré et réalisée dans les règles de l'art.

Toutefois cette réflexion doit être menée d'une manière globale à l'échelle du bassin versant de la Loire et non à l'échelle départementale.

9.2.1.7 Gestion du dossier d'ouvrage

Il est important de mettre à jour régulièrement les informations contenues dans le dossier d'ouvrage. Il est donc essentiel que toute nouvelle information concernant la levée soit convenablement enregistrée dans la base de données.

9.2.1.8 Exercices

Compte tenu de la faible fréquence des phénomènes susceptibles d'occasionner le déclenchement des différents plans et procédures de gestion des risques, il est indispensable de réaliser des exercices pour les évaluer régulièrement et les faire évoluer en tant que de besoin.

9.2.2 Mesures à mettre en œuvre dans le zone protégée

9.2.2.1 Mise en sécurité des populations

Au-delà du niveau de sûreté du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, la probabilité de rupture de la levée ne peut plus être considérée comme négligeable. Une mise en sécurité préventive de la population potentiellement exposée au danger est à envisager, par exemple sous la forme d'une évacuation.

Nota : Un protocole d'évacuation des populations présentes dans les zones protégées devra être mis au point par les pouvoirs publics soit à l'échelle du val, soit à l'échelle de l'ensemble des vals de chaque département, pour en définir les modalités pratiques et opérationnelles.

9.2.2.2 Plans communaux de sauvegarde

Conformément à la loi du 13 août 2004 relative à l'organisation de la sécurité civile, les communes de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, situées pour partie dans la zone protégée du val, doivent mettre en œuvre un Plan Communal de Sauvegarde (PCS) à l'échelle de son territoire. À ce titre, elles doivent intégrer dans leur PCS toutes les dispositions existantes relatives à la sécurité des personnes face au risque de rupture des digues.

Le PCS de Saint-Hilaire-Fontaine a été arrêté par le Maire le 1^o octobre 2010.

Le PCS de Charrin a été arrêté par le Maire le 24 juin 2011.

Les informations contenues dans la présente étude de dangers seront ainsi portées à la connaissance des Maires concernés pour une prise en compte dans leur PCS, notamment les résultats présentés aux chapitres 3 et 8. Il s'agira en l'occurrence d'informer les communes sur :

- l'étendue de la zone protégée ;
- le niveau de protection apparent ;
- le niveau de sûreté.

9.2.2.3 Plan de prévention du risque d'inondation

La présente étude de dangers a permis de définir le niveau de sûreté du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin et de délimiter les zones de dangers et la zone de destruction du bâti liée aux brèches potentielles.

Ces résultats seront portés à la connaissance du Préfet et des élus en vue de la révision du PPRi actuellement approuvé et en vigueur sur le val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, afin que soit mieux pris en compte le risque d'inondation lié à la présence du système d'endiguement.

9.2.2.4 Prévision des crues

Comme indiqué au chapitre 4, la prévision des crues de la Loire à Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est assurée par le Service de Prévision des Crues (SPC) Loire-Cher-Indre.

Les informations fournies par le SPC constituent des données d'entrée essentielles pour la mise en œuvre de mesures préventives de gestion des risques telles que la surveillance en crue ou la mise en sécurité des populations.

A l'inverse, les connaissances apportées par la présente étude de dangers seront portées à la connaissance du SPC en vue de la révision du Règlement d'Information sur les Crues (RIC) encadrant la prévision des crues sur le territoire de compétence du SPC.

9.3 RÉDUCTION DU RISQUE PAR DES MESURES SUR LE SYSTÈME D'ENDIGUEMENT

La présente étude de dangers a montré qu'il convenait d'apporter un certain nombre d'améliorations pour relever le niveau de sûreté actuel et ainsi rendre le système de digues fiable jusqu'aux premières surverses.

On distingue les mesures structurelles qui portent sur l'intégrité physique de la digue et visent à modifier le niveau de sûreté, des mesures fonctionnelles qui se rapportent à l'objectif de protection du système d'endiguement.

9.3.1 Mesures structurelles

Comme présentés précédemment, le système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin se caractérise par un défaut d'entretien généralisé et, de fait, la présence de végétation ligneuse généralisée, de terriers, de talus très pentus côté val et de zones de contact avec le lit vif de la Loire érodées et verticalisées.

Ainsi, dans l'objectif de monter le niveau de sureté, il s'avère nécessaire de mettre en œuvre les principales mesures structurelles suivantes. Il est précisé que la hiérarchisation de ces mesures structurelles à mettre en œuvre est présentée au §9.3.4 ci-dessous.

- Traiter les zones endommagées par les animaux fouisseurs :

L'étude de dangers a mis en évidence que les animaux fouisseurs créent des terriers susceptibles de dégrader significativement l'étanchéité de la digue (§3.1.8.4). Il est nécessaire de traiter ce type de problème dès son apparition en rebouchant les terriers et en empêchant le retour des fouisseurs par piégeage et en installant des grillages sous la terre végétale des talus. Néanmoins, les réparations provisoires ne restaurent pas totalement l'étanchéité, car elles laissent des cavités et des interfaces entre matériaux de la levée et de rebouchage, qui facilitent l'érosion interne. Il est nécessaire en conséquence :

- de restaurer l'étanchéité des tronçons de digue qui ont été détériorés, soit par mise en œuvre d'un écran étanche, soit en reconstruisant totalement le ou les talus concernés;

et/ou

- de se prémunir contre le risque d'érosion interne en mettant en œuvre au droit du talus côté val, un massif filtrant.

- Traiter les zones affectées par la végétation ligneuse ancienne ou existante

La coupe au ras du sol de la végétation ligneuse n'est pas suffisante en soi, les racines restent en effet présentes dans le corps de la digue longtemps après la coupe de l'arbre. Au cours de la décomposition, elles laissent en effet place à un conduit. Il est nécessaire en conséquence :

- de restaurer l'étanchéité des tronçons de digue qui ont été affectés par de la végétation ligneuse, soit par mise en œuvre d'un écran étanche, soit en reconstruisant totalement le ou les talus concernés;

et/ou

- de se prémunir contre le risque d'érosion interne en mettant en œuvre au droit du talus côté val, un massif filtrant.

En filtrant les matériaux au niveau des infiltrations d'eau, les massifs filtrants, associés ou non à des puits de décompression, diminuent le risque d'érosion interne et/ou d'apparition de renard hydraulique. Ce type de confortement est particulièrement adapté aux secteurs de faible largeur et/ou soumis à d'importantes charges hydrauliques en cas de crue.

- Reprendre les renforcements des pieds de levées côté Loire.

Les affouillements des pieds de levée consécutifs à l'abaissement du lit de la Loire sont susceptibles de déstabiliser le talus côté fleuve, même hors crue, et d'infliger des dégradations importantes et coûteuses. Les enrochements au niveau de la berge doivent être complétés et/ou restaurés limitant les effets de l'érosion externe du pied de digue.

De manière plus ponctuelles, d'autres problématiques ayant été également identifiées, les mesures structurelles suivantes devront également être mise en œuvre pour permettre de relever le niveau de sureté sur ce système d'endiguement :

- Araser et reconstruire les ouvrages présentant des signes de grand glissement.

En créant des discontinuités dans l'ouvrage, les grands glissements favorisent les infiltrations, la mise en saturation de l'ouvrage et de fait, augmente le risque de nouveau glissement et/ou d'érosion interne.

Il convient donc de reconstruire dans leur intégralité les ouvrages ayant subi des glissements de grande ampleur.

- Assurer l'étanchéité de l'ouvrage au droit des constructions encastrées dans la levée

De nombreuses maisons et bâtiments sont encastrés dans la levée, diminuant ainsi la largeur de la digue, favorisant l'érosion interne (§ 3.1.2.2.) et empêchant la surveillance de la face côté val de la levée. A défaut de pouvoir détruire ces constructions (ce qui correspondrait à la solution idéale) il convient de réaliser des travaux de rétablissement de l'étanchéité de la levée par écran étanche. Le type d'écran recommandé est une paroi de type « soil-mixing ». Il convient de noter que le dimensionnement de cette paroi et notamment sa profondeur devront faire l'objet d'étude de conception spécifique tenant compte de la perméabilité des sols en place, de la largeur de l'ouvrage et des sollicitations hydrauliques.

Dans le cas des mesures structurelles, au-delà des mesures recommandées et nécessaires suite aux modélisations CARDigue, certains travaux sont assimilés à des travaux d'entretien et de maintenance qu'il convient de réaliser le plus rapidement possible même si un caractère progressif est inévitable lorsqu'ils représentent des volumes et coûts importants. Ces travaux sont présentés ci-dessous par ordre de priorité :

- Traiter les canalisations

La présente étude de dangers a établi, dans le calcul de résistance à l'érosion interne, que la présence de canalisations et d'ouvrages traversant la levée ou inclus dans le corps de la levée baisse sensiblement le niveau de sûreté de celle-ci (§3.1.8.1 et chapitre 8).

Il est nécessaire en conséquence :

- de supprimer la canalisation et, localement, de reconstituer totalement l'ouvrage ;
- et/ou de se prémunir contre le risque d'érosion interne en mettant en œuvre au droit du talus côté val, un massif filtrant.
- et/ou de restaurer l'étanchéité au cœur de l'ouvrage en réalisant un écran étanche ou un voile d'injection d'étanchéité.

Nota : Dans le même temps, il faudra procéder à la recherche des canalisations ou de traces de canalisations qui auraient pu échapper à l'inventaire qui a été dressé dans le cadre de l'étude de dangers.

- Mettre en place des chemins de service

Un bon entretien et une bonne surveillance des levées sont primordiaux pour garantir la sûreté du système. Ces actions de gestion nécessitent la présence d'accès au niveau du sommet et des pieds de levée. La mise en place d'un chemin de service en pied de digue permet également de combler les éventuelles dépressions observées et ainsi, par la réduction de la charge hydraulique, de réduire le risque d'érosion interne. Il y a donc tout lieu de poursuivre l'aménagement de chemins de service.

9.3.2 Mesures fonctionnelles

Pour qu'un système d'endiguement ait un niveau de risque acceptable, il est nécessaire à terme que le niveau de sûreté dépasse le niveau de protection. C'est-à-dire qu'il faut faire en sorte, pour des crues supérieures à la crue de protection, que les surverses ne provoquent pas de brèches.

Nota : Un pré-requis est que la probabilité de rupture des levées soit quasi-nulle pour le niveau de la crue de protection : c'est l'objet des mesures structurelles prioritaires.

Il est donc nécessaire de gérer les surverses pour des crues supérieures à la crue de protection. En effet les ouvrages en remblais ne sont pas conçus pour résister à des phénomènes de surverse. Les écoulements sur le talus côté val provoquent une érosion progressive du talus, ce qui entraîne rapidement la formation d'une ravine, puis celle d'une brèche. De plus, les irrégularités des cotes de crête aggravent le risque car induisent la concentration des écoulements, ce qui augmente le phénomène d'érosion externe.

Deux principes de confortement peuvent être retenus. Soit le confortement de la totalité de l'ouvrage pour le rendre « résistant » à la surverse, soit l'aménagement d'une zone déversante, « résistante à la surverse », et la rehausse de l'ensemble du linéaire non conforté. Il est important de noter que le présent système d'endiguement présente d'ores et déjà une zone arasée entre les deux levées permettant très rapidement l'inondation du val. Ainsi, concernant la levée de Charin, le risque de rupture par surverse en cas de crue supérieure au niveau de protection ne semble concernée que l'extrémité amont de celle-ci et ne semble, de fait, pas présenter un risque majeur.

Concernant la levée de Thareau, de même que pour Charrin, l'extrémité aval, à proximité immédiate du linéaire arasée présente un risque de rupture par surverse en cas de crue supérieure au niveau de protection mais ne semble pas présenter un risque majeur. Par contre, le remous n'étant pas suffisant, un risque persiste concernant les 2 tiers amont de cette levée de Thareau. Sur ces deux tiers amont, une réflexion doit être menée vis-à-vis de ce risque de brèche en cas de surverse et les deux principes de confortement suivant peuvent être envisagés :

- Le principe de confortement généralisé afin de rendre la totalité de l'ouvrage résistant à la surverse implique :
 - o de reprendre les points bas et niveler la cote de crête de l'ouvrage pour homogénéiser la cote de crête sur tout le linéaire de l'ouvrage par rapport à la ligne d'eau théorique ;
 - o de conforter la crête, le talus côté val et le pied de talus pour les rendre résistants à la surverse.
- Le deuxième principe de confortement visant à favoriser le déversement en un secteur précis implique :
 - o d'aménager une zone déversante, résistante à la surverse, permettant d'inonder le val avant la surverse généralisée et ainsi éviter le risque de brèche et inondation brusque associée ; cette zone déversant pourrait par exemple être localisé à l'extrémité amont de la levée ou entre les PK 1000 et 2000 ;
 - o de reprendre les points bas et rehausser la cote de crête de l'ouvrage pour assurer une revanche homogène sur tout le linéaire de l'ouvrage ;

Une étude spécifique devra être réalisée afin de comparer ces deux principes de confortement, tant du point de vue de la faisabilité que du point de vue financier. Elle permettra notamment :

- de concevoir le confortement à mettre en œuvre vis-à-vis de la surverse (soit ponctuellement, soit de façon généralisée), conformément aux règles de l'art (pente, nature du revêtement, dimension de la fosse de dissipation éventuelles, etc.) ;
- concernant le deuxième principe :
 - pour déterminer la largeur déversante en fonction du débit déversant et du temps de remplissage du val souhaité ;
 - pour déterminer la revanche appropriée (fonction de la lame d'eau déversante) et donc la cote de crête à atteindre lors des opérations de rehausse/nivellement.

Rappel : Le principe de confortement ponctuel présente les avantages suivants :

- maîtriser le lieu des premières surverses (notamment en fonction des enjeux) ;

- limiter le risque de brèche pour une crue légèrement supérieure au niveau de protection apparent mais également, selon le contexte du val, par le matelas d'eau induit, de limiter par la suite le risque de désordres et/ou brèches pour des surverses généralisées associées à des crues supérieures. Ce dernier point devant être confirmé par l'étude spécifique.

9.3.3 Réflexion sur la ligne de défense principale

Une réflexion sur la ligne de défense principale de la levée de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin pourrait être menée pour la scinder en 2 systèmes d'endiguement distincts compte tenu de l'absence d'ouvrage de protection sur 1200m linéaire entre les 2 levées. Les éléments qui suivent permettent de fournir un certain nombre d'éléments d'appréciation sur cette question mais une étude spécifique sera nécessaire pour pouvoir déterminer avec certitude la possibilité de découper en deux systèmes distincts.

9.3.3.1 Influences réciproques des systèmes d'endiguement

Les résultats des simulations hydrauliques présentés au chapitre 8 permettent de comprendre le fonctionnement hydraulique et l'influence du val amont (val de St Hilaire) sur le val aval (val de Charrin) et vice-versa.

Ainsi, pour les scénarios 1 et 2bis mettant en jeu une crue 200 ans en Loire, l'onde de rupture provenant du val de Saint Hilaire Fontaine n'a pas ou peu d'impact sur les niveaux maximaux atteints dans le val de Charrin. Cela s'explique par la forte inondation du val Charrin par le remous de la Loire avant l'arrivée de l'onde de rupture (qui est donc noyée). En revanche, pour le scénario 2 basé sur une crue 20 ans en Loire, on constate un impact sur les niveaux atteints dans le val de Charrin. Le remous de la Loire est moins important. Une partie de l'écoulement issu de la brèche ne rejoint pas la Loire au niveau de l'ouverture médiane mais transite vers l'aval. En conclusion, au vu des résultats des scénarios étudiés, il apparaît que la levée de Thareau a une influence sur le val de Charrin.

Les schémas ci-après indiquent les valeurs de débits transitant entre les vals pour la situation crue 20 ans de la Loire sans défaillance et dans le cas du scénario 2 (crue 20 ans avec rupture en amont de la levée de Thareau).

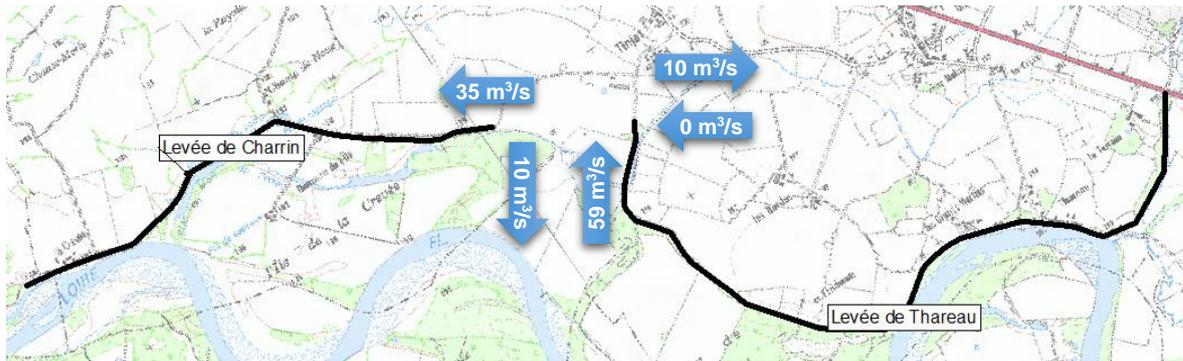


Figure 107 : Fonctionnement hydraulique pour une crue d'occurrence 10 ans de la Loire

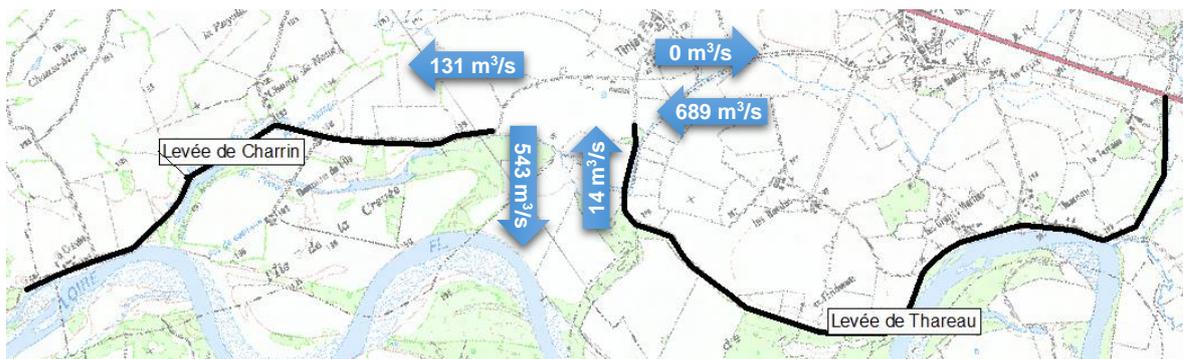


Figure 108 : Fonctionnement hydraulique pour une crue d'occurrence 20 ans de la Loire et la rupture du scénario 2

Une autre simulation a été réalisée afin d'évaluer les conséquences d'une mise en transparence de la levée de Charrin. Elle se base sur le scénario 3 mettant en jeu une crue 10 ans de la Loire et une rupture sur la levée de Charrin. Cette simulation permet également de comprendre l'influence de la levée de Charrin sur le sous-val de Saint Hilaire Fontaine.

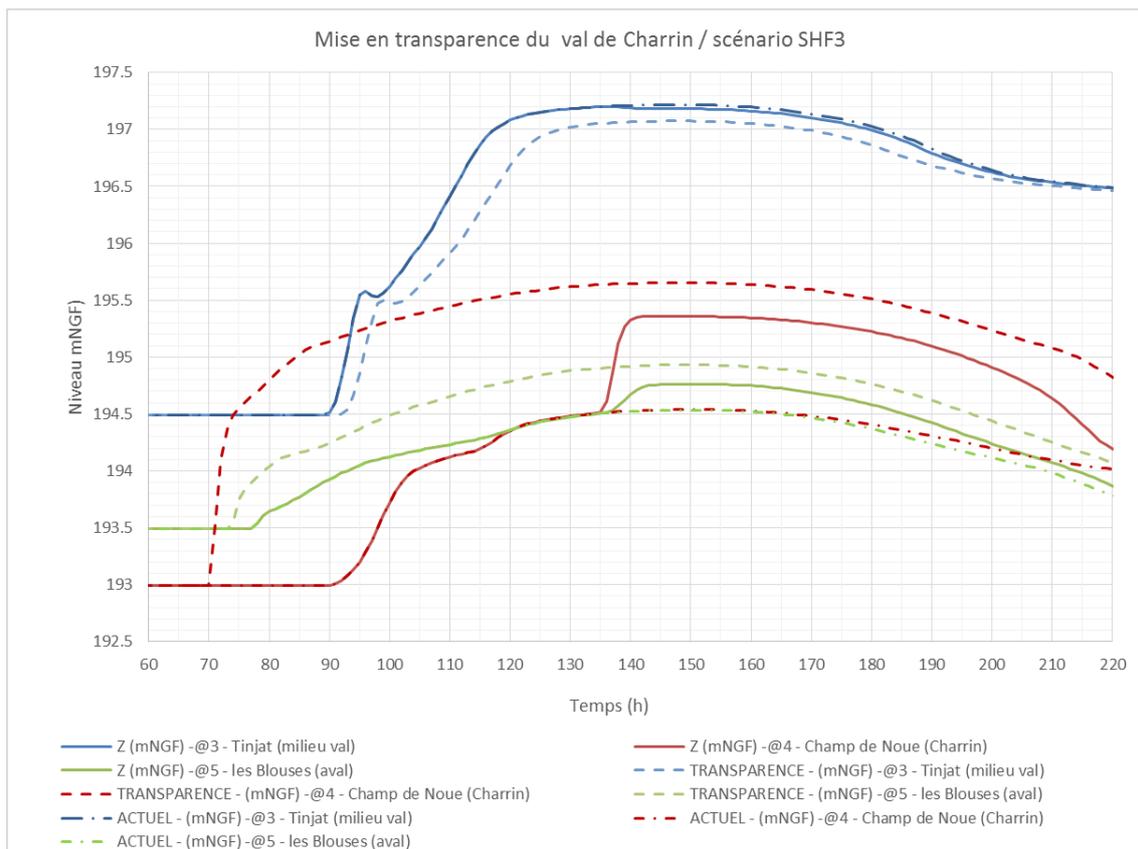


Figure 109 : limnigrammes comparant en plusieurs points l'évolution des niveaux en situation avec transparence, en situation actuelle sans défaillance et en situation avec la brèche SHF3

La courbe n°3 de la Figure 109 montre que la mise en transparence de la levée de Charrin abaisse le niveau du remous dans le val de Saint Hilaire de 10cm. L'arasement de la levée de Charrin aurait donc un impact positif sur le niveau dans le val de Saint Hilaire. Cela s'explique par une diminution du niveau en Loire au droit du val de Charrin due à une section d'écoulement plus importante qu'en situation actuelle.

9.3.3.2 Conséquences de la mise en transparence de la levée de Charrin sur le val

9.3.3.2.1 Vis-à-vis des niveaux maximaux

La simulation présentée au paragraphe précédent avait pour but de déterminer les niveaux d'eau en cas de mise en transparence de la levée de Charrin.

La Figure 109 présente l'évolution des niveaux d'eau pour les situations avec mise en transparence, avec défaillance du scénario 3 et en situation actuelle pour une crue d'occurrence 10 ans en Loire. S'il on s'intéresse au limnigramme n°2 à proximité de l'enjeu « Champ de Noue », on constate que la mise en transparence augmente de 20 cm les maximaux par rapport à la situation avec rupture du scénario 3. En comparaison avec les niveaux en situation actuelle, l'augmentation s'élève à 1m. L'enjeu de « Champ de Noue » est hors d'eau pour la situation actuelle et en limite de zone inondable en cas de rupture du scénario 3. La mise en transparence de la levée submergerait l'enjeu d'une lame d'eau de 20cm.

9.3.3.2.2 Vis-à-vis de l'aléa

La figure ci-après présente le zonage de l'aléa dans cette configuration, à comparer avec la Figure 106 du scénario 3 de défaillance.

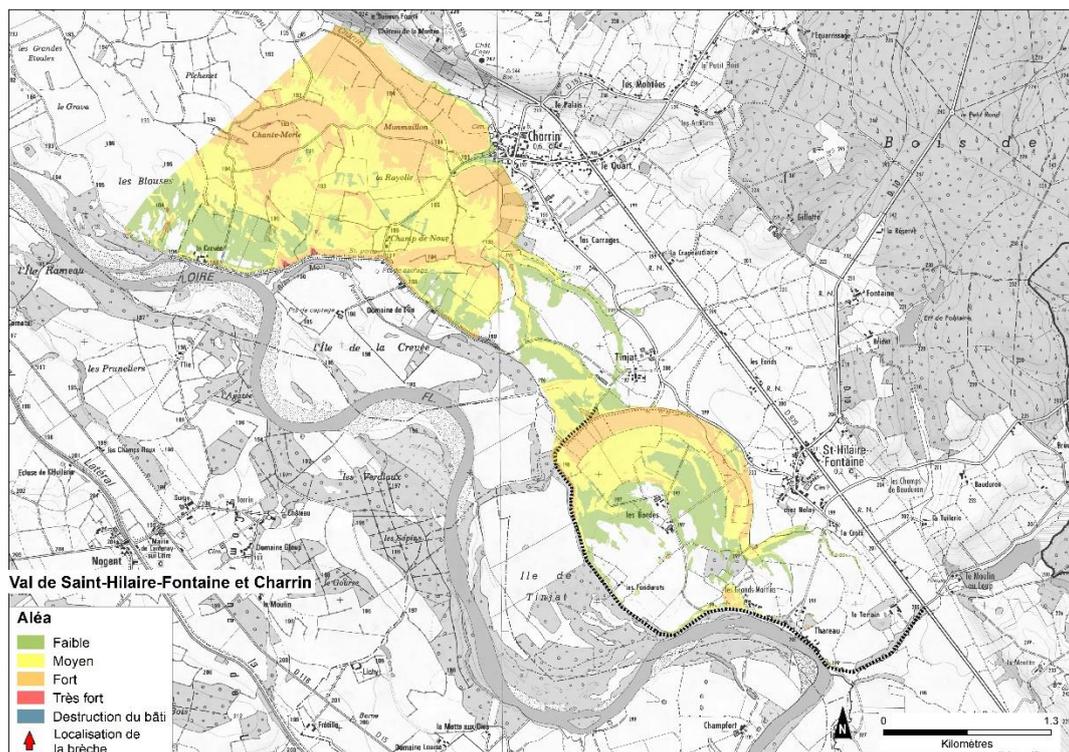


Figure 110 : Carte d'aléa pour la situation avec mise en transparence de la digue (T=20 ans)

L'analyse de la gravité en suivant la même méthodologie que pour les scénarios de défaillance est présentée par le tableau ci-après. On constate une augmentation de la population impactée et la présence d'une personne mise en danger. Cela est à comparer à l'analyse faite pour le scénario 3 où aucune personne n'était mise en danger. Prise au même titre qu'un scénario, la mise en transparence serait classée comme « sérieuse ».

intensité de l'aléa d'inondation	nombre d'habitants	nombre de personnes en danger
1. Faible	3	0
2. Moyen	6	1
3. Fort	0	0
4. Très fort	0	0
5. Zone de destruction du bâti	0	0
Total tous aléas	9	1

Tableau 41 : Nombres d'habitants impactés et en danger avec mise en transparence de la levée de Charrin

9.3.3.2.3 Vis-à-vis de la cinétique de submersion

En cas de crue d'occurrence 10 ans de la Loire :

- ▶ Pour la situation actuelle, l'inondation se produit essentiellement par remous. Aucun enjeux n'est impacté et l'écoulement transite par les chenaux naturels du val.
- ▶ Pour la situation avec rupture du scénario 3, le remous s'établit dans le val. Après déclenchement de la brèche, le niveau monte en 4h au droit du « Champ de Noue ». L'enjeux est faiblement submergé par une lame d'eau de quelques centimètres (aléa faible). Il est le seul enjeux impacté par le scénario.
- ▶ Pour la situation avec transparence de la levée de Charrin, l'inondation du val s'initie à partir d'une crue d'occurrence 2 ans par les points bas du système d'endiguement arasé. A partir du début de l'inondation du val, il faut 30 heures environ pour que l'inondation gagne l'enjeux de Champ de Noue. Au maximum, ce dernier est submergé par une lame d'eau de l'ordre de 20cm (aléa moyen). Le hameau de la Crevée est quant à lui en limite de zone inondable.

Comme indiqué précédemment, l'éventuelle mise en transparence de la levée de Charrin devra faire l'objet d'une étude complémentaire permettant d'apprécier plus finement les incidences positives et négatives d'un tel aménagement.

9.3.4 Travaux à réaliser sur le système de protection de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin

La méthode de construction du modèle d'aléa de rupture de digue, les résultats mis en évidence dans le chapitre 8 de la présente étude (rappelés ci-après) et les principes énoncés ci-avant permettent de dégager trois grandes priorités de travaux à réaliser.

Il convient de noter que le diagnostic réalisé, sur la base d'une discrétisation par profils de 50m, est, dans le présent chapitre, analysé à dire d'expert. Ainsi pour tenir compte d'une part de la répétitivité de certains désordres ponctuels (tels que les terriers) et d'autre part de la faisabilité des travaux (emprise minimale de la zone de chantier), nous pourrions proposer d'allonger les linéaires de travaux dans les cas où les zones à traiter prioritairement ne se limitent qu'à un ou deux profils de 50m.

9.3.4.1 **Priorité 1**

Les travaux jugés de priorité 1 concernent **deux secteurs distincts de la levée de Thareau**. Le premier secteur (vers le PK800) est concerné par la plus forte probabilité de rupture du système d'endiguement (Q2 et Q5) et le deuxième secteur (PK1500 au PK1800) par une criticité préoccupante pour le scénario de rupture envisagé (scénario de brèche SHF_2).

- ▶ Du PK700 au PK1050 il a été identifié la présence de végétation sur les 2 talus, un talus côté val très raide et des signes de glissement vers le PK800. De plus, son extension vers l'aval en contact avec lit vif présentant un perré a priori dégradé (forte présence de végétation) et, de fait, un risque d'érosion externe.

Il apparaît donc nécessaire sur ce secteur de réaliser des travaux de confortement visant à **pérenniser l'ouvrage vis-à-vis des risques de rupture par glissement du talus côté val et/ou par érosion interne**.

Il pourra s'agir :

- De travaux de retrait de la végétation et de de reprise du talus côté val avec mise en place d'un massif drainant-côté val,
- De travaux de recharge en enrochements au niveau de la berge, notamment entre les PK1000 et 1050.

Il convient de rappeler que la conception et le chiffrage de tels travaux nécessitent une étude spécifique. A cette occasion, le cas particulier des ouvrages encastrés devra faire l'objet d'une attention particulière. Soit les massifs drainant, de part et d'autre, pourront être considérés comme suffisant soit, un système d'écran étanche en crête de l'ouvrage pourra s'avérer nécessaire.

Le cout d'ordre de ces travaux, sur un linéaire estimatif d'environ 350m est d'environ 350 000 euros hors taxes⁸.

Sur ce premier secteur d'interventions, selon les simulation effectuées avec CARDigue, le niveau de sûreté pourrait ainsi être localement relevé de Q2 à Q100 suite à la réalisation de ces travaux.

- ▶ Du PK1500 au PK1800, il a été identifié un pied de la digue en contact avec le lit vif, une végétation sur talus côté Loire et/ou côté val et des maisons encastrées.

Il apparaît donc nécessaire sur ce secteur de réaliser des travaux de confortement visant à **pérenniser l'ouvrage vis-à-vis des risques de rupture par glissement du talus côté val et/ou par érosion interne**.

De plus, en lien avec un risque de rupture par érosion interne, glissement et/ou érosion externe, il convient de noter que la criticité de ce scénario de rupture est préoccupante (voir §8.3.4) sur ce secteur.

Tout comme pour le secteur précédemment évoqué, les travaux pourront consister en :

- Des travaux de retrait de la végétation et de de reprise du talus côté val avec mise en place d'un massif drainant-côté val,
- Des travaux de recharge en enrochements au niveau de la berge.

Il convient de rappeler que la conception et le chiffrage de tels travaux nécessitent une étude spécifique. Néanmoins, le cout d'ordre de ces travaux, sur un linéaire estimatif d'environ 300m est d'environ 500 000 euros hors taxes⁹.

⁸ Hors études, acquisitions foncières et aléas

⁹ Hors études, acquisitions foncières et aléas

Sur ce deuxième secteur d'interventions, selon les simulation effectuées avec CARDigue, le niveau de sûreté pourrait ainsi être localement relevé de Q2 à Q100 suite à la réalisation de ces travaux.

Selon les simulation effectuées avec CARDigue, il convient de noter que le niveau de sûreté global du système d'endiguement restera néanmoins inchangé (Q5) après l'exécution de ces travaux ciblés sur ces 2 secteurs de la levée de Thareau. En effet, il existe d'autres secteurs à risque non traités dans le cadre des travaux de priorité 1.

Ces secteurs à risques soit :

- Sont soit situés dans des zones où les conséquences d'éventuelles brèches sont jugées moins préjudiciables (à proximité de la zone où la digue est arasée (entre PK4000 et PK6200) et en aval du système d'endiguement (digue de Charrin)).
- Soit, présentent des probabilités de rupture tous modes confondus de l'ordre de 1 à 3% et de fait, même si le risque ne peut être négligé, ne sont pas considérés comme prioritaire. Le tronçon entre les PK2100 à 2400, présente par exemple des probabilités de rupture tous mode confondu de 1 à 2.2% pour Q5 et Q10 compte tenu de ses caractéristiques géométriques (pente et hauteur) et de son contact avec le lit vif.

9.3.4.2 **Priorité 2**

Les levées de Thareau et de Charrin se caractérisent par la présence de végétation sur les talus de la digue, de terriers ponctuellement de gros diamètre, des dépressions en pied de talus côté val et des zones de glissement sur talus côté Loire notamment en aval du tronçon n°5.

Les travaux jugés de priorité 2 concernent l'ensemble du système d'endiguement. L'état dégradé de l'ouvrage et sans entretien depuis de nombreuses années ne permet en effet pas de sectoriser des tronçons plus prioritaires que d'autres ou des facteurs aggravants plus préjudiciables que d'autres.

Ainsi, au jour de la rédaction de la présente étude de danger, même si des secteurs semblent pouvoir être mis en évidence par les simulations CArDIGUE, un enchaînement de travaux ponctuels ne semble pas pouvoir constituer une solution pérenne de confortement et, de fait, il est recommandé de procéder à des travaux de confortement quasi-généralisés. Une étude spécifique de type étude préliminaire ou Avant-projet pourra néanmoins permettre de nuancer cette préconisation sur la base de la répartition précise des secteurs à risque identifiés afin de distinguer des grands linéaires d'intervention compatible avec l'objectif de pérennité de l'ouvrage d'une part mais aussi les moyens financier disponibles. Notons, en toute rigueur qu'une priorisation de l'amont vers l'aval semblerait pertinente. A titre indicatif les zones de faiblesses principales sont localisées sur la carte de synthèse jointe ci-dessous.

Les travaux pourront consister :

- soit à supprimer **tous les désordres** (à minima côté val, notamment végétation et terriers) sur tout le linéaire de l'ouvrage (levée de Thareau et levée de Charrin) ; les travaux consisteront alors
 - à araser et reconstruire une partie de la digue conformément aux règles de l'art et avec des pentes de talus de l'ordre de 2H/1V à 3H/2V au maximum ;
 - à pérenniser la digue vis-à-vis du risque d'érosion interne au droit des maisons encadrées (PK1250 et PK2550), soit par mise en œuvre d'un épaulement filtrant côté val ou d'un voile d'étanchéité de type soil mixing dans l'axe ;

- à pérenniser la digue vis-à-vis du risque d'érosion interne dans ses portions les plus étroites, par élargissement, renforcement de l'étanchéité côté Loire ou mise en œuvre d'épaulement filtrant côté val. Le tronçon situé entre les PK2100 et 2400, évoqué précédemment, est notamment concerné.
- soit à mettre en œuvre un voile d'étanchéité de type soil mixing sur tout le linéaire.

Concernant les zones avec des dépressions en pied de talus côté val (PK1900, PK2950, PK7100, PK7650, PK7850 et PK7900), sensibles à l'érosion interne et au glissement, il est préconisé de procéder au remblaiement de celle-ci et idéalement à la **mise en œuvre d'une piste en pied de digue** d'environ 3,5 m de large, en matériaux filtrant, sur un géotextile, ayant pour objectif, par sa fonction de filtration, de diminuer la sensibilité du pied de l'ouvrage côté val en cas d'apparition d'un phénomène d'érosion interne et/ou d'effet renard.

Enfin, au droit des secteurs actuellement les plus exposés à l'érosion externe (avec notamment deux glissements identifiés côté Loire aux PK8200 et PK8700), il est préconisé la **reprise des enrochements**. Les 2 zones de contact avec le lit vif principalement concernés représentent un total linéaire approximatif de 2km :

- tronçon n°2 du PK1050 au PK2400
- tronçon n°5 du PK8150 au PK8750.

Il convient de rappeler que la conception et le chiffrage de tels travaux nécessitent une étude spécifique. Néanmoins, le cout d'ordre de ces travaux, sur un linéaire estimatif d'environ 7.6km est d'environ 5 000 000 euros hors taxes¹⁰.

Nota : au droit de la digue arasée faisant la jonction entre les 2 levées (du PK4100 au PK6200), le risque de rupture par surverse est négligée compte tenu des faibles hauteurs de l'ouvrage par rapport au terrain naturel (environ 20cm) et du fait que cette digue est submergée dès Q5 (faible charge hydraulique car niveau d'eau côté Loire et côté val s'équilibrant) .

Des simulations ont été réalisées sur CARDigue en supprimant les désordres et facteurs aggravants identifiés lors des VTA afin d'en estimer le gain sur le niveau de sûreté. Ces simulations mettent en évidence, sur la totalité du linéaire traité, une augmentation potentielle du niveau de sûreté jusqu'à Q100.

9.3.4.3 **Priorité 3**

Les travaux jugés de priorité 3 concernent des mesures fonctionnelles. Dans le cadre de la présente étude il a été constaté des irrégularité de la crête de digue du fait de tassement, d'érosion ou de circulation d'engins. Les travaux recommandés consistent, sur la base de levé topographiques détaillés, à reprendre la piste de crête pour homogénéiser le profil en long de l'ouvrage et ainsi assurer sur tout le linéaire une revanche constante vis-à-vis d'un même évènement de référence.

Rappel : Pour des revanches inférieures à 0,5 m, le risque d'apparition de la surverse ne peut plus être considéré comme nul.

9.3.4.4 **Synthèse**

La carte ci-dessous présente la localisation des travaux P1, P2 et P3 détaillés ci-dessus, visant à remonter le niveau de sureté global su système d'endiguement jusqu'à Q200.

¹⁰ Hors études, acquisitions foncières et aléas

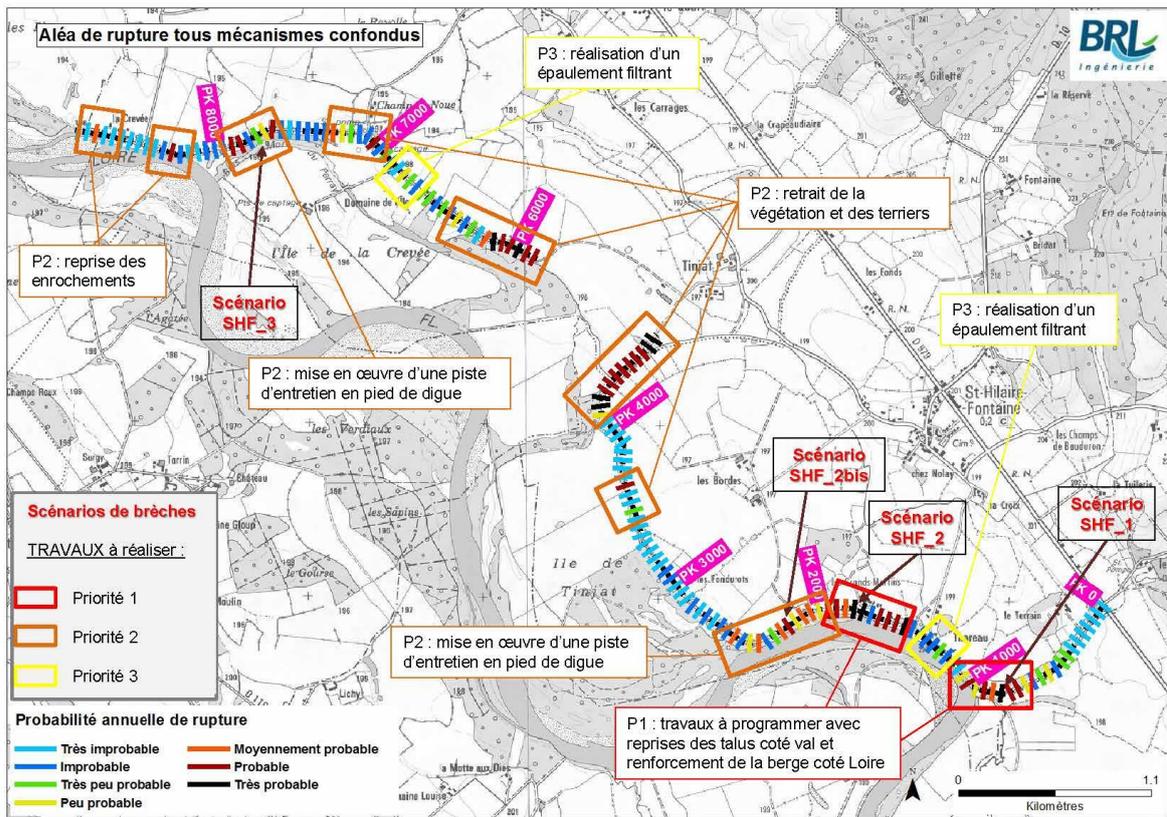


Figure 111 : Carte d'en synthèse des travaux à réaliser sur le système d'endiguement

9.4 RÉDUCTION DU RISQUE EN AMÉLIORANT LES CONNAISSANCES ET LES MÉTHODES

Malgré l'important volume de données traitées et la mise au point de méthodologies spécifiques pour la réalisation de l'étude de dangers du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, certains phénomènes physiques associés aux digues et certaines caractéristiques des ouvrages demeurent mal connus et restent donc une source d'incertitude vis-à-vis des résultats produits.

Un travail visant à apporter des réponses à ces interrogations doit donc être conduit. Un tel travail dépasse cependant le cadre de cette étude et doit s'inscrire dans une réflexion plus globale.

9.4.1 Amélioration de la connaissance des phénomènes

9.4.1.1 Connaissance de l'hydrologie de la Loire et de ses affluents

L'étude de dangers montre que l'hydrologie de la Loire est bien connue en ce qui concerne les XIX^e et XX^e siècles (§6.1), ce qui n'est pas le cas pour des périodes plus anciennes. Or, il semble que des événements plus intenses se soient produits. Les niveaux des repères de crues connus peuvent laisser penser que les crues du XIX^e siècle sont les plus fortes, puisque les repères de crues correspondants sont les plus hauts. Néanmoins, ces niveaux sont directement liés à la hauteur des digues au moment de la crue. Comme celles-ci ont toujours été relevées après chaque événement, ces repères ne sont sans doute pas tous représentatifs des plus fortes crues historiques.

Pour pouvoir répondre à cette interrogation, il est nécessaire de procéder au lancement d'une étude sur l'hydrologie ancienne de la Loire et de ses principaux affluents.

9.4.1.2 Connaissance du phénomène d'embâcle de glace

Les connaissances sur le phénomène d'embâcle de glace sont encore faibles (cf. 6.2). Des recherches historiques et scientifiques sur ce phénomène sont nécessaires pour mieux le connaître afin de pouvoir le prévoir et lutter plus efficacement.

Le lancement d'une étude sur l'amélioration de la connaissance du phénomène d'embâcle et de débâcle de glace et des impacts que cela peut avoir sur les digues est donc à envisager.

9.4.1.3 Connaissance des phénomènes induits par le changement climatique

Le chapitre 6 fait état d'un accroissement potentiel de l'intensité des crues dans les décennies à venir du fait du changement climatique, sans que celui-ci puisse être quantifié.

Il est donc nécessaire de surveiller toute évolution qui viendrait à apparaître et parallèlement de mener une étude prospective sur l'évolution des crues de la Loire à partir de différents scénarios climatiques.

9.4.1.4 Connaissance de la formation des brèches

L'étude de dangers a mis en évidence la méconnaissance des phénomènes de création, d'ouverture, de développement ainsi que de l'effet destructeur d'une brèche. De même, les connaissances du fonctionnement hydraulique « couplé » Loire / vals suite à la formation de brèches sont à approfondir.

Il apparaît donc important de lancer une recherche sur la formation et le développement des brèches dans une levée de Loire en tenant compte des observations faites lors des crues du XIX^e siècle.

9.4.1.5 Connaissance du phénomène d'érosion interne dans les levées

Le mécanisme d'érosion interne montre son importance pour l'aléa de rupture de la digue (cf. §8.2.1.2). L'érosion interne fait actuellement l'objet de recherches fondamentales.

Il apparaît donc essentiel de poursuivre ces recherches fondamentales sur l'érosion interne et de lancer des études d'application sur les levées de la Loire.

9.4.1.6 Connaissance des phénomènes karstiques, des fontis et mise au point des méthodes de traitement

Le phénomène d'effondrement karstique sous les levées de la Loire demeure méconnu.

Il est donc important de poursuivre les recherches sur les effondrements karstiques et de lancer des études de cas concrètes sur les levées de la Loire, incluant la définition de méthodes de confortement. L'identification précise des zones vulnérables est à rapprocher de l'amélioration des connaissances géotechniques des ouvrages envisagée plus loin dans le document.

9.4.1.7 Connaissances et méthodes d'analyse de risques

Même si elle s'inspire de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), la méthode d'analyse de risques employée dans la présente étude de dangers doit encore être évaluée et améliorée.

La présente étude de dangers et les retours d'expérience sur les autres systèmes d'endiguement de la Loire moyenne ont d'ores et déjà permis d'affiner la prise en compte des barrières de sécurité et des incertitudes dans le calcul des aléas de rupture, en réajustant certaines hypothèses, approximations ou simplifications.

Un travail complémentaire doit néanmoins être mené afin :

- d'évaluer et d'améliorer la méthodologie de l'AMDE des études de dangers ;
- d'évaluer et d'améliorer la prise en compte des barrières de sécurité et des incertitudes dans les études de dangers ;
- d'évaluer et améliorer le modèle de calcul de l'aléa de rupture.

9.4.2 Amélioration de la connaissance des ouvrages

9.4.2.1 Connaissance historique des digues

La présente étude de dangers a démontré l'intérêt que revêt l'existence d'archives sur les levées de la Loire. Néanmoins, ces archives n'ont pas été exploitées en totalité. Il est donc proposé de continuer cette exploitation.

9.4.2.2 Connaissance du système d'endiguement

L'étude de dangers a mis en évidence un certain nombre de lacunes dans la connaissance de certains éléments spécifiques constitutifs du système d'endiguement.

Des études spécifiques locales restent donc à mettre en œuvre.

9.4.2.3 Connaissance précise de la topographie des levées

Le MNT LiDAR utilisé pour caractériser géométriquement les différents profils en travers du système d'endiguement offre une bonne précision absolue et relative, mais, néanmoins insuffisante pour appréhender certains détails topographiques tels que banquettes, points bas ou autres éléments de taille inférieure à la résolution d'1 m (murs typiquement).

En outre, des doutes ou interrogations subsistent quant à l'étendue des incidences géométriques de certains ouvrages encastrés (caves des bâtiments inclus dans la levée, fondations de culées de pont, etc.) sur le profil en travers local de la digue.

Il est donc proposé :

- de compléter le levé LiDAR existant soit par des levés topographiques au sol du profil en long des levées et banquettes éventuelles soit par un MNT LiDAR Haute résolution ;
- d'affiner la connaissance des différents ouvrages encastrés (géométrie, existence d'un sous-sol, mode de réalisation, etc.).

9.4.2.4 Connaissance géotechnique des digues

La campagne géotechnique mise en œuvre dans le cadre de la présente étude de dangers a permis de disposer d'une bonne connaissance des matériaux constitutifs des levées, ce qui n'exclut cependant pas des investigations complémentaires en fonction des besoins des travaux et études envisagés par ailleurs dans le cadre des autres mesures de réduction des risques.

9.4.2.5 Connaissance des ouvrages traversant la levée

L'étude de dangers a été conduite à partir des connaissances du gestionnaire et des observations faites lors des visites techniques approfondies. Il est donc possible que certains ouvrages, abandonnés ou immergés notamment, puissent ne pas avoir été recensés. En outre, les modes de mise en œuvre de ces ouvrages et leur implantation précise dans la levée, qui constituent des éléments importants pour apprécier le risque réel qu'ils engendrent, restent méconnus.

Il convient donc d'engager une recherche systématique des canalisations et ouvrages traversants et/ou inclus, de leur mode de mise en place (recherche dans les archives, investigations in situ, etc.) et des dispositifs de protection éventuellement existants (clapet anti-retour, vanne crémaillère, etc.).

9.4.2.6 Connaissance des formations sous-jacentes

9.4.2.6.1 Connaissance des horizons de fondation

La connaissance des fondations du système d'endiguement du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin est suffisamment exhaustive pour les besoins de la présente étude de dangers. Des investigations complémentaires pourront néanmoins être envisagées dans le cadre d'éventuelles études complémentaires relatives aux anciennes fosses d'érosion ou à la conception des travaux.

9.4.2.6.2 Connaissance de la présence de karsts

Les premiers éléments de diagnostic du BRGM ont mis en évidence un risque moyen lié à la présence de karsts sous le système de protection du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin. Un suivi régulier des résultats des études sur le sujet doit donc être réalisé.

9.5 SYNTHÈSE DES MESURES À ENGAGER PAR TYPE DE MESURE

9.5.1 Gestion du risque

Mesure	Action à engager	Délais - Échéances
Consignes écrites	Engagement de la procédure d'approbation de la nouvelle version intégrant la révision du PSL	immédiat
PSL	Intégrer dans le PSL (récemment mis à jour) les éléments mis à jour à travers la présente étude de danger	immédiat
Surveillance	A améliorer. Maintenir a minima le niveau de surveillance actuel	immédiat
AOT et conventions de superposition d'affectation	Vigilance sur l'utilisation des levées par les usagers	immédiat
Canalisations traversantes	Adoption d'une position ferme sur les nouvelles demandes	immédiat
Mise en sécurité des populations	Alerter les services en charge de la gestion de crise de la nécessité de mettre au point un dispositif d'évacuation préventive du val de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin	Immédiat
PCS	Porter à la connaissance des Maires les éléments de l'étude de dangers pour intégration dans les PCS et sensibilisation du public (panneau,...) afin de rappeler l'objectif du maintien de l'intégrité des ouvrages	Immédiat
PPRI	Porter à la connaissance les éléments de l'étude de dangers pour la révision des PPRI	Immédiat

9.5.2 Amélioration structurelle et fonctionnelle du système de protection

Mesure	Action à engager	Remarques et coût prévisionnel	Délais - échéances
Entretien	Entretien, avec un bon niveau de service, l'ouvrage et son environnement immédiat	/	Permanent
Travaux de confortement	Pérennisation de l'ouvrage vis-à-vis du risque de glissement et/ou d'érosion interne au PK800 (talus côté val) et au PK1500 (talus côté Loire et val)	Etudes nécessaires. Travaux estimés à environ 850 000 € HT ¹¹	Priorité 1

¹¹ Hors études, acquisitions foncières et aléas

Mesure	Action à engager	Remarques et coût prévisionnel	Délais - échéances
Suppression de la végétation et des désordres	Suppression de tous les désordres aggravant le risque d'érosion interne (végétation, souche et terriers)	Etudes nécessaires. Travaux estimés à environ 5 M€ HT ¹²	Priorité 2
Reprise des enrochements	Le long des zones exposées à l'érosion externe (linéaire de 2km au total) le renforcement en enrochements doit être repris car dégradé		
Installation piste en pied de digue	Mise en œuvre d'une piste en pied de digue côté val par comblement des dépressions (6 points à traiter)		
Reprise du profil en long de la digue	Homogénéiser la crête de digue afin d'obtenir une revanche constante sur l'ensemble du linéaire de l'ouvrage (après levés topo)	Etudes nécessaires.	Priorité 3

9.5.3 Amélioration des méthodes et connaissances

Mesure	Actions à engager	Délais – Échéances
Méthode d'analyse de risques	Evaluer et améliorer la méthodologie de l'AMDE des études de dangers	En cours
	Evaluer et améliorer la prise en compte des barrières de sécurité et des incertitudes dans les études de dangers.	
	Evaluer et améliorer le modèle de calcul de l'aléa de rupture de digue	
Canalisations, ouvrages traversants et/ou inclus	Recherche systématique des canalisations inconnues et ouvrages inclus.	d'ici 1 an
	Recherche d'informations complémentaires sur ouvrages identifiés et diagnostics complémentaires	d'ici 2 ans
	Mise au point des techniques d'étanchement des canalisations	d'ici 2 ans
Karsts	Poursuite des recherches sur les effondrements karstiques	Thèse en cours
	Conclusions du groupe de travail sur l'interaction des karsts avec les levées.	1 an
	Recherche de solutions techniques pour la protection des levées sur karsts	2 ans
Connaissance des brèches	Lancement d'une recherche sur la formation et le développement des brèches dans une levée de Loire en tenant compte des constats du XIX ^e siècle.	En cours

¹² Hors études, acquisitions foncières et aléas

Mesure	Actions à engager	Délais – Échéances
Hydrologie	Lancement d'une étude sur l'hydrologie ancienne de la Loire et de ses affluents	Non prioritaire - sans échéance
Connaissance des ouvrages	Poursuite des recherches d'archives sur les levées de la Loire	2016

9.6 CONCLUSIONS SUR L'ÉTUDE DE RÉDUCTION DU RISQUE

Au regard des résultats de l'évaluation du système de digues et de l'analyse de risques, il apparaît indispensable de maintenir et de renforcer les actions d'entretien, de gestion, de surveillance et de confortement du système de protection afin de réduire le risque d'inondation par défaillance hydraulique ou structurelle.

Par ailleurs, au-delà de la problématique de sûreté des ouvrages, compte tenu de la configuration particulière du système d'endiguement avec notamment une interruption de la digue entre les levées de Thareau et de Charrin, une réflexion doit être menée en concertation avec les collectivités concernées et en rapport avec les enjeux protégés, pour définir le niveau de protection souhaitable et analyser la pertinence du système d'endiguement tel qu'il est retenu à ce jour et l'éventuelle mise en transparence de la levée de Charrin.

Sous réserve des conclusions qui découleront de cette étude, les principales préconisations de la présente étude de dangers sont :

- à court terme, de conforter la levée :
 - pour réparer les principaux désordres identifiés tels que le glissement côté Loire du PK8700 ;
 - et pour augmenter le niveau de sûreté afin que celui-ci dépasse le niveau actuel et atteigne le niveau des premières surverses ;
- à moyen terme, de consolider l'organisation pour l'intervention d'urgence en cas de crue, aussi bien vis-à-vis des populations exposées que de l'ouvrage ;
- à plus long terme, de programmer des travaux de gestion des surverses afin que le niveau de sûreté dépasse le niveau de protection apparent.