

DDT DE LA NIÈVRE

---

# ÉTUDE DE DANGERS DU SYSTÈME DE PROTECTION DU VAL DE LUTHENAY – UXELOUP 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 Luthenay-Uxeloup – rapport d'étude	
Référence du document			rapport_EDD_03-Luthenay-Uxeloup-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
Septembre 2016	V3	Prise en compte remarques DDT58 et DREAL Centre	GRI/AMA	RRE / NSI
Avril 2017	V4	Prise en compte remarques DDT58 et DREAL Centre	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 LUTHENAY-UXELOUP

<b>0. RÉSUMÉ NON TECHNIQUE .....</b>	<b>1</b>
<b>0.1 Contexte et objectifs de l'étude de dangers</b>	<b>1</b>
<b>0.2 Composition du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup</b>	<b>2</b>
<b>0.3 Dangers liés au système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup</b>	<b>4</b>
<b>0.4 Niveau de protection et niveau de sûreté du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup</b>	<b>4</b>
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	6
<b>0.5 Caractérisation de la gravité du risque associé à la défaillance du système d'endiguement</b>	<b>7</b>
0.5.1 A l'échelle du val	7
0.5.2 A l'arrière immédiat des digues	10
<b>0.6 Mesures de réduction des risques</b>	<b>11</b>
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
<b>1. RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Propriétaire des ouvrages</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Gestionnaire des ouvrages</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Rédacteurs de l'étude de dangers</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Classement du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJET DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Contexte réglementaire</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Le périmètre d'étude</b>	<b>17</b>
2.2.1 L'ouvrage de protection et la zone protégée	17
2.2.2 Les zones d'influence ou d'intérêt	17

<b>3. ANALYSE FONCTIONNELLE DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Description de l'ouvrage</b>	<b>23</b>
3.1.1 Principe de discrétisation du système d'endiguement	23
3.1.2 Définition et principales caractéristiques du système d'endiguement étudié	24
3.1.3 Description de l'objectif de protection du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup	28
3.1.4 Principaux résultats de l'analyse fonctionnelle hydraulique	35
3.1.5 Principales caractéristiques externes du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup	35
3.1.6 Profils en travers type des ouvrages	37
3.1.7 Anomalies constatées dans le système d'endiguement	38
<b>3.2 Description de l'environnement de l'ouvrage</b>	<b>45</b>
3.2.1 La Loire	45
3.2.2 La rive droite de la Loire	46
3.2.3 Raccordements amont et aval	46
3.2.4 Inondation du val par remous	48
3.2.5 Affluents et fossés de drainage	49
3.2.6 Remblais dans le val	50
3.2.7 Fonctionnement hydraulique interne du val	50
3.2.8 La zone protégée par le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup	50
3.2.9 Estimation des enjeux présents dans la zone protégée	52
3.2.10 Classement de la levée du Val de Luthenay-Uxeloup	55
<b>4. PRÉSENTATION DE LA POLITIQUE DE PRÉVENTION DES ACCIDENTS MAJEURS ET DU SYSTÈME DE GESTION DE LA SÉCURITÉ .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1 Organisation de la DDT 58</b>	<b>57</b>
<b>4.2 Consignes écrites et mesures de surveillance</b>	<b>57</b>
<b>4.3 Gestion des situations d'urgence</b>	<b>58</b>
<b>4.4 Procédures de connaissance et d'évaluation du risque</b>	<b>58</b>
4.4.1 Etudes de dangers	58
4.4.2 Revues de sûreté	58
<b>4.5 Dossier d'ouvrage</b>	<b>58</b>
<b>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 Luthenay-Uxeloup</b>	<b>59</b>
<b>5. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES POTENTIELS DE DANGERS.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1 Ouverture d'une brèche partielle ou totale sur un tronçon de la levée</b>	<b>61</b>
<b>5.2 Surverse sans brèche au-dessus de la crête d'un tronçon de levée</b>	<b>61</b>

<b>5.3</b>	<b>Remontée de nappe dans le val en arrière des levées</b>	<b>62</b>
<b>5.4</b>	<b>Remous par la partie aval ouverte au terrain naturel</b>	<b>62</b>
<b>5.5</b>	<b>Inondation par les affluents et ruissellement urbain</b>	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>CARACTÉRISATION DES ALÉAS NATURELS .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1</b>	<b>Hydrologie : crues de la Loire</b>	<b>63</b>
6.1.1	Présentation	63
6.1.2	Détermination des débits de pointe et des hydrogrammes	64
6.1.3	Prise en compte du risque de rupture de digue en amont ou en aval du val de Luthenay-Uxeloup	65
6.1.4	Influence de la rupture de barrages en amont	66
<b>6.2</b>	<b>Embâcles et débâcles de glace</b>	<b>67</b>
6.2.1	Conséquences hydrauliques associées à la débâcle	68
6.2.2	Conséquences morphodynamiques associées à la débâcle	68
6.2.3	Conséquences mécaniques associées à la débâcle	68
<b>6.3</b>	<b>Impact du changement climatique</b>	<b>68</b>
<b>6.4</b>	<b>Géologie et morphodynamique de la Loire</b>	<b>69</b>
6.4.1	Contexte géologique	69
6.4.2	Evolutions morphologiques	70
6.4.3	Conséquences et dangers à l'échelle du val	72
<b>6.5</b>	<b>Aléa sismique</b>	<b>72</b>
<b>6.6</b>	<b>Aléa karstique</b>	<b>74</b>
<b>6.8</b>	<b>Synthèse de la caractérisation des aléas naturels</b>	<b>75</b>
<b>7.</b>	<b>ETUDE ACCIDENTOLOGIQUE ET RETOUR D'EXPÉRIENCE .....</b>	<b>76</b>
<b>7.1</b>	<b>Incidents récents</b>	<b>76</b>
7.1.1	Les conséquences de la crue de décembre 2003 sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup	76
7.1.2	Les conséquences de la crue de décembre 2003 sur d'autres systèmes d'endiguement de la Loire	76
7.1.3	Les incidents hors crue sur ou à proximité du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup	78
7.1.4	Les incidents hors crue sur d'autres systèmes d'endiguement de la Loire	78
<b>7.2</b>	<b>Crues historiques de la Loire au niveau du val de Luthenay</b>	<b>78</b>
7.2.1	Eléments de comparaison des crues de 1846, 1856 et 1866	79
<b>7.3</b>	<b>Etude des brèches historiques</b>	<b>80</b>
7.3.1	Brèches historiques dans le val de Luthenay	80
7.3.2	Statistiques globales à l'échelle des 7 vals étudiés	82
7.3.3	Statistiques sur l'ensemble des digues de la Loire	82
7.3.4	Enseignements généraux à l'échelle de l'ensemble des vals	83
<b>7.4</b>	<b>Retour d'expérience sur d'autres systèmes d'endiguement</b>	<b>83</b>

7.4.1	Digues du Vidourle	83
7.4.2	Digues de l'Agly	84
7.4.4	Autres retours d'expérience	86
<b>8.</b>	<b>IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES RISQUES .....</b>	<b>87</b>
<b>8.1</b>	<b>Description de la méthodologie employée pour l'analyse des risques</b>	<b>87</b>
8.1.1	Démarche générale	87
8.1.2	Méthodologie employée pour la caractérisation du potentiel de rupture des tronçons de digues	87
8.1.3	Méthodologie employée pour l'estimation du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement	91
<b>8.2</b>	<b>Détermination des scénarios de défaillance</b>	<b>98</b>
8.2.1	Mode ou circonstances de défaillance de la digue domaniale	98
8.2.2	Rupture de la levée de Luthenay-Uxeloup tous modes confondus	109
8.2.3	Hypothèses de surveillance	113
<b>8.3</b>	<b>Estimation du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement du val de Luthenay</b>	<b>113</b>
8.3.1	Identification et choix des scénarios d'inondation caractérisés en termes de probabilité d'occurrence	113
8.3.2	Intensité et cinétique des scénarios	115
8.3.3	Gravité des scénarios	123
8.3.4	Criticité des scénarios	127
<b>9.</b>	<b>ETUDE DE RÉDUCTION DES RISQUES.....</b>	<b>131</b>
<b>9.1</b>	<b>Bilan du fonctionnement actuel du système d'endiguement</b>	<b>131</b>
<b>9.2</b>	<b>Réduction du risque par des mesures de gestion</b>	<b>134</b>
9.2.1	Mesures relevant du gestionnaire	134
9.2.3	Mesures à mettre en œuvre dans le zone protégée	137
<b>9.3</b>	<b>Réduction du risque par des mesures sur le système d'endiguement</b>	<b>138</b>
9.3.1	Mesures structurelles	138
9.3.2	Mesures fonctionnelles	139
9.3.3	Réflexion sur la ligne de défense principale	140
9.3.4	Travaux à réaliser sur le système de protection de Luthenay-Uxeloup	141
<b>9.4</b>	<b>Réduction du risque en améliorant les connaissances et les méthodes</b>	<b>143</b>
9.4.1	Amélioration de la connaissance des phénomènes	144
9.4.2	Amélioration de la connaissance des ouvrages	145
<b>9.6</b>	<b>Synthèse des mesures à engager par type de mesure</b>	<b>148</b>
9.6.1	Gestion du risque	148
9.6.2	Amélioration structurelle et fonctionnelle du système de protection	148
9.6.4	Amélioration des méthodes et connaissances	150
<b>9.7</b>	<b>Conclusions sur l'étude de réduction du risque</b>	<b>151</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : zones protégées par le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup .....	2
Figure 2 : composition du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup.....	3
Figure 3 : localisation et typologie de la végétation présente sur le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup .....	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 LUT_1 .....	9
Figure 7 : zone protégée et zone de dissipation d'énergie en arrière immédiat des digues .....	10
Figure 8 : Ouvrage constituant le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup .....	13
Figure 9 : localisation du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup au sein des vals de la Loire moyenne .....	19
Figure 10 : ligne de défense principale du Val de Luthenay-Uxeloup.....	25
Figure 11 : végétation au niveau de la crête en amont de la section n°1 (vue vers l'aval).....	26
Figure 12 : arbres couchés au niveau de la crête (vus vers l'aval).....	26
Figure 13 : terriers sur le haut du talus côté val (vus depuis la crête de la digue).....	26
Figure 14 : zones humides en pied de talus côté val (vues vers l'aval).....	26
Figure 15 : vue de la piste vers l'aval en amont de la section n°2 .....	27
Figure 16 : terrier avec diamètre supérieur à 15cm sur talus côté val .....	27
Figure 17 : pied de talus côté val vu vers l'aval avec terre déposée issue d'un grand terrier .....	27
Figure 18 : terriers abandonnés sur talus côté Loire.....	27
Figure 19 : fossé en pied de digue côté val vu vers l'amont .....	27
Figure 20 : pylônes en pied de talus côté val .....	27
Figure 21 : Digue fiable .....	29
Figure 22 : Digue non fiabilisée, non équipée d'un déversoir (cas des levées constituant le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup) .....	29
Figure 23 : Digue partiellement fiabilisée, équipée d'un déversoir.....	30
Figure 24 : Digue non fiabilisée, équipée d'un déversoir .....	30
Figure 25 : évolution du profil de la levée de Loire depuis le XVI <sup>e</sup> siècle jusqu'au début du XX <sup>e</sup> siècle (source R. Dion – Le Val de Loire 1934) .....	31
Figure 26 : Lignes d'eau, profils en long de la crête de banquettes, crête de digue et pied de digue .....	33
Figure 27 : début de la piste en crête sur la section n°2 (vu vers l'amont) .....	36
Figure 28 : vue de la crête de la digue enherbée en aval de la section n°2 (photo prise vers l'aval).....	36
Figure 29 : Familles de fonctions géotechniques des composants d'un profil en travers type de digue (source IRSTEA) .....	37
Figure 30 : profil en travers type de la levée de Luthenay-Uxeloup non renforcée .....	37
Figure 31 : Localisation et position des canalisations incluses dans le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup.....	40
Figure 32 : Localisation et caractérisation de la végétation ligneuse présente sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup.....	41
Figure 33 : Localisation, position et dimension des terriers identifiés sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup.....	43
Figure 34 : Localisation des zones humides en pied de talus du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup .....	45
Figure 35 : Extrait du MNT au niveau du raccordement amont du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup .....	46
Figure 36 : Raccordement amont entre la digue de protection du val et le remblai du Canal Latéral de la Loire (vu vers l'aval).....	47
Figure 37 : Extrait du MNT au niveau du raccordement aval du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup .....	48
Figure 38 : interruption du système d'endiguement vue vers l'aval .....	48

Figure 39 : Hauteurs d'eau du remous pour la crue correspondant au niveau de protection apparent du val de Luthenay .....	49
Figure 40 : réseau hydrographique (en bleu) et bassin versant (en rouge) des fossés et affluents s'écoulant par le Val de Luthenay-Uxeloup .....	50
Figure 41 : Zones protégées associées au système d'endiguement de Luthenay - Uxeloup .....	51
Figure 42 : Proportion de la zone protégée inondée par remous avant surverse .....	51
Figure 43 : carte d'occupation du sol .....	53
Figure 44 : diagramme de répartition de l'occupation du sol .....	53
Figure 45 : position des principaux barrage de la Loire et de ses affluents sur le réseau hydrographique .....	67
Figure 46 : carte de la sismicité en France .....	73
Figure 47 : sensibilité à l'aléa karstique des levées de la Loire (source BRGM) .....	74
Figure 48 : levée de Beffes-Herry - réparations d'urgence lors de la crue de décembre 2003 (crédit photo DREAL Centre-Val de Loire) .....	77
Figure 49 : Brèche dans la digue de Mauboux à Livry (58) - Crue de 2003 (crédit photo DREAL Centre-Val de Loire) .....	77
Figure 50 : 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) .....	78
Figure 51 : localisation des brèches historiques inventoriées sur le val de Luthenay .....	81
Figure 52 : brèche de Pia sur l'Agly – crue du 6 mars 2013 – (photo : protection civile des Pyrénées-Orientales) .....	85
Figure 53 : Coupe d'un sand Boil derrière les digues de l'Agly – crue du 6 mars 2013 – (photo : DDT des Pyrénées-Orientales) .....	85
Figure 54 : Démarche de l'analyse du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement (diagramme IRSTEA) .....	89
Figure 55 : Exemple de discrétisation de l'espace des événements et du calcul de la probabilité annuelle d'un scénario de brèche .....	93
Figure 56 : carte de localisation des tronçons homogènes VTA (rappel) .....	98
Figure 57 : carte de probabilité annuelle de rupture par surverse .....	101
Figure 58 : carte de probabilité annuelle de rupture par érosion interne .....	105
Figure 59 : Arbre de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté val .....	106
Figure 60 : Arbre de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté rivière .....	106
Figure 61 : Carte de Probabilité annuelle de rupture par glissement .....	108
Figure 62 : Carte des probabilités annuelles de rupture tous modes confondus, en l'absence de surveillance .....	110
Figure 63 : Carte de localisation des scénarios retenus .....	114
Figure 64 : Carte de localisation des points de référence du val de Luthenay .....	115
Figure 65 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche – Scénario 1 .....	116
Figure 66 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche – Scénario 1 .....	117
Figure 67 : Carte des hauteurs d'eau maximales – Scénario 1 .....	118
Figure 68 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Luthenay – Scénario 1 .....	119
Figure 69 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche – Scénario 2 .....	120
Figure 70 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche – Scénario 2 .....	120
Figure 71 : Carte des hauteurs d'eau maximales – Scénario 2 .....	121
Figure 72 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Luthenay – Scénario 2 .....	122
Figure 73 : zone de destruction du bâti en arrière des levées .....	123
Figure 74 : Carte des aléas – Scénario 1 .....	124
Figure 75 : Carte des aléas – Scénario 2 .....	125
Figure 76 : Limnigrammes en divers points du val pour les situations i) actuelle ii) scénario 1 iii) mise en transparence de la levée pour une crue en Loire d'occurrence 200 ans .....	140

## 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.....	28
Tableau 2 : coordonnées X, Y (Lambert 93) des limites amont et aval de la levée de Luthenay-Uxeloup.....	28
Tableau 3 : récapitulatif des éléments du système d'endiguement ou de son environnement et fonctions hydrauliques associées.....	35
Tableau 4 : Tableau des composants et des fonctions géotechniques du profil en travers type (source IRSTEA).....	38
Tableau 5 : Surfaces en hectares et population estimée par commune dans le val de Luthenay.....	54
Tableau 6 : caractéristiques des crues moyennes à rares de la Loire au niveau du val de Luthenay-Uxeloup.....	65
Tableau 7 : Crues historiques de la Loire à l'échelle de la Jonction à Nevers.....	79
Tableau 8 : Comparaison des niveaux atteints par les crues du 19 <sup>ème</sup> siècle au droit des différents vals étudiés.....	80
Tableau 9 : Brèches historiques recensées sur le val de Luthenay.....	80
Tableau 10 : Brèches historiques recensées sur l'ensemble des 7 vals étudiés.....	82
Tableau 11 : principaux enseignements issus de retours d'expérience issus d'autres systèmes d'endiguement (source DREAL Centre-Val de Loire).....	86
Tableau 12 : Qualification des probabilités événementielles utilisées pour caractériser la probabilité de défaillance pour un événement de crue donné.....	92
Tableau 13 : Qualification des probabilités annuelles utilisées pour caractériser les scénarios de défaillance.....	93
Tableau 14 : Grille de qualification de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau.....	95
Tableau 15 : Table de correspondance entre aléa et vulnérabilité de la population en danger.....	95
Tableau 16 : Classes de gravité des scénarios d'inondation.....	96
Tableau 17 : Grille de criticité des scénarios d'inondation.....	97
Tableau 18 : Hauteur de surverse (+) ou de revanche (-) au droit de la digue (m).....	100
Tableau 19 : Probabilité de rupture des profils en travers soumis à la surverse ( $\Sigma > 0,01\%$ ).....	101
Tableau 20 : correspondance entre valeur du critère de Bligh (modifié) et probabilité d'apparition d'érosion interne.....	103
Tableau 21 : Probabilité de rupture des profils en travers soumis à l'érosion interne ( $\Sigma > 0,10\%$ ).....	104
Tableau 22 : Caractéristiques, désordres et anomalies des profils en travers soumis à l'érosion interne ( $\Sigma > 0,10\%$ ).....	104
Tableau 23 : Probabilités de rupture des profils en travers soumis au glissement côté val ( $\Sigma > 0,10\%$ ).....	107
Tableau 24 : Probabilités de rupture annuelle tous modes confondus des différents profils élémentaires ( $\Sigma > 0,10\%$ ).....	111
Tableau 25 : Tableau de synthèse des scénarios de brèches retenus.....	114
Tableau 26 (rappel) : Grille de définition de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau.....	123
Tableau 27 : Nombres d'habitants impactés et en danger – Scénario 1.....	124
Tableau 28 : Nombres d'habitants impactés et en danger – Scénario 2.....	125
Tableau 29 : Synthèse des niveaux de gravité des différents scénarios.....	126
Tableau 30 : Synthèse des indices de criticité des différents scénarios.....	127
Tableau 31 : Synthèse globale des résultats.....	129





# INFORMATION DU LECTEUR ET MISE EN GARDE

## Sur la structure de la présente étude de dangers

*L'étude de dangers du Val de Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup s'étend sur environ 6 km en rive gauche de la Loire, sur les communes de Fleury-sur-Loire et de Luthenay-Uxeloup.

La zone protégée par le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup abrite environ quatorze personnes.

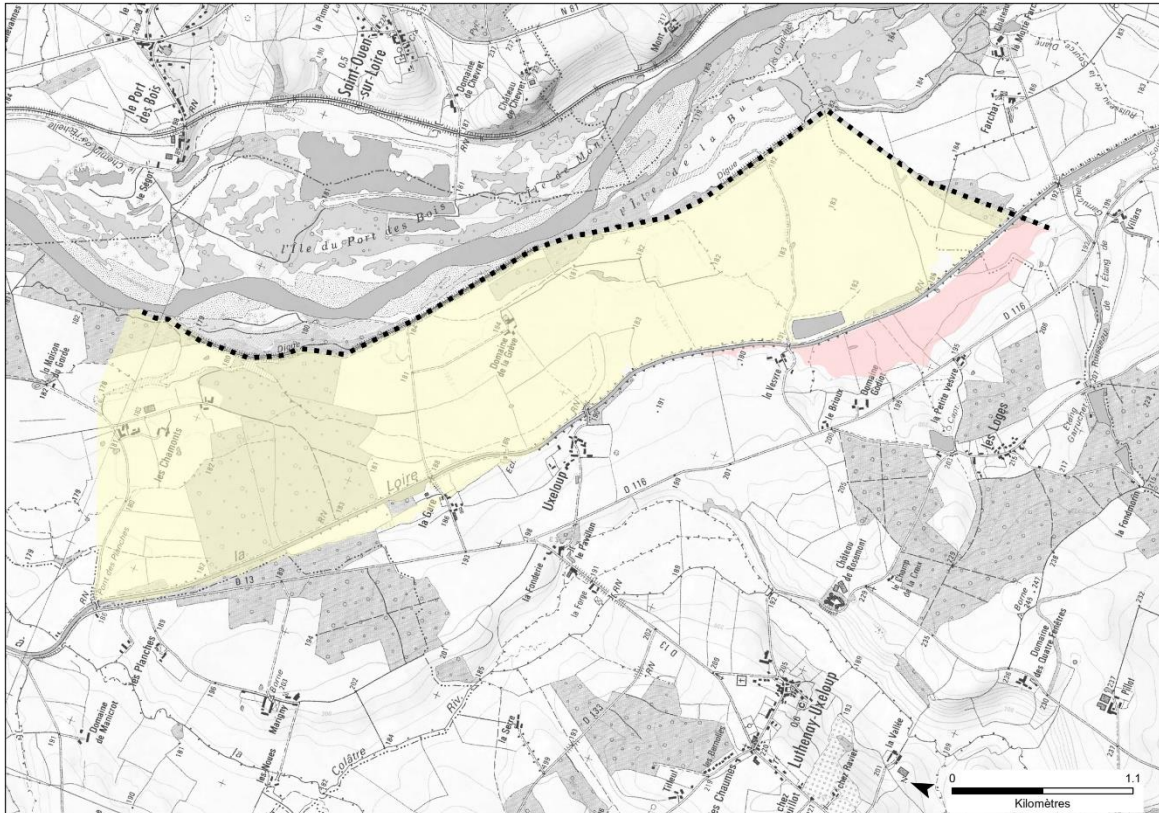


Figure 1 : zones protégées par le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup

Le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup n'a pour l'instant pas fait l'objet d'un classement par arrêté préfectoral.

## 0.2 COMPOSITION DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE LUTHENAY-UXELOUP

Le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup est un système d'endiguement ouvert en aval assurant la protection du val éponyme.

Il est constitué d'une levée en terre s'étirant depuis la digue Est du canal Latéral et se raccordant en aval avec le terrain naturel. La hauteur moyenne de la digue est de 2,7m avec une hauteur maximale de 4,7m.

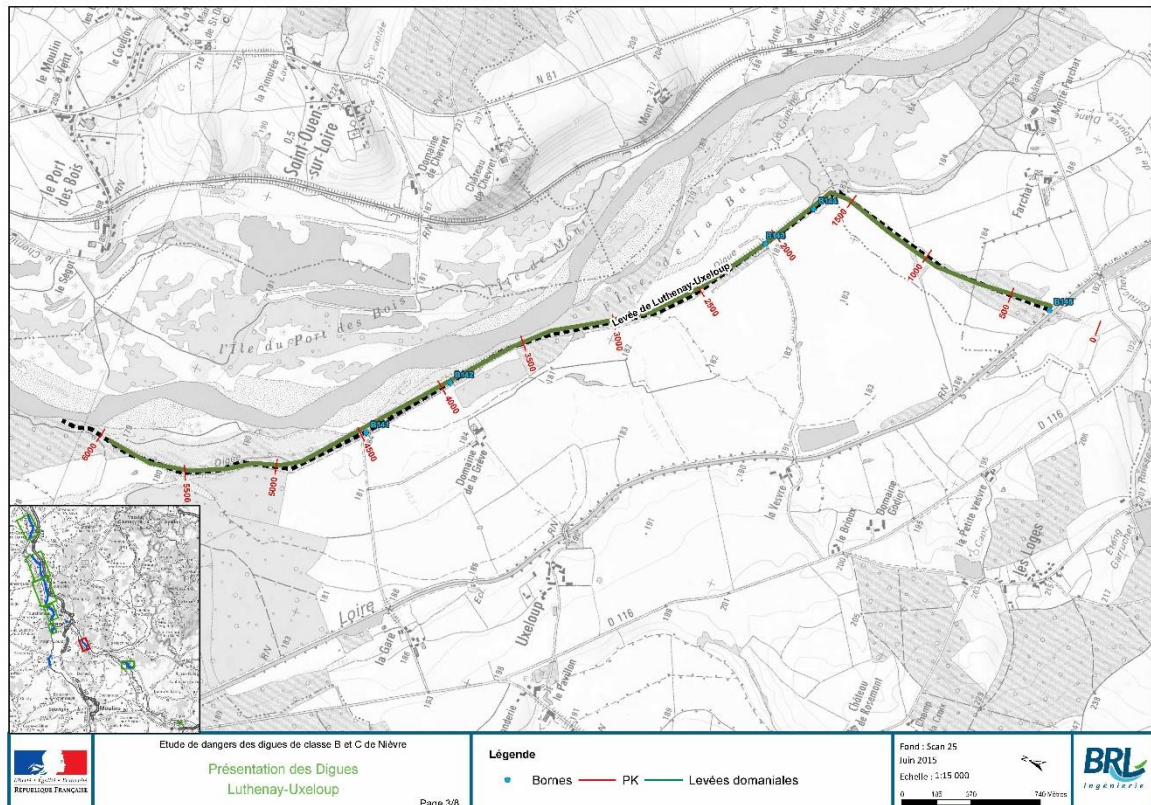


Figure 2 : composition du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup

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,
- Végétation sur et aux abords de la levée,
- Terriers d'animaux fouisseurs,
- Zones humides en pied de digue,
- Obstacles sur les talus de digue.

En l'espèce, le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup est notamment caractérisé par la présence d'une végétation clairsemée à généralisée et par de nombreux terriers. De tels désordres constituent des facteurs aggravants sensiblement le risque de rupture par érosion interne.



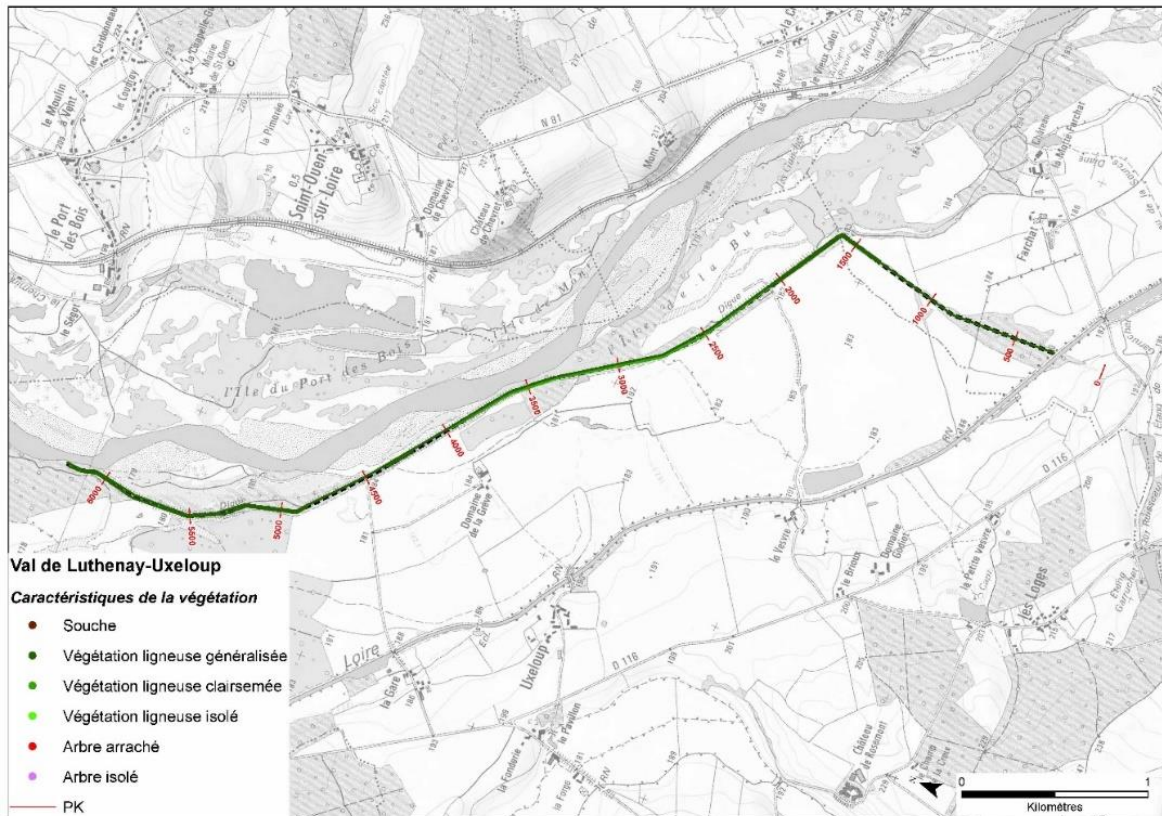


Figure 3 : localisation et typologie de la végétation présente sur le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup

### 0.3 DANGERS LIÉS AU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE LUTHENAY-UXELOUP

Les dangers liés au système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup 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 LUTHENAY-UXELOUP

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 rehaussée 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 Luthenay-Uxeloup s'échelonnant de 970 m<sup>3</sup>/s à 5 000 m<sup>3</sup>/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 Luthenay-Uxeloup.

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.

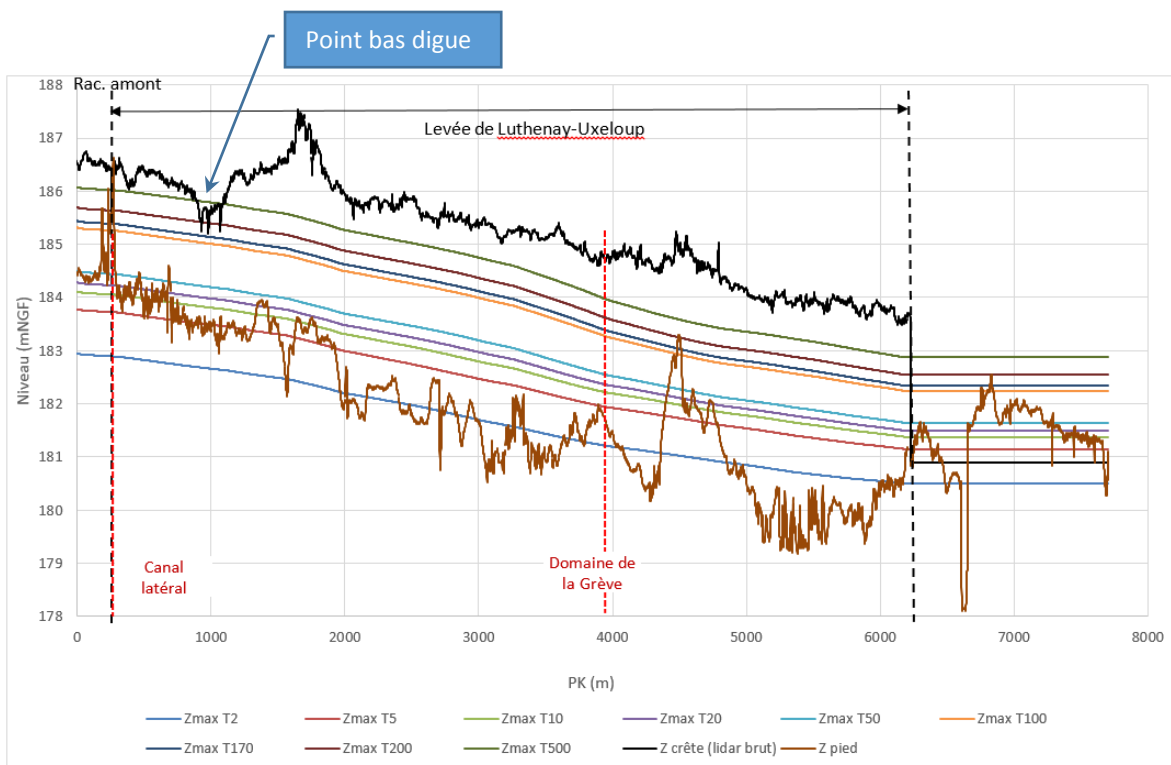


Figure 4 : lignes d'eau, profils en long de la crête de banquettes, crête de digue et pied de digue

Le comparatif des lignes d'eau et du profil en long de la crête de digue mettent en évidence que les premières surverses se produiraient au niveau de la digue de raccordement amont avec le canal pour une crue d'occurrence 200 ans environ, correspondant à un débit de 3 870 m<sup>3</sup>/s à Luthenay-Uxeloup.

**Il est noté un début d'inondation du val par remous dès la crue quinquennale (Q5).**

**Le niveau atteint par la crue de période de retour 200 ans définit donc le niveau de protection apparent du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup.**

### 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, 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 potentielle sont mises en évidence au travers de cette analyse :

- Au PK1000 où le risque de surverse devient non négligeable à partir de Q200 (raccordement amont avec le canal),
- Au PK3050 où le risque d'érosion interne devient non négligeable à partir de Q20.

**Le niveau de sûreté du système d'endiguement correspond à un niveau de la Loire associé à une crue de période de retour entre 10 ans et 20 ans, soit une hauteur à l'échelle de référence de Decize comprise entre 5,07 et 5,23 m et un débit compris entre 1950 et 2200 m<sup>3</sup>/s.**

Au-delà de ce niveau, la probabilité de rupture au droit du tronçon élémentaire de digue le plus fragile ne peut plus être considérée comme négligeable. La probabilité de rupture est estimée à 1,2% pour la crue de période de retour 20 ans au PK3050 et de 12% pour la Q50.

### 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 vicennale et devient même moyennement probable à partir de la crue de période de retour 100 ans.



Quoi qu'il en soit la Loire entrera en surverse par-dessus le système de protection à partir de la crue de période de retour 200 ans (environ 3 900m<sup>3</sup>/s).

En conclusion, en l'état actuel, le système d'endiguement présenterait probablement un fonctionnement anormal et préoccupant pour des crues supérieures à la crue de période de retour 20 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 de secteurs de défaillance les plus probables,
- La localisation des enjeux,
- Le fonctionnement hydraulique interne de la zone protégée.

Sur cette base, deux scénarios de brèches ont été simulés et analysés sur le val de Luthenay-Uxeloup.

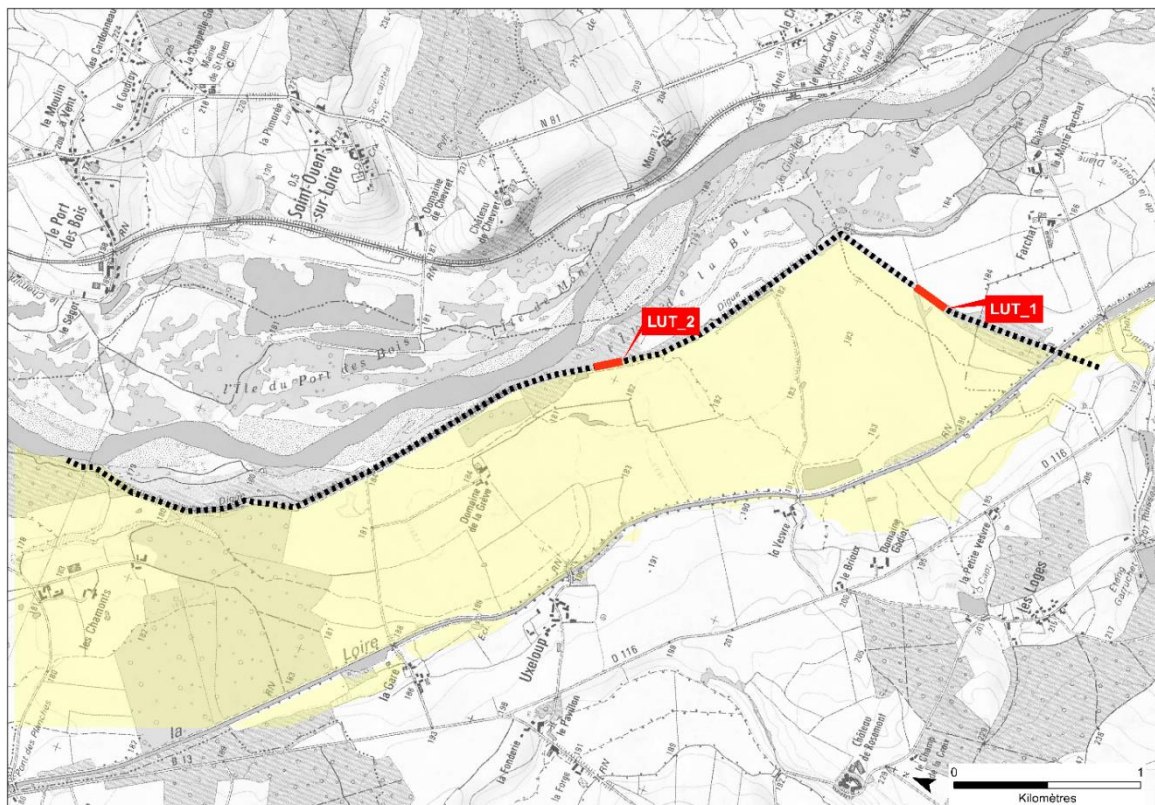


Figure 5 : Carte de localisation des scénarios retenus

Le scénario le plus pénalisant en termes de gravité (enjeux impactés) est le scénario LUT\_1 « brèche en amont du val par surverse au PK1000 pour une crue de période de retour 200 ans ».

Dans ce scénario, pour une crue de période de retour 200 ans, 14 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.

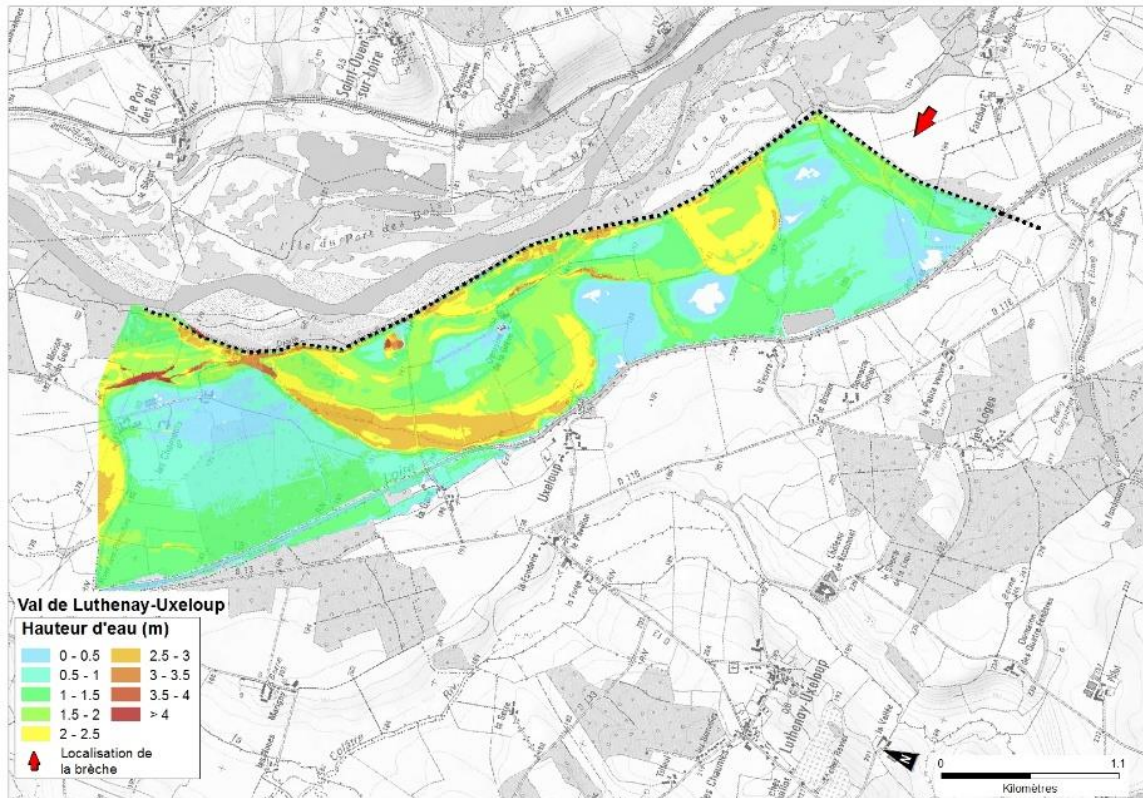


Figure 6 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario LUT\_1

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



## 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.

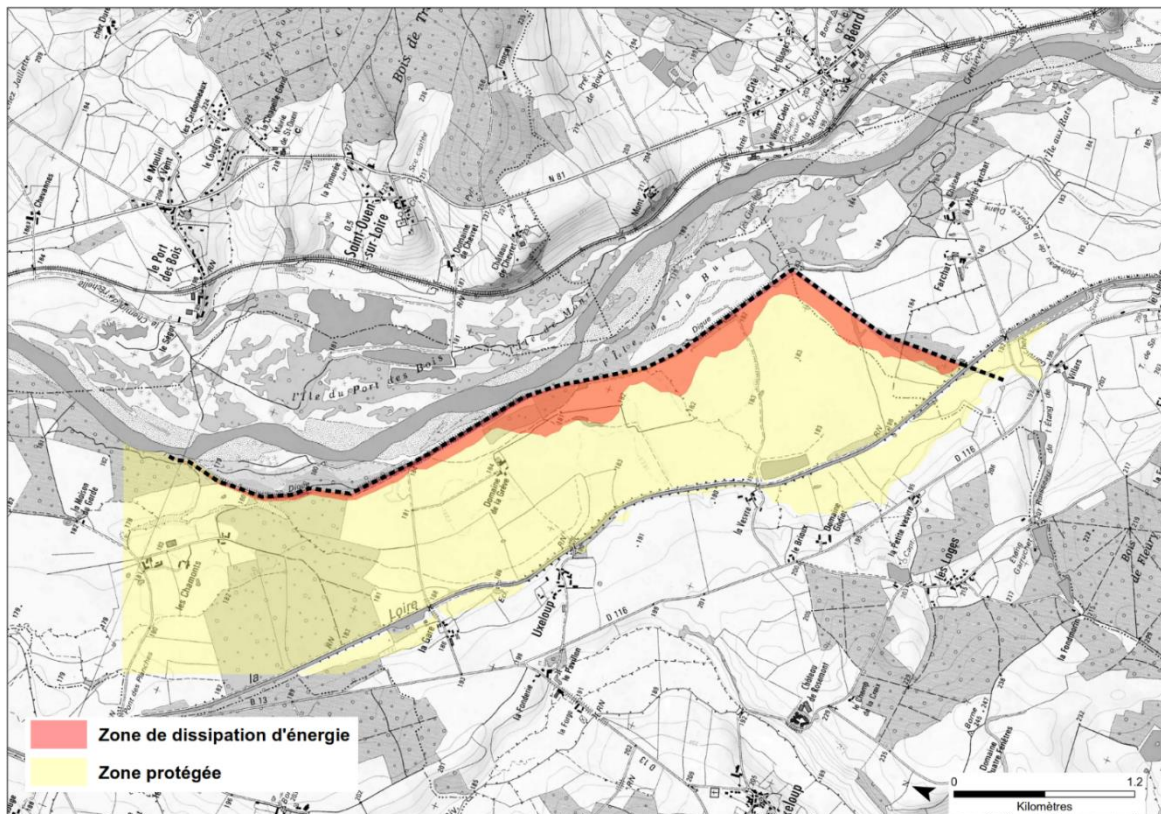


Figure 7 : zone protégée et zone de dissipation d'énergie en arrière immédiat des digues

## 0.6 MESURES DE RÉDUCTION DES RISQUES

L'étude de dangers du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup 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 De lancer immédiatement une étude complémentaire pour confirmer l'intérêt d'arraser cet ouvrage et pour déterminer la largeur optimale en lien avec l'évaluation détaillée des incidences sur les enjeux ;
  - o Travaux de priorité 1 : travaux de confortement visant à reconstituer la levée sur les 1000 premiers mètres avec retrait de la végétation généralisée, puis de traitements des terriers avec reconstitution de l'ouvrage de protection au droit de 2 zones ciblées (PK2150 et PK3050) ;
  - o Comblement de dépression coté val avec la mise en place d'un chemin de service en matériaux drainant en pied de digue ;
  - o De reprendre le profil en long de l'ouvrage afin d'homogénéiser la crête afin d'obtenir une revanche constante (études nécessaires y compris levés 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

La levée de Luthenay-Uxeloup se situe en rive gauche de la Loire dans le département de la Nièvre (58).

La totalité des ouvrages constitutifs du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup, 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 Luthenay-Uxeloup.

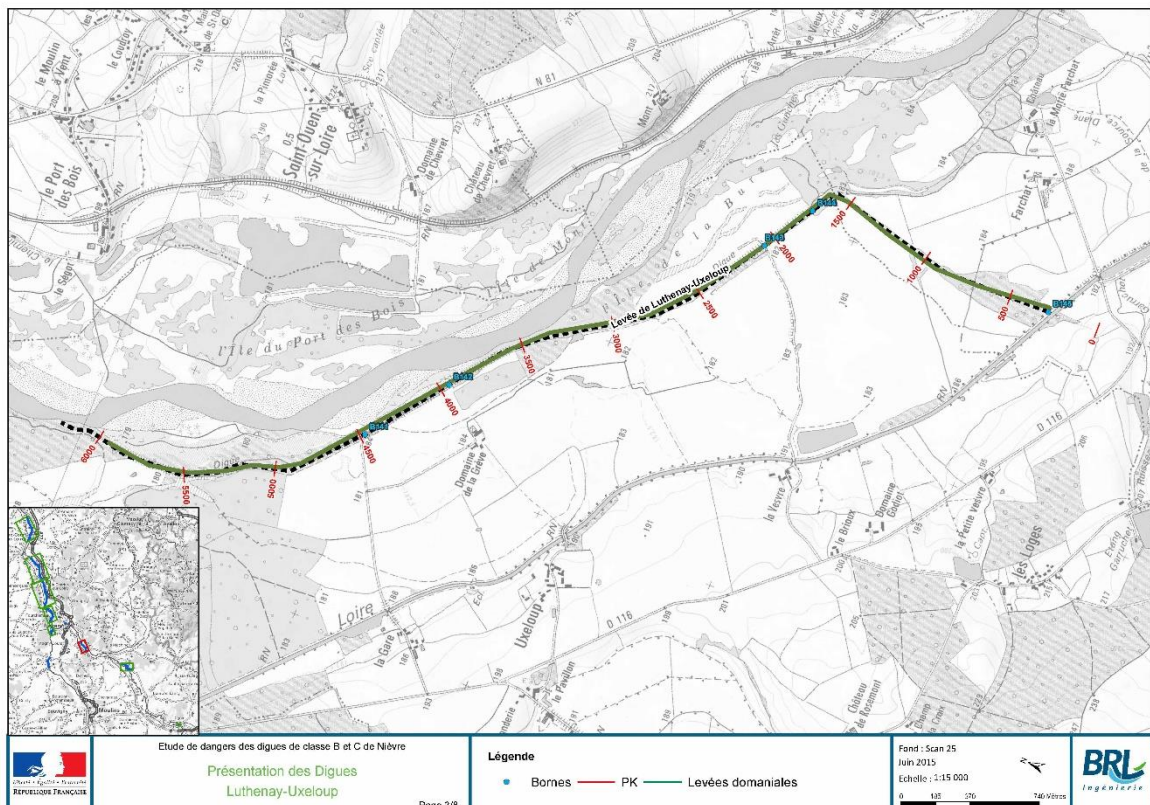


Figure 8 : Ouvrage constituant le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup

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 de 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 LUTHENAY-UXELOUP

La levée domaniale de Luthenay-Uxeloup n'a pas fait l'objet de classement.

La population protégée est estimée aux alentours de 10 personnes (source DDT58). Il est indiqué que le nombre de 10 habitants constitue le seuil de classement en digue de classe C ( $10 < \text{nombre} < 1000$  hab.).

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 Luthenay-Uxeloup 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 « *explique 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'un ouvrage relativement ancien (érigé au XIX<sup>e</sup> siècle), le périmètre du système d'endiguement et la zone protégée correspondante ne constituent pas des données d'entrée de l'étude mais des résultats de l'analyse fonctionnelle. En l'espèce, la délimitation définie pourra être différente de celle envisagée au démarrage de la présente étude.

L'ouvrage de protection étudié dans le cadre de la présente étude est constitué de la levée dite de "Luthenay-Uxeloup".

Le système d'endiguement se situe sur les communes de Fleury-sur-Loire et de Luthenay-Uxeloup.

La zone protégée correspondante est le val de Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup 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 Decize (hors zone d'étude), de Saint-Hilaire-Fontaine et de Charrin, et enfin de Digoin.

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

.

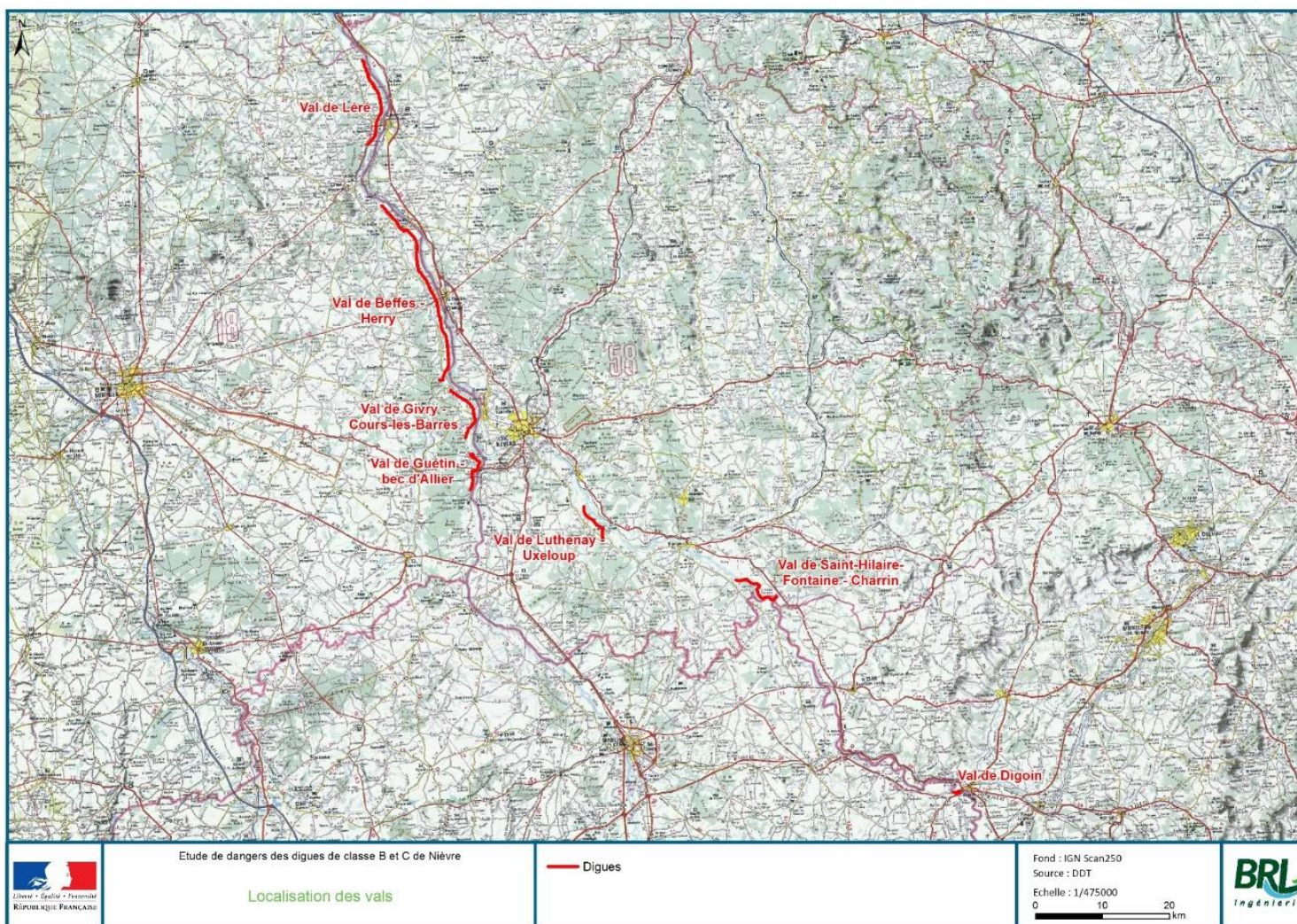


Figure 9 : localisation du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup au sein des vals de la Loire moyenne



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'à la commune de Luthenay. 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 000m<sup>3</sup>/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

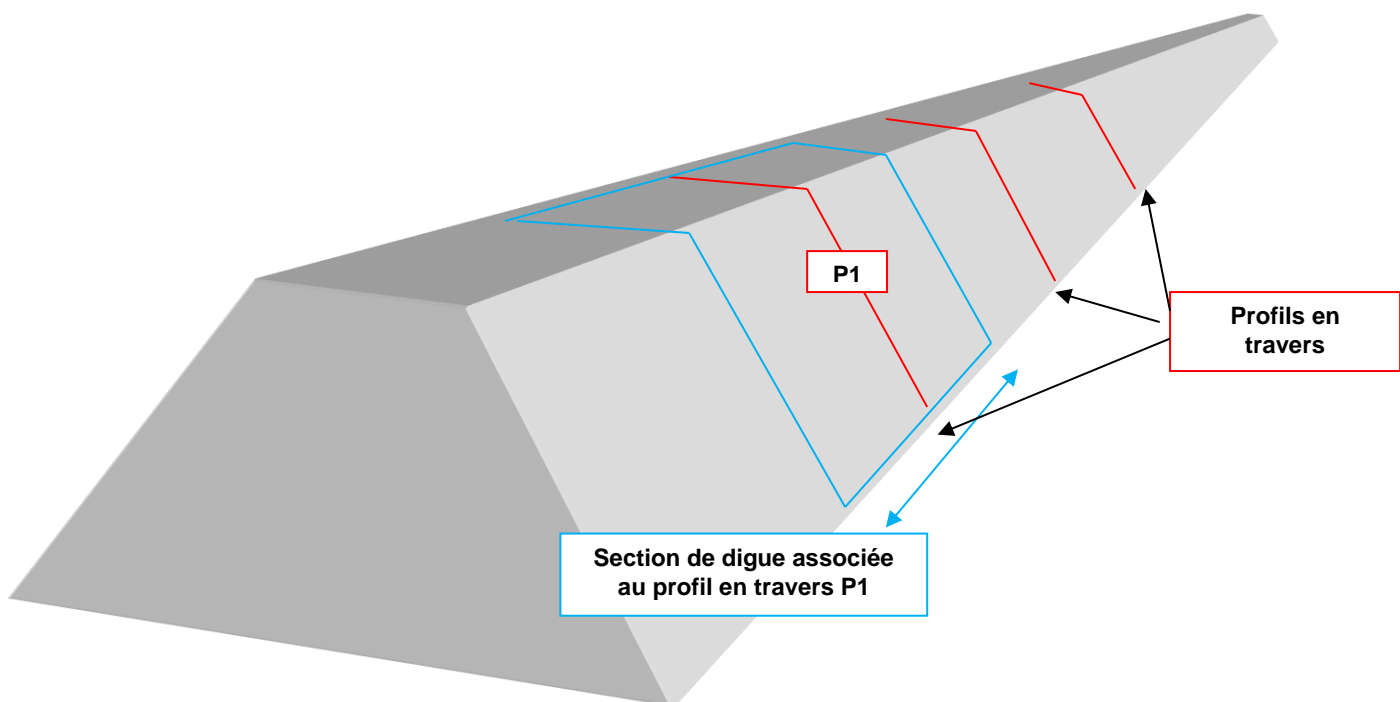
L'analyse fonctionnelle doit permettre d'appréhender le système d'endiguement du point de vue des fonctions de ses composants. Elle doit s'envisager à différentes échelles :

- 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 Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup est un système d'endiguement ouvert en aval.

#### **3.1.2.1 Ligne de défense principale**

Le système de protection du Val de Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup des crues de la Loire sur environ 6km, depuis la digue du Canal Latéral, en amont, au raccordement de la levée avec le TN.

Il est noté en aval de cette levée un point bas (voir §3.2.3).

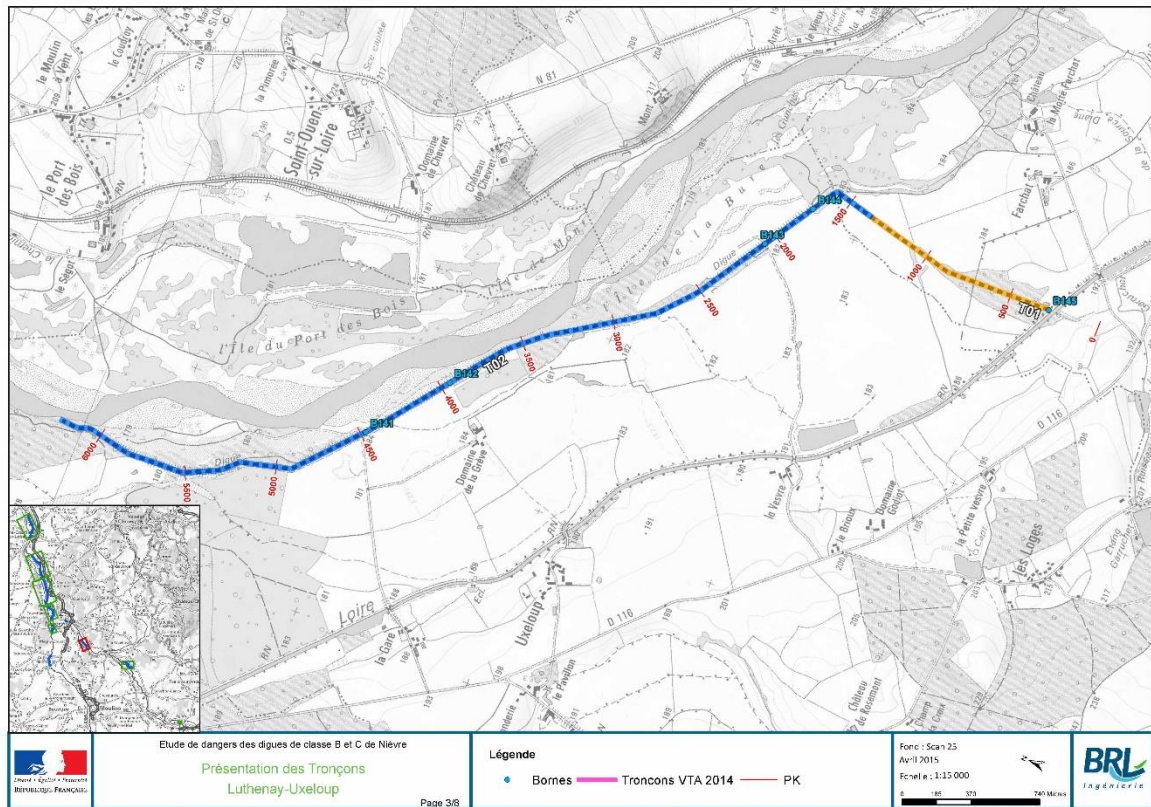


Figure 10 : ligne de défense principale du Val de Luthenay-Uxeloup

Les paragraphes suivants présentent les principales caractéristiques des différentes levées constitutives du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup.

### SECTION N°1 : LEVÉE DU PK280 AU PK1345 (L=1065M)

Cette section se caractérise par :

- ▶ Une hauteur de digue moyenne d'environ 1,7m, pour une largeur en crête de 2,6m et en pied de 11,9m,
- ▶ Une végétation très dense sur le corps de digue, y compris en crête (digue impénétrable sur plusieurs centaines de mètres),
- ▶ La présence de quelques terriers,
- ▶ Quelques zones humides en pied de talus,
- ▶ Le raccordement amont de la levée au remblai du Canal Latéral à la Loire.



Figure 11 : végétation au niveau de la crête en amont de la section n°1 (vue vers l'aval)



Figure 12 : arbres couchés au niveau de la crête (vus vers l'aval)



Figure 13 : terriers sur le haut du talus côté aval (vus depuis la crête de la digue)



Figure 14 : zones humides en pied de talus côté val (vues vers l'aval)

### SECTION N°2 : DU PK1345 AU PK 6220 (L=4875M)

Cette section est caractérisée par :

- ▶ Une hauteur de digue moyenne d'environ 2,9m, pour une largeur en crête de 5,9m et en pied de 22,6m,
- ▶ Une section de digue circulaire en crête avec une piste en terre ou enherbée,
- ▶ Une végétation ligneuse uniquement sur les 2 talus (végétation n'occupe plus la crête),
- ▶ La présence de terriers de grand diamètre,



- ▶ Un fossé en eau au pied de talus côté val,
- ▶ La présence de quelques corps étrangers.



Figure 15 : vue de la piste vers l'aval en amont de la section n°2



Figure 16 : terrier avec diamètre supérieur à 15cm sur talus côté val



Figure 17 : pied de talus côté val vu vers l'aval avec terre déposée issue d'un grand terrier



Figure 18 : terriers abandonnés sur talus côté Loire



Figure 19 : fossé en pied de digue côté val vu vers l'amont



Figure 20 : pylônes en pied de talus côté val

### 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 et des caractéristiques qui sont mises en évidence dans l'étude.

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 Luthenay-Uxeloup		Arrêté de classement du 24/11/2011		Commentaire
Sections du système d'endiguement	Linéaire	Sections des levées classées	Linéaire	
Levée Luthenay-Uxeloup	6,0 km	/	/	

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 Luthenay-Uxeloup sont indiquées dans le tableau suivant :

Limite	Coordonnée X (Lambert 93)	Coordonnée Y (Lambert 93)
Amont	723 442 m	6 638 778 m
Aval	720 889 m	6 643 462 m

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

### 3.1.3 Description de l'objectif de protection du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup

#### 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.

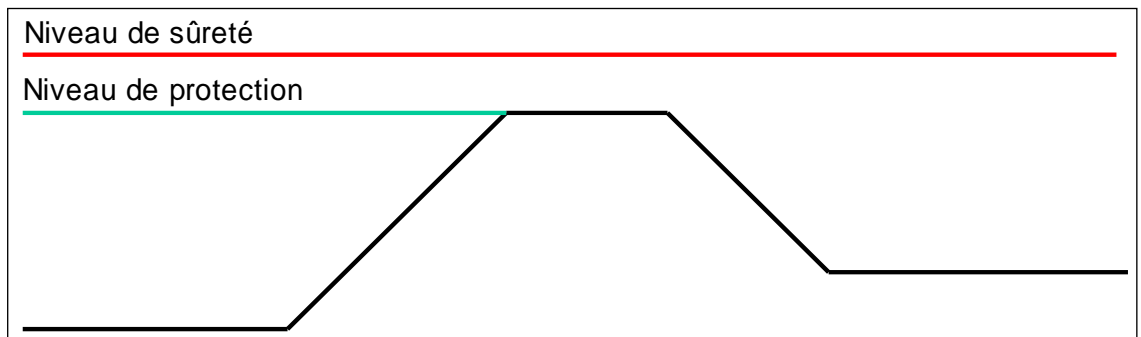


Figure 21 : Digue fiable

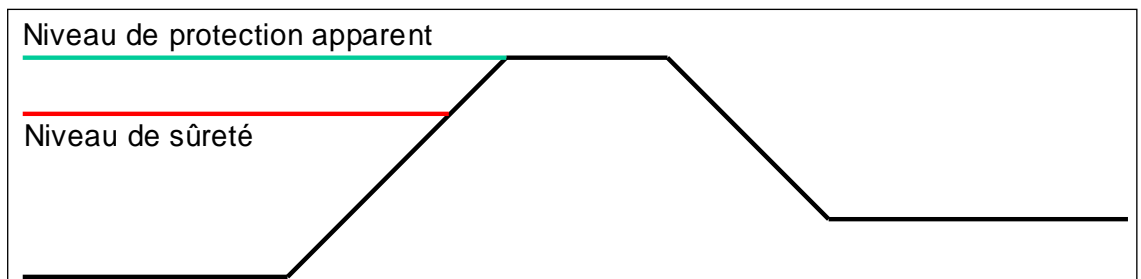


Figure 22 : Digue non fiabilisée, non équipée d'un déversoir (cas des levées constituant le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup)

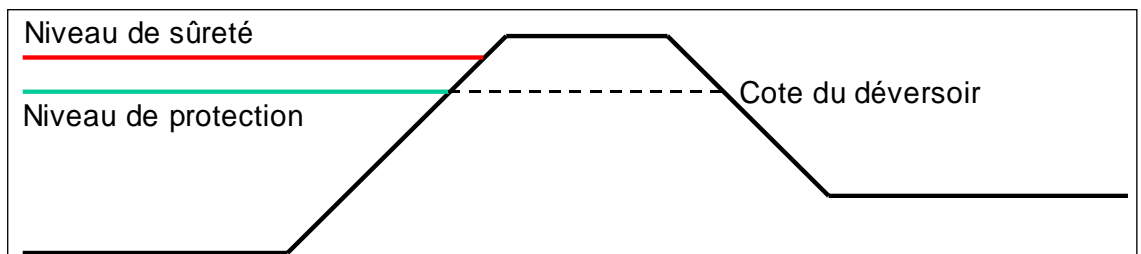


Figure 23 : Digue partiellement fiabilisée, équipée d'un déversoir

**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.

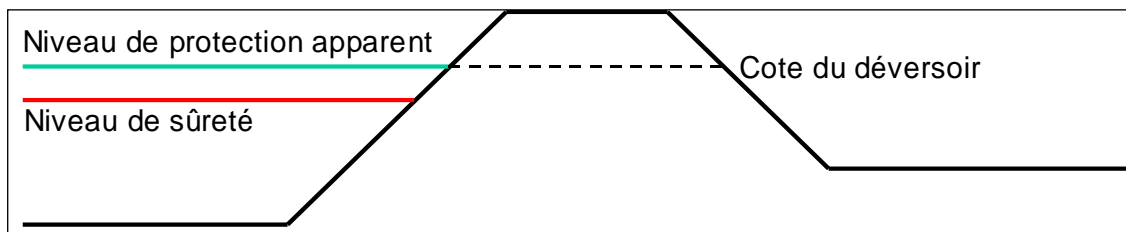


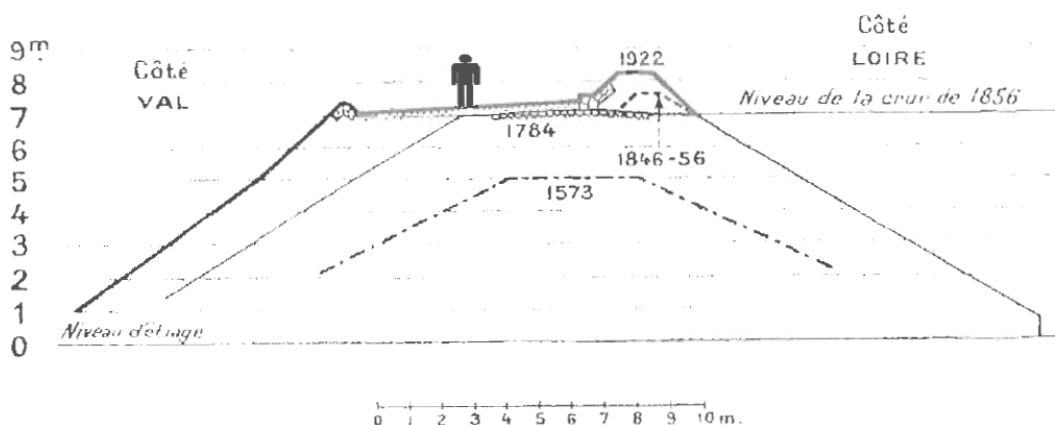
Figure 24 : Digue non fiabilisée, équipée d'un déversoir

**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 Luthenay-Uxeloup

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 Luthenay-Uxeloup 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 25 : évolution du profil de la levée de Loire depuis le XVIe 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 Luthenay-Uxeloup n'est cependant pas pourvu de déversoir.

### **3.1.3.3 Niveau de protection apparent du Val de Luthenay-Uxeloup**

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 LB11 construit avec le logiciel Hydrariv.

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 Luthenay-Uxeloup.

Les détails de l'étude hydraulique externe et des hypothèses de modélisation afférentes est disponible en annexe A.

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 11 occurrences de crue définies au § 6.1.2, afin d'identifier les occurrences, lieux et niveaux de surverse.

NOTA : aucune banquettes n'est présente sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup (cf. 3.1.5.1). La cote de la crête de digue se confond donc systématiquement avec la cote de son point haut.



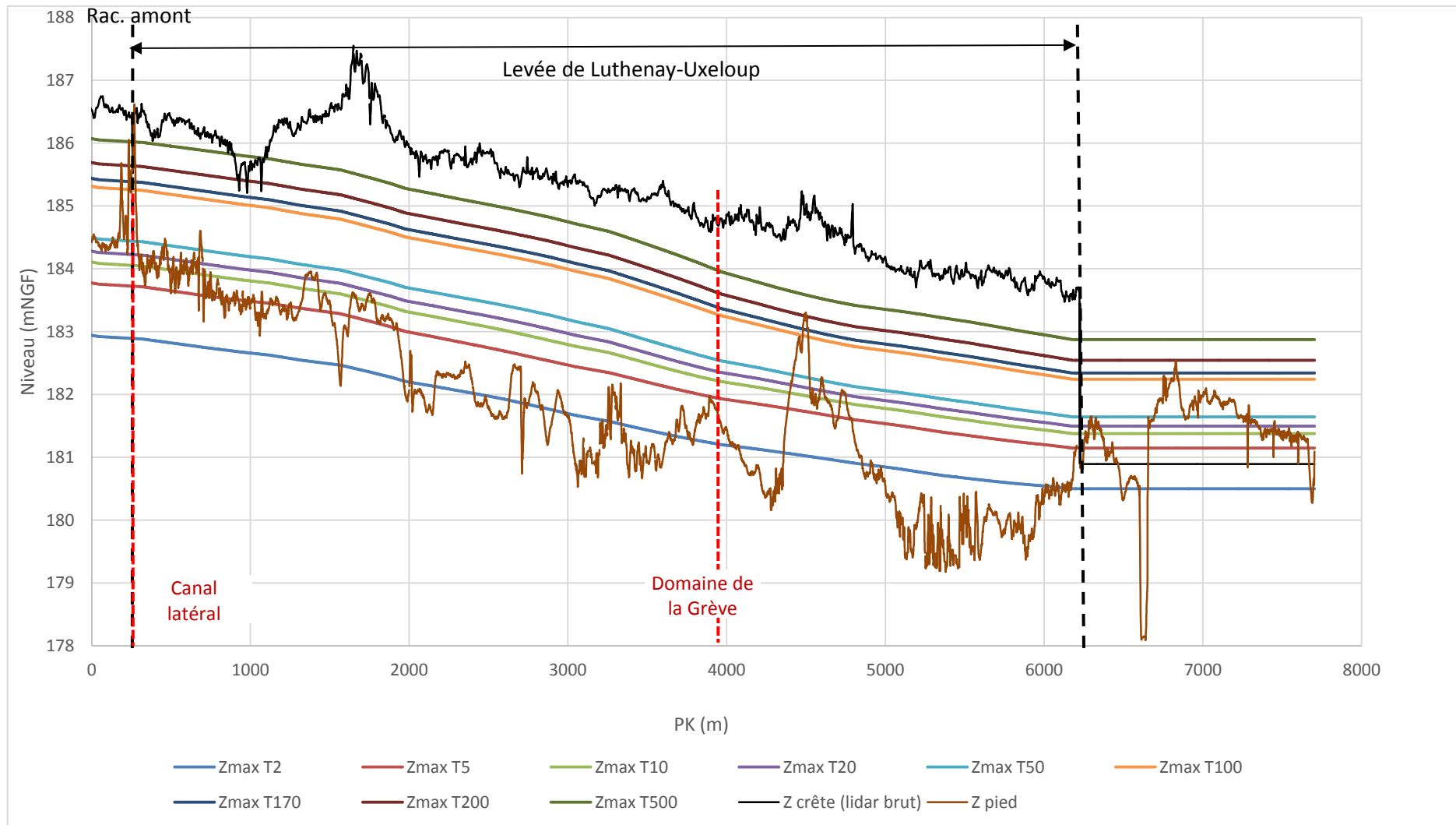


Figure 26 : Lignes d'eau, profils en long de la crête de banquette, crête de digue et pied de digue



De l'analyse de ces profils en long, il ressort que l'eau pénètre par remous au niveau de l'ouverture à l'aval dès la crue Q2. Les premières surverses sur la levée se produisent pour une crue Q200 environ vers le PK 1000.

**Le niveau d'eau correspondant à la crue bicentennale peut être considéré comme le niveau de protection apparent du Val de Luthenay-Uxeloup. Pour cette crue, la hauteur à l'échelle de référence de Decize est de 6.81 m et le débit est de 3870 m<sup>3</sup>/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 Luthenay-Uxeloup est relativement simple. Il est synthétisé dans le tableau suivant :

Élément du système d'endiguement ou de son environnement	Type	Fonction hydraulique	Fonctionnement
Digues du canal latéral	Section	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée	Passif
Levées en remblai	Section	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée	Passif
Linéaire non endigué en aval	Section	Assurer la vidange et le ressuyage du val en cas d'entrée d'eau dans la zone protégée	Passif

*Tableau 3 : 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 du val en cas d'entrée d'eau dans la zone protégée se ferait par l'intermédiaire du linéaire non endigué situé en aval. Pour une crue bicentennale, l'inondation du val durerait approximativement entre 100 et 110 h et dépendrait directement de la cinétique de la crue de la Loire. La vidange naturelle de la zone protégée ne serait toutefois pas complète, certains secteurs situés dans des points bas pouvant potentiellement conserver une cinquantaine de centimètres d'eau.

### 3.1.5 Principales caractéristiques externes du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup

Les paragraphes suivants présentent les principales caractéristiques externes du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup.

**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, le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup n'est pas équipé de rehausses.

### 3.1.5.2 Les chemins de services

La circulation est possible en crête sur environ 3km de long au niveau de la section n°2. Ce chemin est en terre dans sa partie amont, puis enherbé dans la partie aval de cette section.

La section n°1 reste accessible à pied, puis en raison d'une végétation se développant très largement en crête, devient impénétrable sur environ 400m de long.



Figure 27 : début de la piste en crête sur la section n°2 (vu vers l'amont)



Figure 28 : vue de la crête de la digue enherbée en aval de la section n°2 (photo prise vers l'aval)

### 3.1.5.3 Les ouvrages hydrauliques traversants

Il n'est pas noté d'ouvrage hydraulique sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup.

### 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 Luthenay-Uxeloup.

### 3.1.6 Profils en travers type des ouvrages

En s'appuyant sur les différentes phases de travaux décrites précédemment, 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 Luthenay-Uxeloup 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	<b>Stabilité mécanique d'ensemble (conditionne la stabilité mécanique de la section)</b>
2	<b>Etanchéité (limite les écoulements vers les autres composants)</b>
3	<b>Drainage (capte les écoulements internes au section et les évacue)</b>
4	<b>Non entraînement des particules en interface (empêche la migration des particules à l'interface des composants granulaires)</b>
5	<b>Auto-filtration (empêche la migration des particules, au sein d'un composant granulaire)</b>
6	<b>Résistance à l'érosion externe (eau, autres agents)</b>
7	<b>Résistance aux agressions externes intrusives (animaux fouisseurs, racines...)</b>
8	<b>Écoulement (laisser passer l'eau)</b>

Figure 29 : Familles de fonctions géotechniques des composants d'un profil en travers type de digue (source IRSTEA)

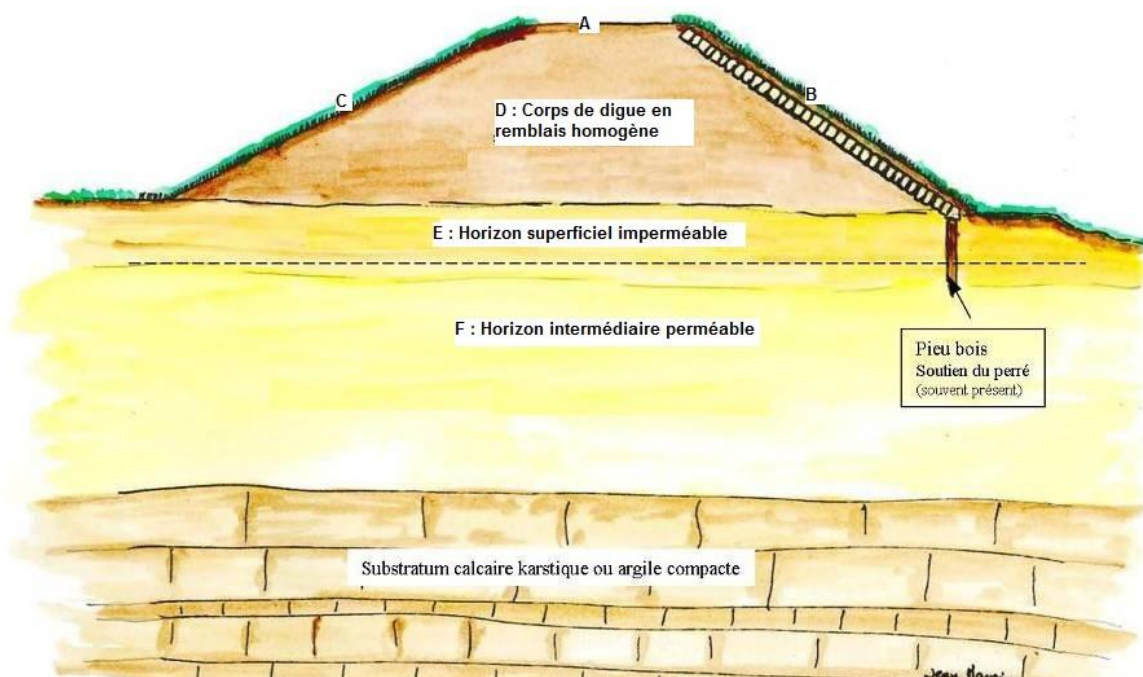


Figure 30 : profil en travers type de la levée de Luthenay-Uxeloup non renforcée

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

Tableau 4 : Tableau des composants et des fonctions géotechniques du profil en travers type (source IRSTEA)

D'un point de vue géométrique, la levée du Val de Luthenay-Uxeloup se caractérisent par une hauteur comprise entre 0.8m et 4,5m. La largeur en crête semble ne pas excéder 5m dans les parties visibles lors de la VTA 2014.

Seuls les talus côté terre au droit des parcelles agricoles (parcelles travaillées jusqu'en pied de digue) semblent présenter une pente plus raide que sur le reste de la levée.

NOTA : le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup 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.

### 3.1.7 Anomalies constatées dans le système d'endiguement

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

**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 Luthenay-Uxeloup.**



### 3.1.7.1 Canalisations incluses dans les levées

Une canalisation a été observée traversant au niveau de la crête de la digue sur la section n°2. Son fil d'eau n'a pas pu être levé précisément (problème de précision sous les arbres), mais dont le diamètre de la canalisation est de 250mm (matériaux PVC puis fonte). Cette canalisation est reliée au plan d'eau situé au niveau du terrain naturel côté val.

ID	Fil d'eau (mNGF)	POSITION	type
349 – OH8012	<i>Pb de précision</i>	T02 en crête	PVC+fonte diamètre 250mm



*Point 349 : canalisation PVC apparente en crête  
(disparaissant vers crête côté Loire)*



*Point 349 : canalisation vue en crête côté val*

Nota 1 : La prise en compte des canalisations dans la modélisation des aléas de rupture est détaillée en annexes C et D.

Nota 2 : 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.

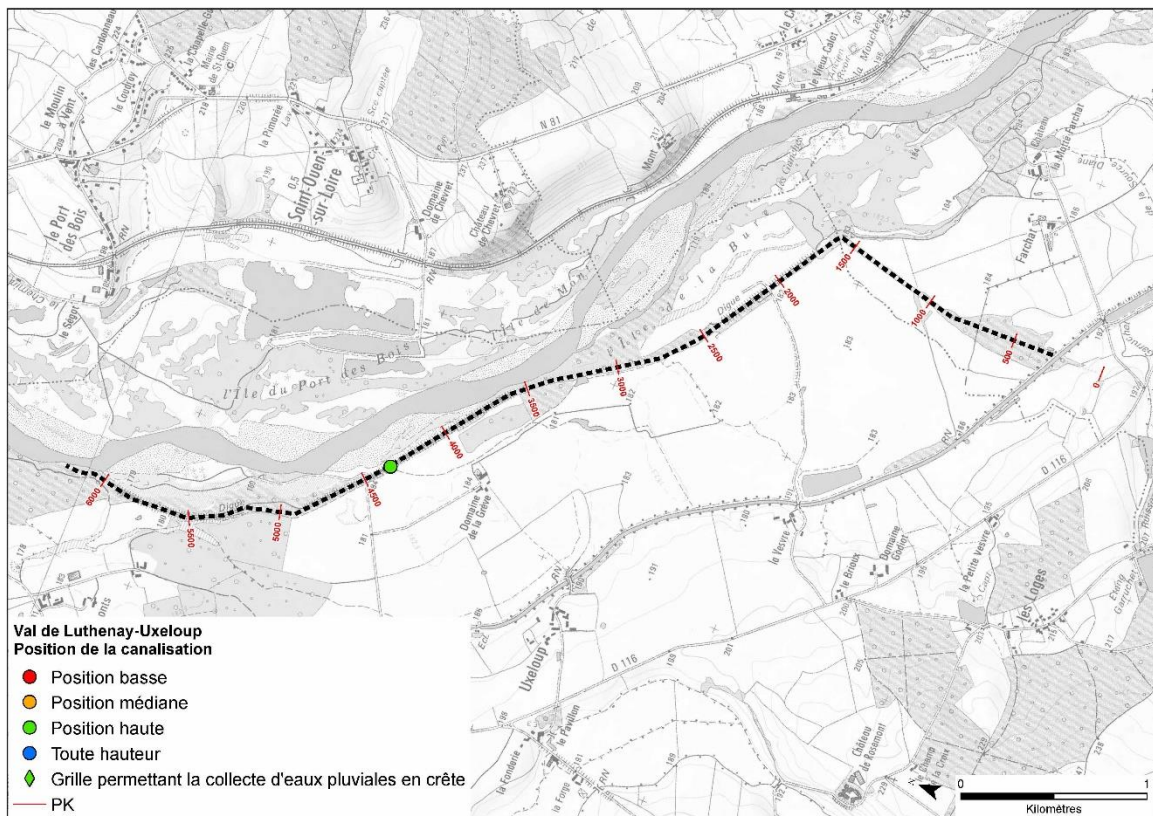


Figure 31 : Localisation et position des canalisations incluses dans le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup

### 3.1.7.2 Ouvrages et bâtiments encastrés dans les levées

Aucun ouvrage encastré n'a été observé.

### 3.1.7.3 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 de végétation ligneuse généralisée sur la totalité de la levée. 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 notamment au droit de la section n°1.

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

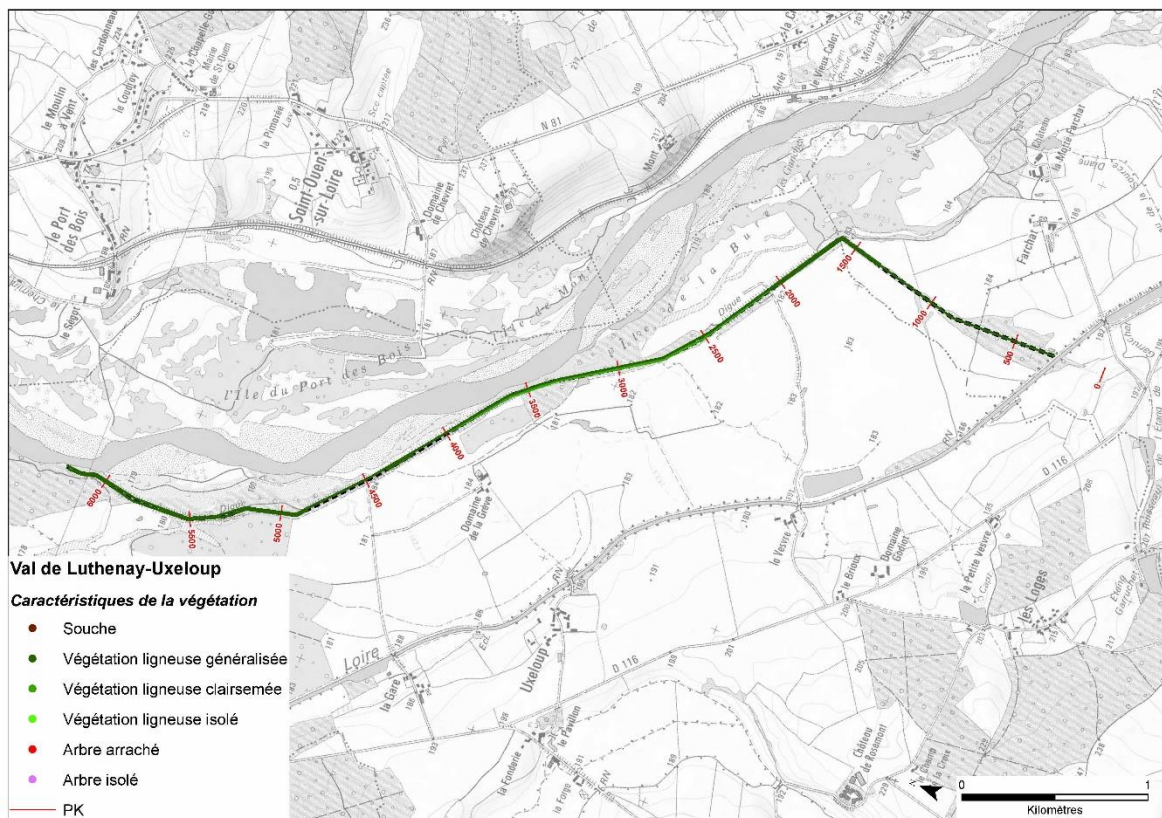


Figure 32 : Localisation et caractérisation de la végétation ligneuse présente sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup



### 3.1.7.4 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 Luthenay-Uxeloup (environ une vingtaine). Les diamètres des terriers observés sont pour la plupart inférieurs à 5cm sur la section n°1 et supérieurs à 15cm sur la section n°2.



Terrier 5cm de diamètre – crête section n°1



Terrier 10cm diamètre – section n°2 sur talus Loire



Terrier diamètre supérieur à 15cm – talus val sur section n°2



Terrier 5cm diamètre – talus val sur section n°2

Ces terriers sont susceptibles de favoriser des infiltrations et chemins d'écoulement à travers la digue, voire d'être à l'origine d'une érosion interne. Les terriers de diamètre supérieur ou égal à 20 cm ont un risque plus accru vis-à-vis de l'apparition d'un phénomène d'érosion interne.

Ces terriers peuvent également être des facteurs aggravants vis-à-vis de l'érosion externe sur le talus val en cas de surverse.

Nota 1 : la végétation dense a pu empêcher l'observation d'autres galeries dues à la présence d'animaux fouisseurs dans la zone.

Nota 2 : Le caractère traversant de certaines galeries n'a pas pu être formellement identifié sur le terrain.

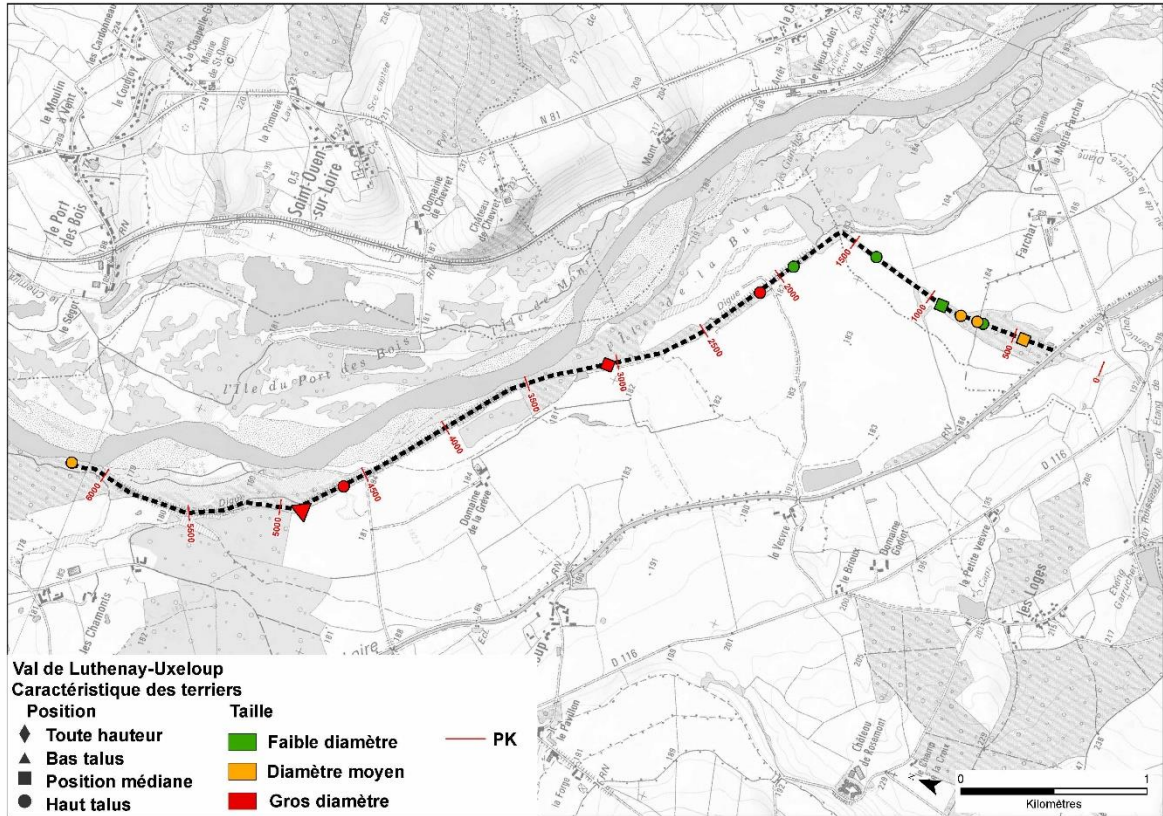


Figure 33 : Localisation, position et dimension des terriers identifiés sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup



### 3.1.7.6 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 :

#### Zones humides en pied de digue

Des étangs ou zones marécageuses sont présents à proximité du pied de digue :

- => Section n°1 : petites mares côté val et côté Loire ;
- => Section n°2 : zones humides en pied de talus côté val en aval de la section.



*Zones humides en pied de talus côté val sur la section n°1 (vues vers l'aval)*



*Zone marécageuse en aval de la section n°2 côté val reliée à un fossé en eau (vue depuis la crête)*

Il est relevé le plan d'eau de la gravière sur la section n°2, qui sur une partie du linéaire de la digue se trouve au même niveau que le contact avec le lit vif de la Thur. Il est rappelé ici que le plan d'eau se situe à minima 10m du pied de la digue.

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.

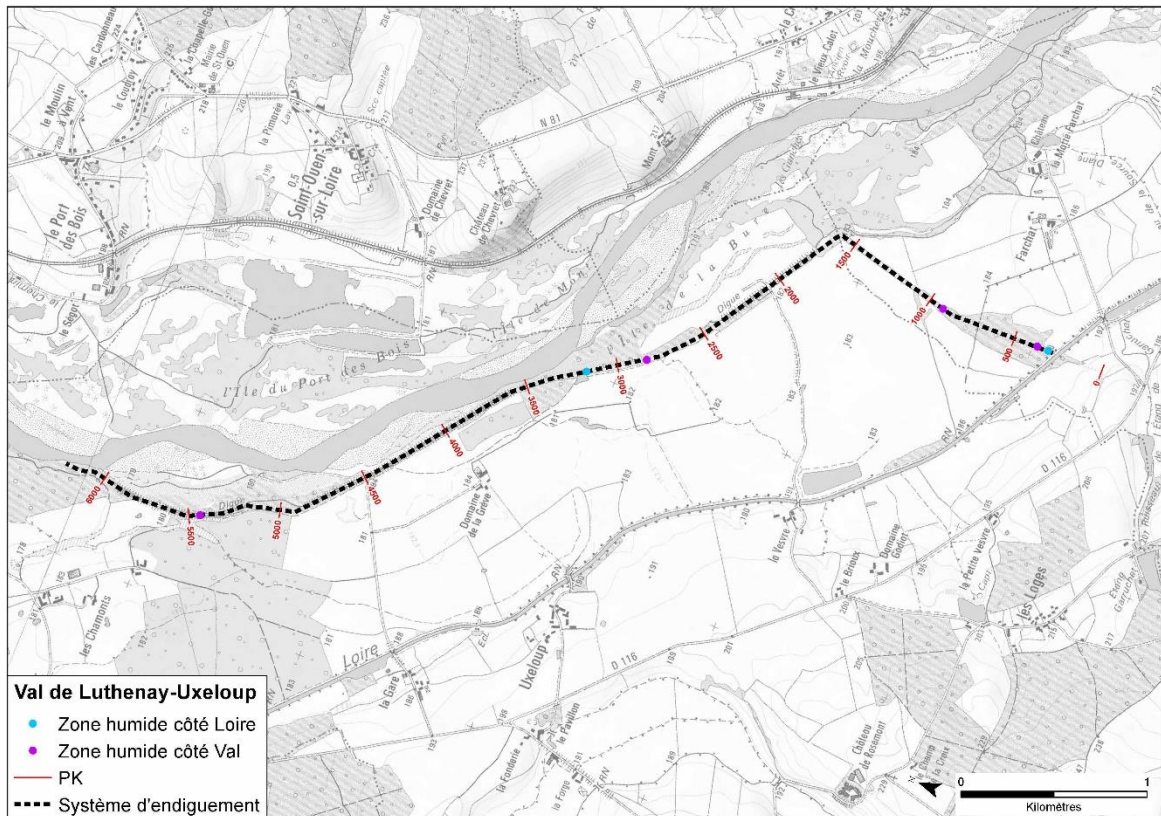


Figure 34 : Localisation des zones humides en pied de talus du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup

## 3.2 DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

### 3.2.1 La Loire

La Loire représente la principale interface du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup et son principal facteur d'agression. L'étude morphodynamique a notamment permis de mettre en évidence les principales actions de la Loire sur les levées constituant ce système d'endiguement (cf. chapitre 6 et annexe 5).

Le lit mineur de la Loire serpente de manière peu marquée au droit du linéaire d'endiguement. Le lit majeur est large en amont au niveau du canal latéral, de l'ordre de 1800m. On y note la présence du hameau de la Motte Farchat et d'un château. En aval, à mesure que le val s'élargit, le lit mineur se resserre pour atteindre 700m de large.

Le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup se caractérise sur un linéaire d'environ 200 m par un franc bord inférieur à 15 m. Cette faible largeur du franc bord est considérée comme insuffisante pour garantir la pérennité des berges et des talus côté Loire en cas de crue. De plus, dans ce secteur, aucun travaux de renforcement des pieds de berge / digues n'a été réalisé. On note également la présence de bras secondaires qui viennent longer le pied de digue.

### 3.2.2 La rive droite de la Loire

Aucun val ne se trouve en vis-à-vis avec le val de Luthenay-Uxeloup. La rive droite de la Loire est constituée du coteau. Une gravière de grande superficie est située en champs majeur droit proche de la rive non loin du village de Saint-Ouen sur Loire. Une voie ferrée en remblai longe le coteau de la rive droite sur toute la longueur du val.

### 3.2.3 Raccordements amont et aval

Le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup se raccorde en amont au niveau du remblai du canal VNF qui le coupe perpendiculairement.

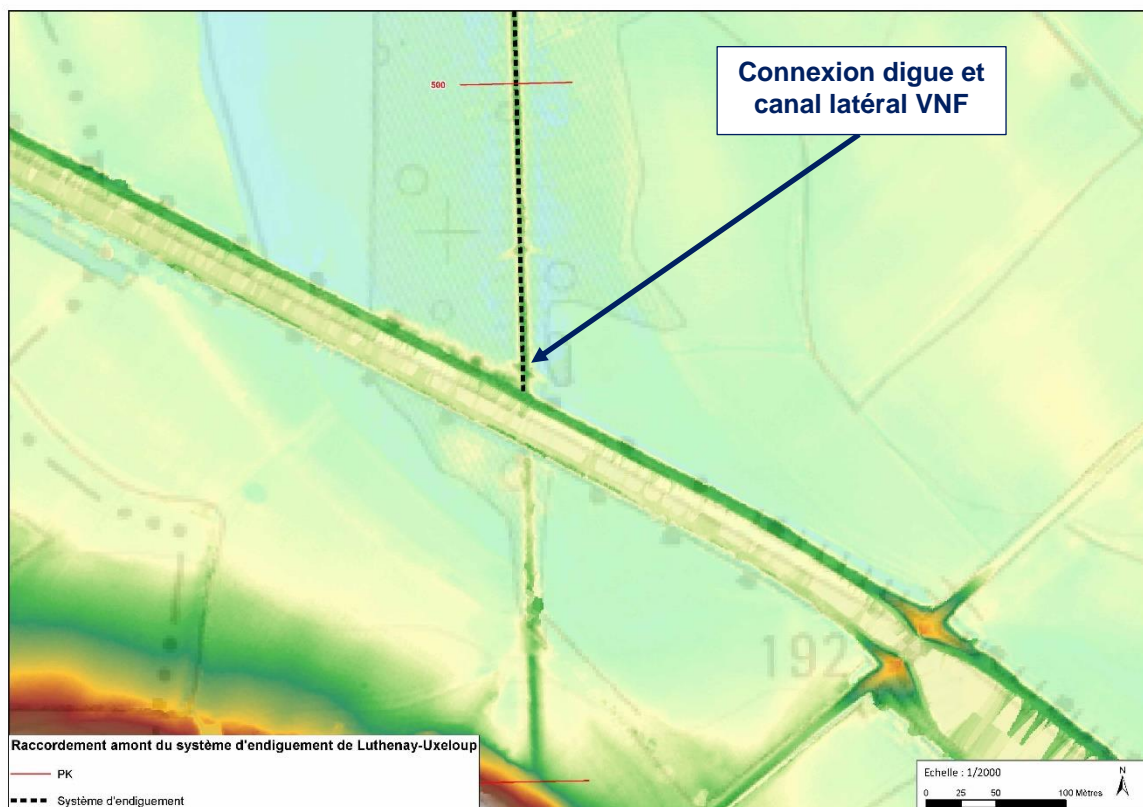


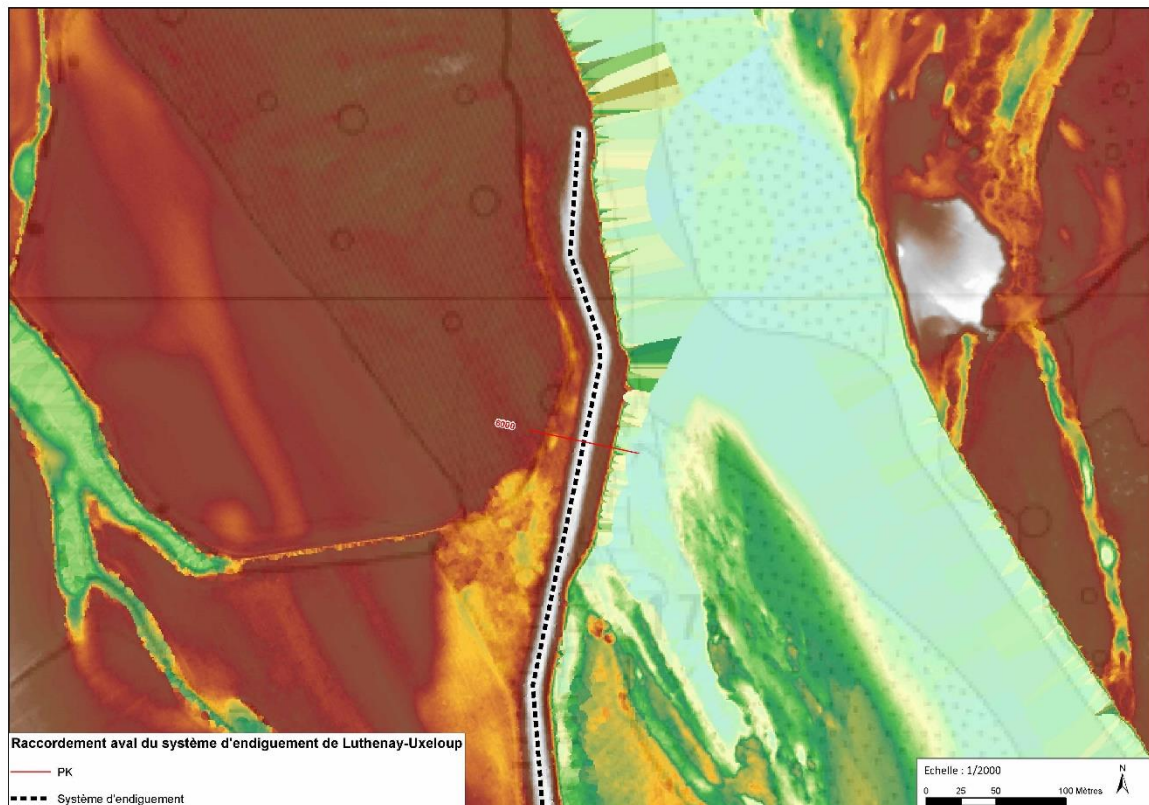
Figure 35 : Extrait du MNT au niveau du raccordement amont du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup





Figure 36 : Raccordement amont entre la digue de protection du val et le remblai du Canal Latéral de la Loire (vu vers l'aval)

A l'extrémité aval, le système d'endiguement s'arrête brutalement laissant le val de Luthenay-Uxeloup ouvert.



*Figure 37 : Extrait du MNT au niveau du raccordement aval du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup*



*Figure 38 : interruption du système d'endiguement vue vers l'aval*

### 3.2.4 Inondation du val par remous

L'interruption du système d'endiguement à l'aval rend vulnérable à une inondation par remous (cf. §3.1.3.3).

L'exploitation du modèle hydraulique a permis d'identifier, pour l'occurrence de crue correspondant au niveau de protection apparent du val de Luthenay, les zones du val inondées sans défaillance du système d'endiguement.



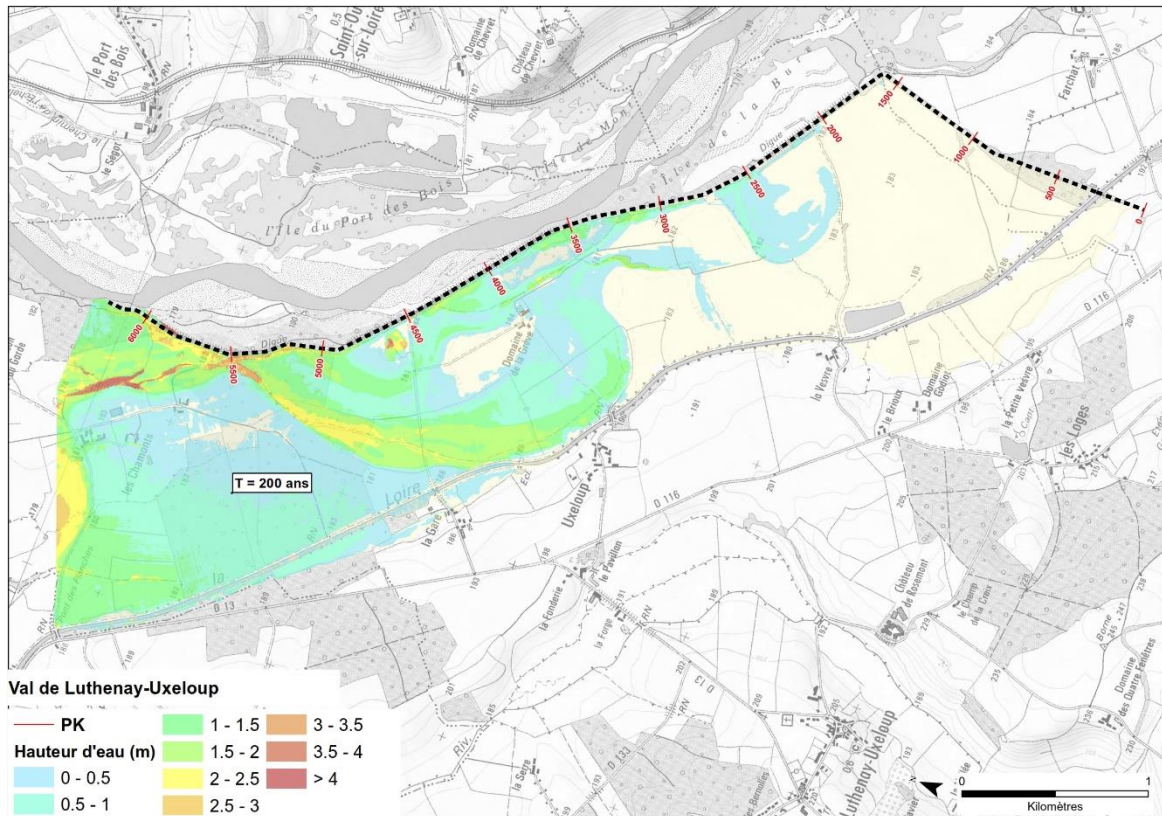


Figure 39 : Hauteurs d'eau du remous pour la crue correspondant au niveau de protection apparent du val de Luthenay

### 3.2.5 Affluents et fossés de drainage

Le val de Luthenay-Uxeloup possède un réseau de drainage dont le thalweg principal mesure 6,5 km. La surface drainée, incluant l'impluvium du val, est de 9 km<sup>2</sup>.

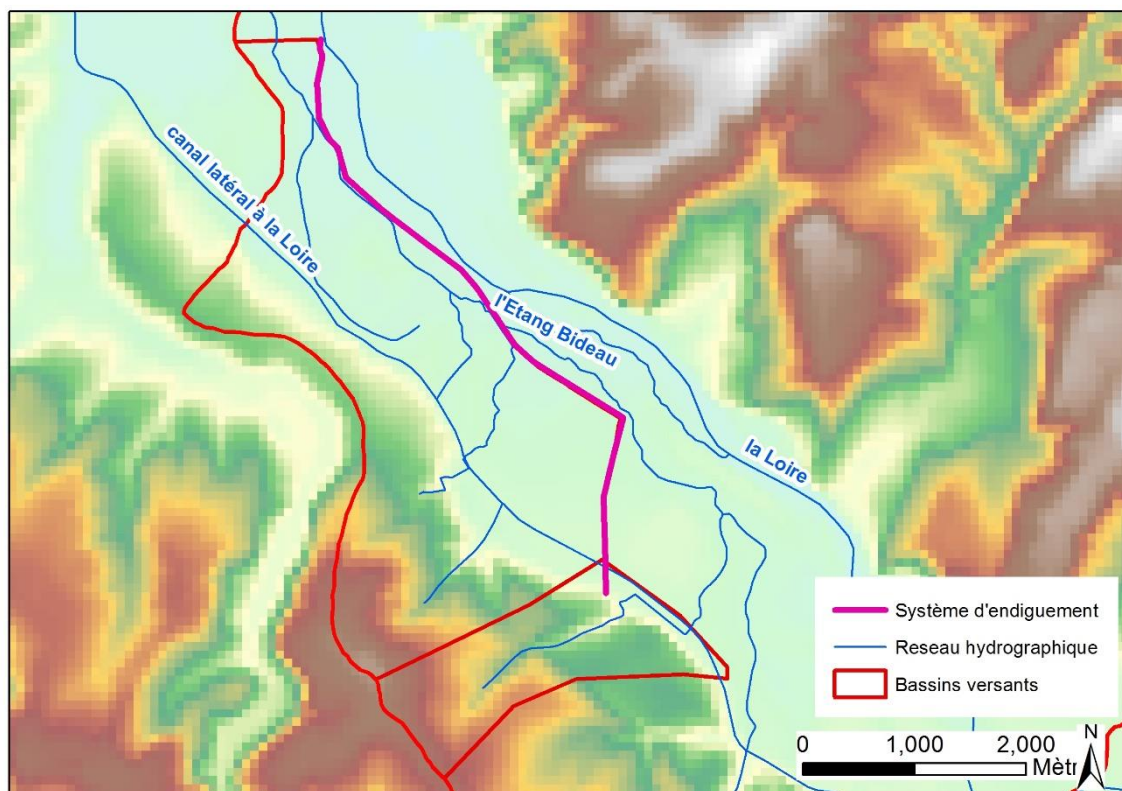


Figure 40 : réseau hydrographique (en bleu) et bassin versant (en rouge) des fossés et affluents s'écoulant par le Val de Luthenay-Uxeloup

### 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 Luthenay-Uxeloup

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 Luthenay, cette zone a été délimitée en croisant les zones d'influence des divers scénarios simulés.

La zone protégée ainsi délimitée est figurée ci-après. Elle représente une superficie de 649 ha. La partie du val située au sud du canal latéral est séparé du reste du val, on peut donc distinguer:

- ▶ Le « casier » au sud du canal latéral d'une superficie de 42 ha (en rouge Figure 41) ;
- ▶ Le reste du val d'une superficie de 607 ha (en jaune Figure 41).



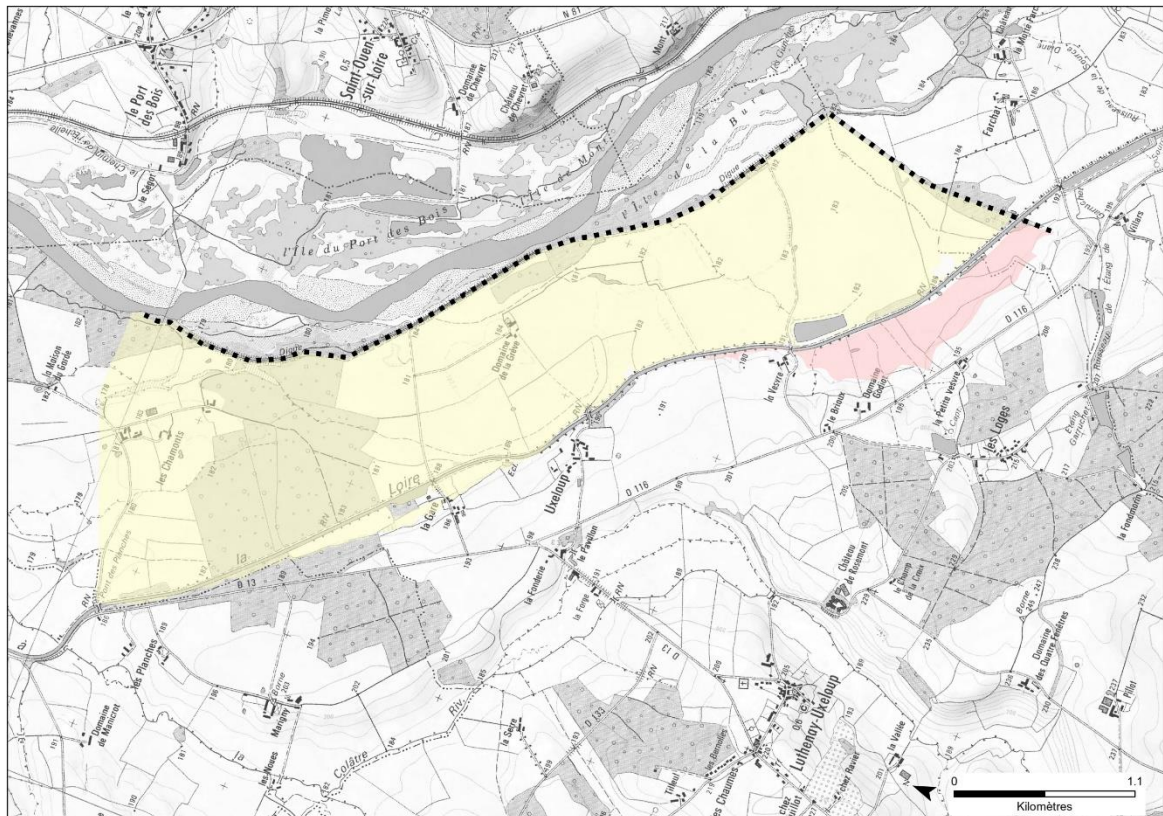


Figure 41 : Zones protégées associées au système d'endiguement de Luthenay - Uxeloup

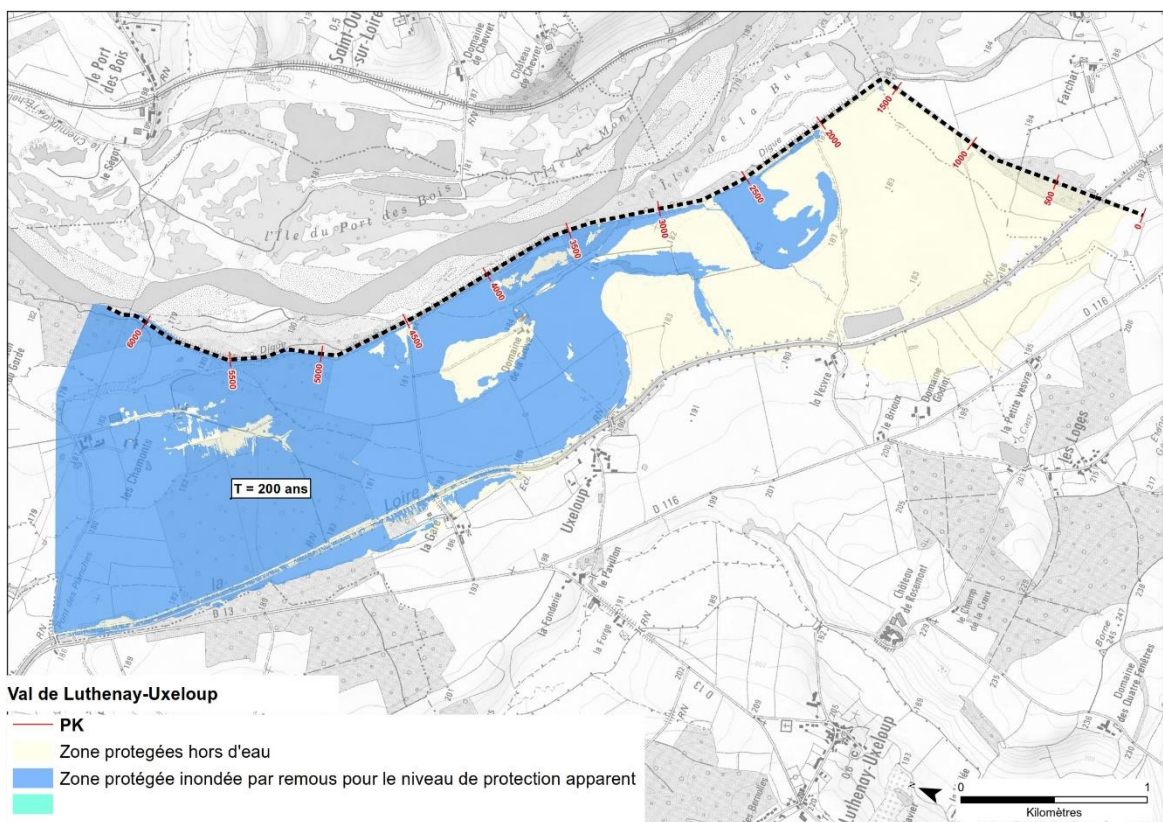


Figure 42 : Proportion de la zone protégée inondée par remous avant surverse

### 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<sup>ème</sup>.

#### 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.



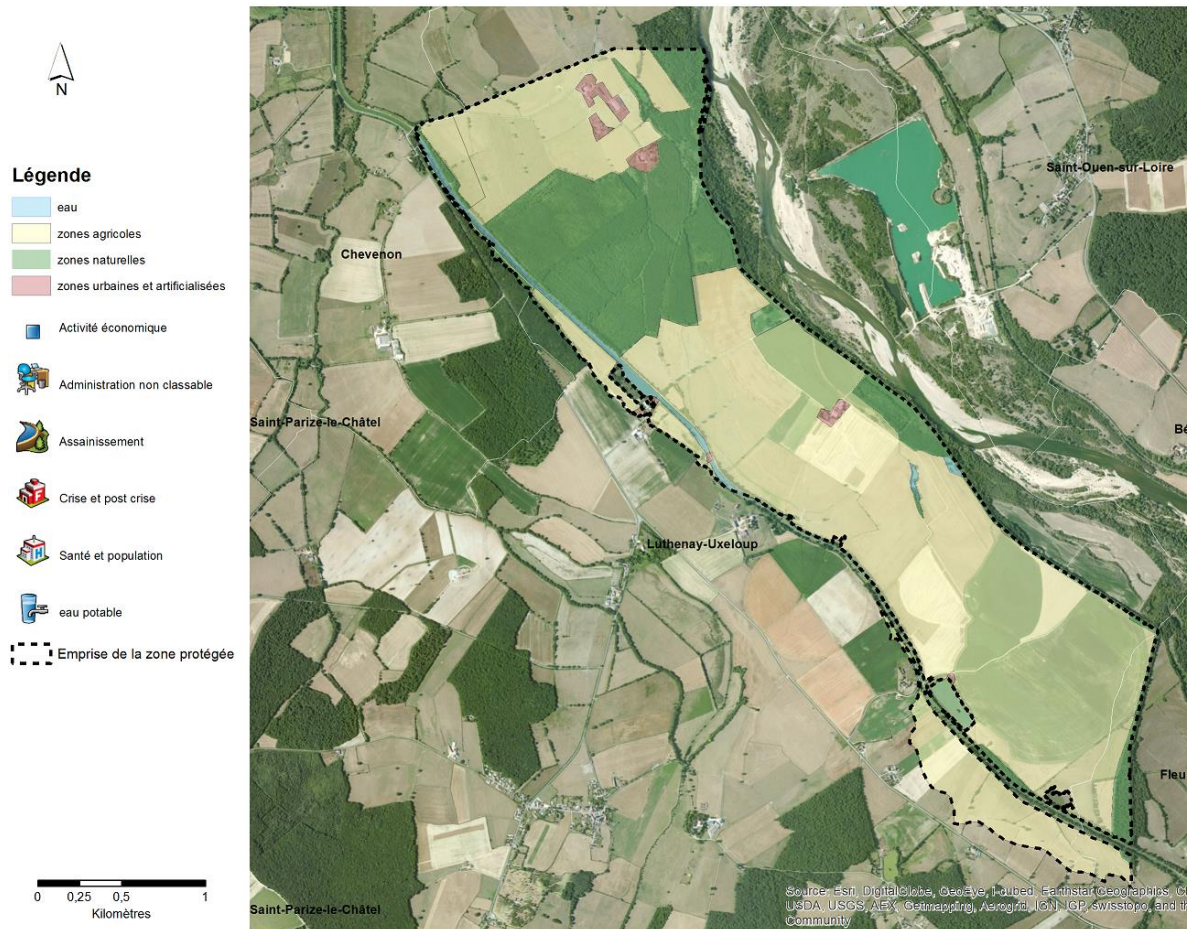


Figure 43 : carte d'occupation du sol

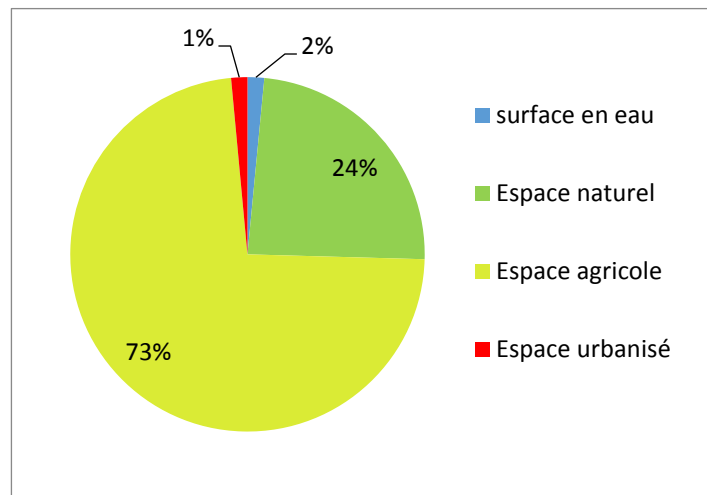


Figure 44 : diagramme de répartition de l'occupation du sol

### 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.

Luthenay	surface en eau	Espace naturel	Espace agricole	Espace urbanisé	Total général	population estimée
Chevenon		1.2	0.4		1.6	
Fleury-sur-Loire		6.4	21.6		28	
Luthenay-Uxeloup	9.8	147.3	451.3	9.6	618.0	14
Total général	9.8	154.9	473.3	9.6	647.6	14

Tableau 5 : Surfaces en hectares et population estimée par commune dans le val de Luthenay

Il est important de signaler que 9 personnes, soit près de deux tiers des 14 personnes résidant dans la zone protégée sont situées dans la zone de remous, c'est-à-dire qu'elles seront vraisemblablement inondées avant atteinte du niveau de protection apparent, et ce même en l'absence de défaillance du système d'endiguement.



### **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 Luthenay - Uxeloup.

### **3.2.10 Classement de la levée du Val de Luthenay-Uxeloup**

Il est rappelé que la levée n'est pas classée.

Compte tenu des résultats présentés aux paragraphes précédents et notamment de la population protégée, le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup devrait faire l'objet d'un déclassement, suite au décret paru au JO du 14 mai 2015. En effet, 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) et la classe D a été supprimée.



## 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 doit élaborer 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

A ce jour, les consignes écrites n'ont pas été rédigées sur le val de Luthenay-Uxeloup. Ces consignes seront rédigées dans la mesure où la présente étude de dangers apportera de nombreuses précisions sur le système d'endiguement.

Il n'est pas prévu de surveillance de la levée (digue jugée peu accessible et enjeux limités). Toutefois une **information est transmise à la Mairie de Luthenay-Uxeloup du moment où la Loire atteint 4,40m à la station hydrométrique de Decize (58)**. A ce niveau la levée est en charge de 50cm selon les résultats des lignes d'eau de crues utilisées par le Service de Prévision des Crues (SPC) Loire-Cher-Indre de la DREAL Centre-Val de Loire. Le débit de la Loire est estimé à 1400m<sup>3</sup>/s pour une période de retour inférieure à 5 ans.

Une charge de 2m de la levée est estimée du moment que la Loire atteint 5,90m à Decize. Le niveau de revanche à 1m se situe à 5,60m à Decize.

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 Giennoise pour les 3 principales crues des années 2000 :

	Station SPC Decize (58)	Station SPC de Gilly (71)	Station SPC de Digoin (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

**Enfin la Préfecture de la Nièvre a proposé le seuil de 5,2m à la station hydrométrique de Decize pour faire évacuer le val de Luthenay-Uxeloup (soit au-dessus du pic de crue de décembre 2003).**

### 4.3 GESTION DES SITUATIONS D'URGENCE

En cas de dégradation avérée ou d'indice d'initiation de rupture, la DDT 58 est à même d'intervenir tant que l'ampleur des dégâts reste limitée.

### 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 Luthenay-Uxeloup. 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 Luthenay-Uxeloup est validé, la revue de sûreté ne serait 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 LUTHENAY-UXELOUP**

L'absence de procédure concernant les mesures de surveillance est préjudiciable à la prévention du risque de rupture de cette levée. Par ailleurs, le gestionnaire devra se conformer aux exigences légales suivant le décret du 11/12/2007 et l'arrêté du 29/02/2008.

Pour les niveaux de suivi, il est proposé de suivre la Loire également à la station hydrométrique de Gilly. Un suivi pourrait être mis en place notamment dans les secteur où l'ouvrage est en contact avec le lit vif de la Loire.

Cette levée présente une densité très importante de boisements (notamment dans sa partie amont) lors de la VTA d'août 2014. Par ailleurs, il a été signalé de gros dégâts lors de la tempête de juin 2012 (arbres déracinés, branches cassés,...). Dans le cas où la DDT58 souhaiterait conserver la levée de Luthenay-Uxeloup, un débroussaillage devra être réalisé en totalité (crête et talus).



## 5. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES POTENTIELS DE DANGERS

Sur le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup, 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 :
  - Ouverture d'une brèche sur un tronçon de la levée
- De problématiques extérieures à la levée :
  - Remontée de nappe dans le val en arrière des levées
  - Remous dans la partie aval du val ouverte au terrain naturel
  - Inondation par les affluents ou ruissellement urbain

### 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 4,5 m et une hauteur moyenne de 2,7 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 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 Luthenay, aucune reconnaissance géophysique n'a été menée. Les caractéristiques de l'assise en termes de perméabilité sont impossibles à déterminer. Néanmoins, par analogie avec les contextes géotechniques des vals voisins, la problématique de remontée de nappe côté val est considérée comme avérée.

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.

### 5.4 REMOUS PAR LA PARTIE AVAL OUVERTE AU TERRAIN NATUREL

Comme nombre d'autres vals de la Loire, le val de Luthenay est ouvert à l'aval 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.

### 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.



## 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 km<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>/s, alors qu'en amont de Roanne son débit était de 1 450 m<sup>3</sup>/s, et en mai un débit de 2 400 m<sup>3</sup>/s alors que son débit amont était de 1 570 m<sup>3</sup>/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 Luthnay-Uxeloup proviennent de plusieurs sources :

- des données historiques limnimétriques et de débit aux différentes stations et échelles de crue remontant au milieu du XIXe 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.

### 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 205 km en amont du val de Luthnay-Uxeloup, 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 m<sup>3</sup>/s, le débit sortant après écrêtement est de 1000 m<sup>3</sup>/s. Pour un débit de pointe entrant compris entre 2 000 m<sup>3</sup>/s et 4 000 m<sup>3</sup>/s, le débit sortant après écrêtement est de moitié au pied du barrage à Roanne. Au-delà, il écrête 2 000 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s dans les configurations les plus favorables, et de l'ordre de 500 m<sup>3</sup>/s à 700 m<sup>3</sup>/s pour des événements similaires à ceux du XIXe 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

Les hypothèses de débit de crue à retenir basées sur la méthode EGRIAN sont synthétisées dans le tableau ci-après. Le corps des hydrogrammes s'appuieront de fait sur 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 <sup>3</sup> /s]	2450	2620	3280	3500	3870	4500	5000

Tableau 6 : caractéristiques des crues moyennes à rares de la Loire au niveau du val de Luthenay-Uxeloup

Les hydrogrammes injectés en amont du modèle et propagés jusqu'au val de Luthenay-Uxeloup ont été si nécessaire complétés d'un apport intermédiaire au niveau de l'Aron de sorte à obtenir les débits objectifs au droit de la zone d'intérêt.

#### 6.1.2.4 Crues fréquentes : débits de pointe des crues caractéristiques

Les hypothèses relatives aux crues fréquentes (période de retour comprise entre 2 et 20 ans) sont synthétisées dans le tableau ci-après.

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

Contrairement aux crues moyennes à extrêmes, ces hypothèses hydrologiques sont construites à partir des résultats de l'étude transversale hydrologique.

#### 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 > Q<sub>2</sub>) : 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 Luthenay-Uxeloup

Les lignes d'eau au droit du val de Luthenay Uxeloup – et donc les occurrences de premières surverses – dépendent 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 Luthenay Uxeloup est le barrage de Villerest sur la Loire.

Le risque de rupture du barrage de Villerest a été étudié par EDF en 1974<sup>1</sup>, puis révisé en 2001 par ISL<sup>2</sup> pour le compte de l'Etablissement 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s.

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

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.

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

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

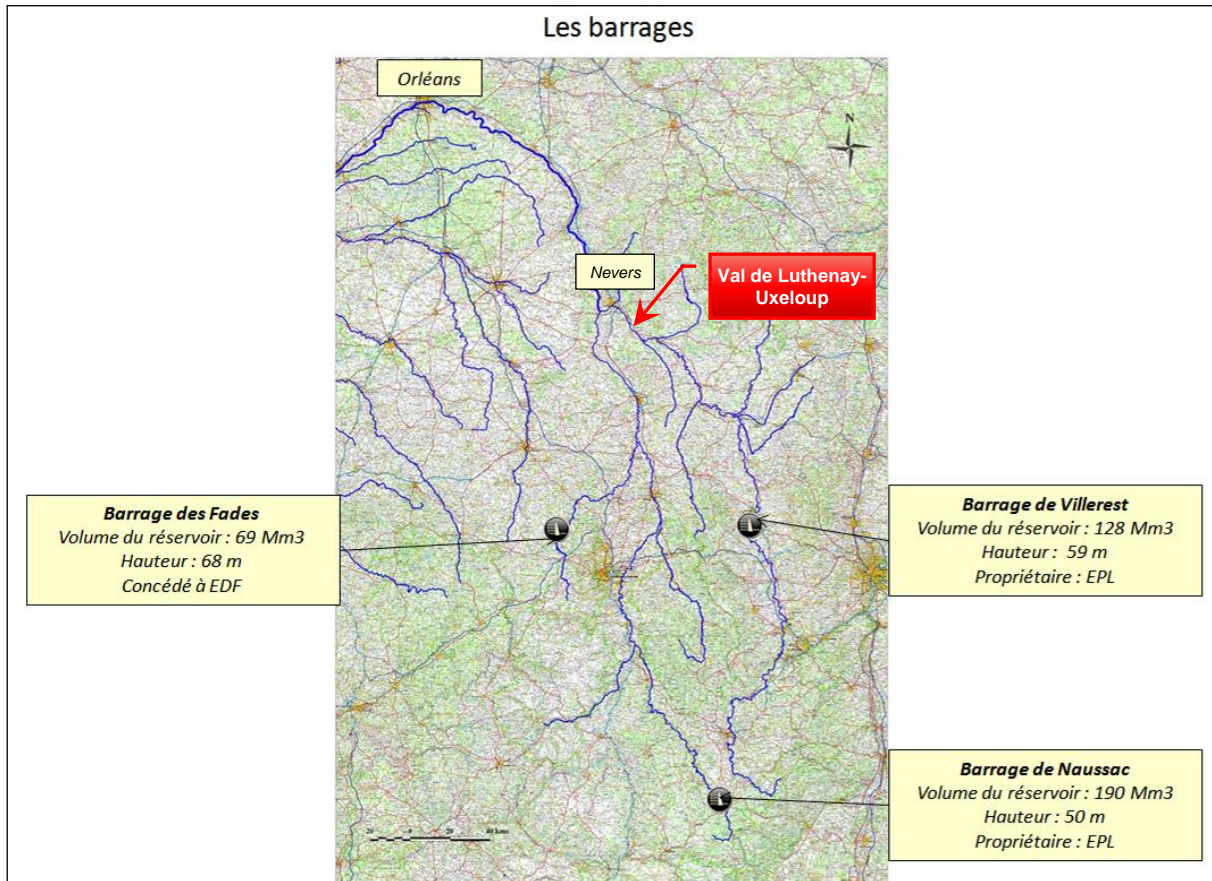


Figure 45 : position des principaux barrage de la Loire et de ses affluents sur le réseau hydrographique

## 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 XVI<sup>e</sup> 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  $-70^{\circ}\text{C.j}$ , 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 LUTHENAY-UXELOUP

Le val de Luthenay Uxeloup est principalement composé de la formation alluvionnaire Fy - z qui correspond aux alluvions holocènes et modernes de la Loire.



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

- ▶ Fx : Sables fins, sables, graviers et galets.

Cette formation n'occupe qu'une très faible surface. Elle est constituée d'un limon très sableux brunâtre à noirâtre de faible épaisseur surmontant des sables fins à grossiers, quartzo-feldspathiques, à galets de quartz et de silex remaniés des formations du Bourbonnais et , localement de galets de granits et de roches volcaniques de 4 à 6 cm maximum.

- ▶ Fw : Limons argileux, sables fins à grossiers quartzo-feldspathiques.

Essentiellement représentée en rive gauche par des lambeaux isolés, cette nappe constitue le premier remblaiement à caractère grossier. Elle domine la plaine alluviale d'une vingtaine de mètres. La partie inférieure est constituée de sables fins à grossiers quartzo-feldspathique à galets de quartz, silex, granite atteignant jusqu'à 10 cm. Des limons beiges à brun rougeâtre très compacts, d'environ 1,50 m d'épaisseur, surmontent le matériel grossier.

- ▶ FL : Formations argileuses, accessoirement sableuses des plateaux

Les formations argileuses des plateaux montrent une tendance évolutive au limon en surface. Cette formation occupe les parties qui limitent les deux bassins versant de l'Allier et de l'Aubois. Il s'agit d'argiles parfois sableuses, très compactes, se développant sur 1 à 3 m, jaunes à marbrures grises ou exceptionnellement ocre à rouge brique.

- ▶ I<sub>3-4</sub> : Sinémurien. Calcaire gris à Gryphées.

Le Sinémurien débute par un calcaire marneux clair et est surmonté par des calcaires gris bleu, compacts, marneux, en bancs réguliers et à surface ondulée séparés par des interbeds marneux. Les zones les plus marneuses de cette formation sont fortement fossilifères, avec notamment des Ammonites et de nombreux brachiopodes.

- ▶ I<sub>1-2</sub> : Hettangien. Calcaire jaune.

Ces calcaires sont de couleur gris clair à jaune. Dans la partie supérieure, les calcaires sont riches en entroques et en radioles d'Oursins et la surface des bancs peut-être perforée. Il se débite en plaquettes. L'Hettangien est de plus en plus franchement marin en montant dans sa série bien que toujours d'origine peu profonde.

## 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<sup>ème</sup> siècle.

Le val de Luthenay Uxeloup présente une incision pouvant atteindre 1 m au maximum entre les années 1996 et 2000. Durant les périodes récentes, soit entre 2000 et 2005, le profil en long est stable et ne présente pas de phénomènes remarquables d'incision ou d'exhaussement du cours d'eau. Les incisions anciennes sont toutefois à prendre en considération.

## 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 Luthenay Uxeloup, le cours de la Loire a subi des modifications importantes de son tracé, notamment visible entre les Pk 433 et 437 entre 1971 et 2005, où l'ancien lit de la Loire forme aujourd'hui les formes alluvionnaires situées en intrados.

Ainsi, le lit de la Loire a subi deux formes d'évolutions distinctes sur ce secteur, soit un éloignement du système d'endiguement par érosion des terrains situés à l'Est, soit un rapprochement vers le système d'endiguement par érosion des berges situées à l'Ouest.

La Loire a progressée vers le système d'endiguement de Luthenay Uxeloup au droit des Pk suivants :

- ▶ Pk 434 à 435 ;
- ▶ 435,5 à 436,5.

Inversement, la Loire s'est éloignée du val de Luthenay Uxeloup au droit des Pk suivants :

- ▶ Pk 433 à 434 ;
- ▶ Pk 435 à 435,5 ;
- ▶ 436,5 à 437.

L'amplitude des méandres est moins importante durant les périodes récentes. Quelques atterrissements ont subi une phase de végétalisation récente, notamment au droit du Pk 433 et 435,4. Aucun aménagement n'est recensé au droit du val de Luthenay Uxeloup.

Entre 2005 et 2010, pour des conditions hydrologiques quasi-similaires, une progression du lit de la Loire en pied de digue est observable entre les Pk 434 et 435. Le suivi de l'évolution de ce secteur présente ainsi un intérêt certain en raison des risques de déstabilisation de berges que cette érosion est susceptible de provoquer.

## 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 Luthenay-Uxeloup, le taux de végétalisation du lit mineur de la Loire amont varie entre 0 et 4%. Il n'est pas nécessaire de prévoir de gestion de la végétation au droit de ce val.

Le val de Luthenay-Uxeloup 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 sont caractérisés par des sollicitations de berges soutenant le système d'endiguement. Ces mêmes secteurs sont caractérisés par la présence d'obstacles ayant pour effet d'orienter les écoulements en direction du système d'endiguement. Ces secteurs se situent au droit des Pk 434,2 et 437.

Ces secteurs situés au droit des Pk 434,2 et 437 sont également caractérisés par la présence d'obstacles.

### 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 - 4 % 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 au niveau des berges soutenant le système d'endiguement au droit des Pk 434,2 et 437.	Deux obstacles situés au droit des Pk 434,2 et 437 engendrent des écoulements sécants au système d'endiguement.	Stabilité du profil en long durant les périodes récentes	Nombreuses évolutions du tracé de la Loire entre 1971 et 2010.
Facteur de pondération				Ces obstacles favorisent les sollicitations en pied d'ouvrages identifiées sur ces mêmes secteurs.		Entre les Pk 434 et 435, la Loire a progressé en pied d'ouvrage en érodant la berge situé en 1971 à l'interface. L'évolution de ce secteur est à suivre.
Qualification de l'aggravation de l'aléa de rupture	Négligeable	Négligeable	Important	Important	Négligeable	Modéré

## 6.5 ALÉA SISMIQUE

Le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup 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 46 : 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).

<sup>3</sup> 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 Luthenay-Uxeloup.

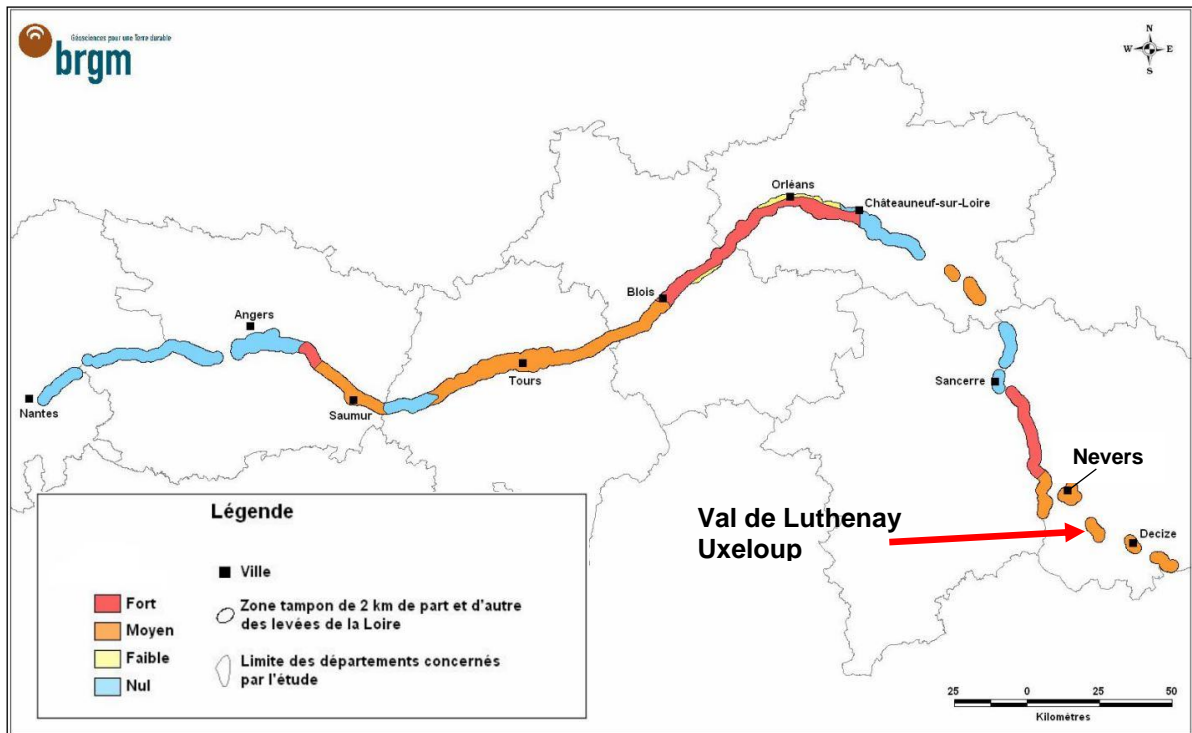


Figure 47 : sensibilité à l'aléa karstique des levées de la Loire (source BRGM)

## 6.8 SYNTHÈSE DE LA CARACTÉRISATION DES ALÉAS NATURELS

Aléa naturel / anthropique	Quantification du risque pour le système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup	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 Luthenay-Uxeloup 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 structurales, 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 Luthenay-Uxeloup

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 Luthenay-Uxeloup.

Il convient toutefois de signaler qu'une inondation par remous a débuté en aval du système d'endiguement (val ouvert).

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 48 : 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 49 : 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 de Saint-Martin-sur-Ocre situés en aval du Val de Luthenay-Uxeloup 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 50 : 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 Luthenay-Uxeloup

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 LUTHENAY

Compte tenu des données historiques disponibles, les caractéristiques des crues importantes connues sont répertoriées à l'échelle de Nevers et sont rappelées ci-après :

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

Tableau 7 : Crues historiques de la Loire à l'échelle de la Jonction à Nevers

Au niveau de l'échelle 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 endigué<sup>4</sup>) 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.

<sup>4</sup> 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 8 : Comparaison des niveaux atteints par les crues du 19<sup>ème</sup> siècle au droit des différents vals étudiés

## 7.3 ETUDE DES BRÈCHES HISTORIQUES

### 7.3.1 Brèches historiques dans le val de Luthenay

L'analyse des cartes anciennes et du MNT et l'analyse des documents fournis par la DDT58 ont permis d'identifier des brèches historiques qui se sont produites sur la levée de Luthenay

Crue	Référence	PK	Commune	Longueur retenue
1866 <sup>5</sup>	MNT/DDT58	3600	Uxeloup	320
1866 <sup>5</sup>	MNT/DDT58	4600	Uxeloup	150

Tableau 9 : Brèches historiques recensées sur le val de Luthenay

<sup>5</sup> Crue pas identifiée avec certitude mais un document fait état de brèches en 1866

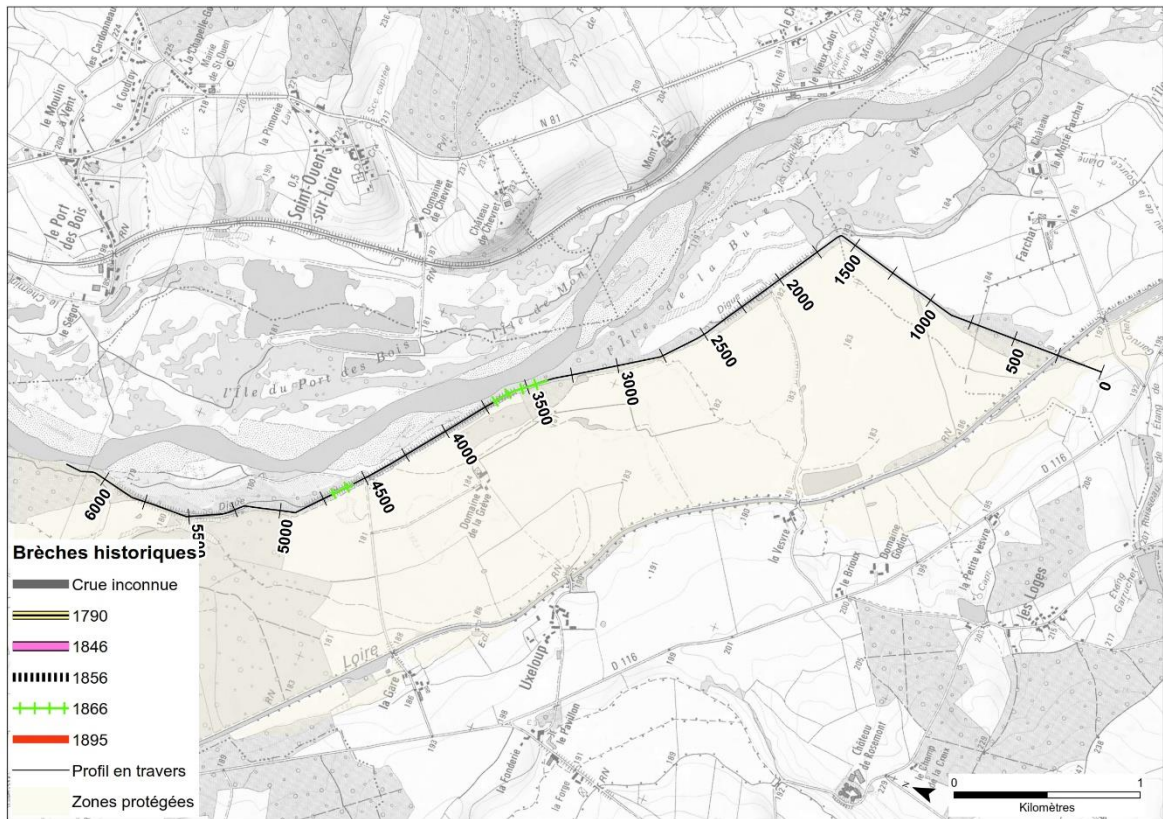


Figure 51 : localisation des brèches historiques inventoriées sur le val de Luthenay

### 7.3.2 Statistiques globales à l'échelle des 7 vals étudiés<sup>6</sup>

<b>Crue</b>	<b>Nombre de brèches</b>	<b>Linéaire cumulé</b>
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 10 : 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<sup>ème</sup> 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 banquette : 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.

<sup>6</sup> Vals de Digoin, 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 Luthenay-Uxeloup, ce retour d'expérience a été mis à profit dans le choix des principes de confortement proposés au chapitre 9.

## 7.4.2 Digues 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 boils<sup>7</sup> » 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) ;

<sup>7</sup> 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 52 : brèche de Pia sur l'Agly - crue du 6 mars 2013 - (photo : protection civile des Pyrénées-Orientales)



Figure 53 : Coupe d'un sand Boil derrière les digues de l'Agly - crue du 6 mars 2013 - (photo : DDT des Pyrénées-Orientales)

#### 7.4.4 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 Mississipi 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 11 : 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 et 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).

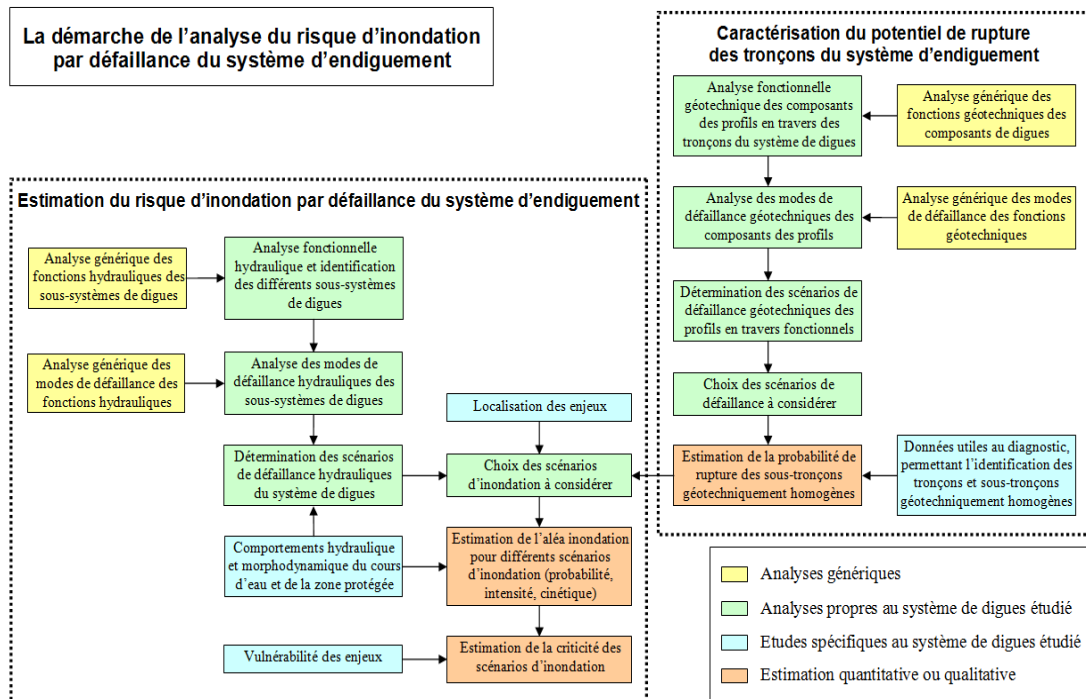


Figure 54 : Démarche de l'analyse du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement (diagramme IRSTEA)

### 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).

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 Luthenay-Uxeloup, 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 :

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

*Tableau 12 : 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 :

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

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

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.

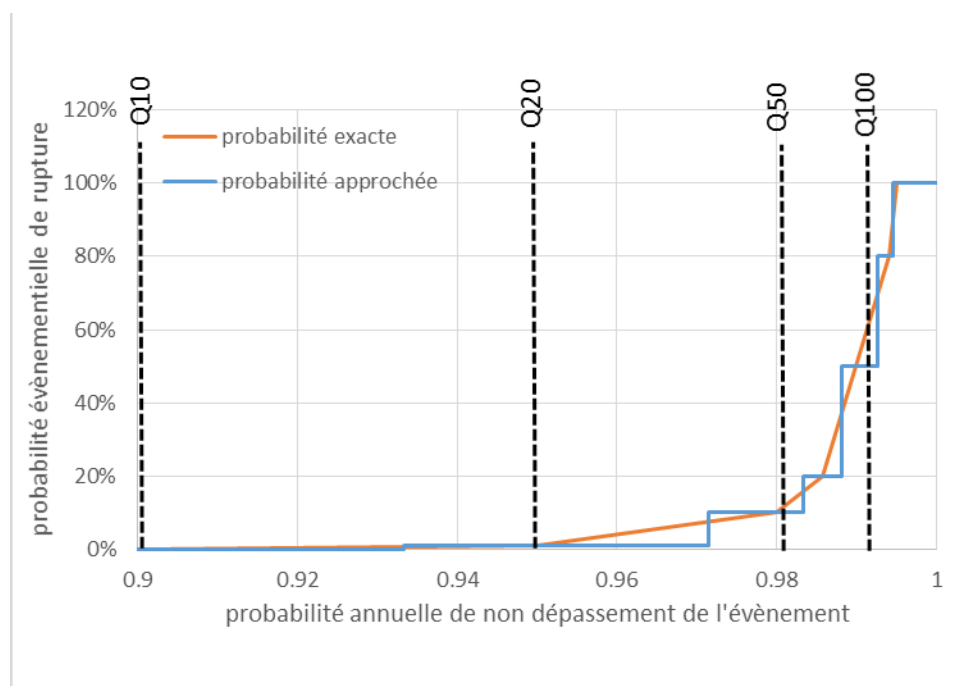


Figure 55 : Exemple de discrétisation de l'espace des évènements et du calcul de la probabilité annuelle d'un scénario de brèche

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

Tableau 13 : 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 Luthenay - Uxeloup, 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 Luthenay - Uxeloup 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 14 : 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 15 : 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
<b>5. Désastreux</b>	<b>Nbre &gt; 10 000</b>
<b>4. Catastrophique</b>	<b>1 000 &lt; Nbre ≤ 10 000</b>
<b>3. Important</b>	<b>100 &lt; Nbre ≤ 1 000</b>
<b>2. Sérieux</b>	<b>10 &lt; Nbre ≤ 100</b>
<b>1. Modéré</b>	<b>Nbre ≤ 10 personnes</b>

Tableau 16 : 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 intolérable			
	4. catastrophique	risque acceptable			risque intolérable			
	3. important	risque acceptable			risque préoccupant		risque intolérable	
	2. sérieux	risque acceptable			risque intolérable			
	1. modéré	risque acceptable			risque intolérable			

Tableau 17 : 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 119 profils en travers du système de protection, espacés tous les 50 mètres.

La digue domaniale de Luthenay-Uxeloup est découpée en deux tronçons homogènes (cf. VTA et chapitre 3).

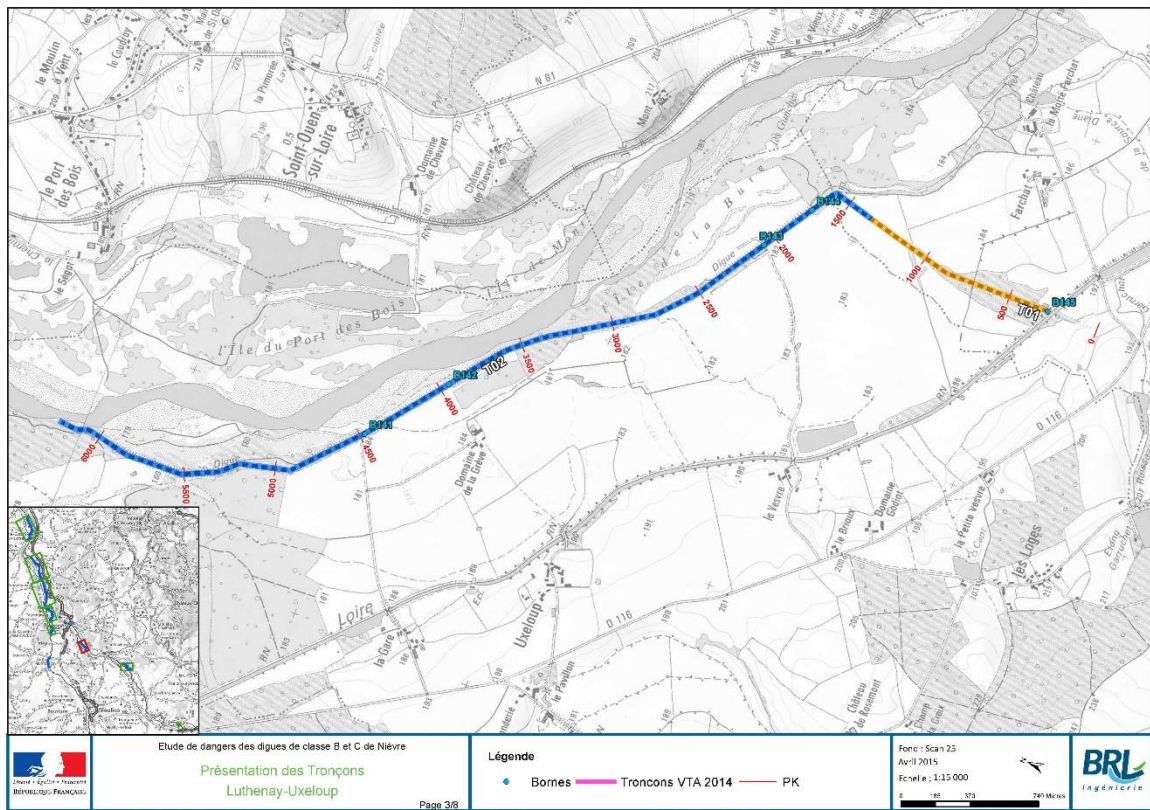


Figure 56 : carte de localisation des tronçons homogènes VTA (rappel)

### 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 CARDigüe), 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 Q170.

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	structure Type de Banquette côté Loire	Calculs des hauteurs de surverse Hs (=Z01 - Z4)				
				Q20	Q50	Q100	Q170	Q200
7	5_Luthenay_1_PK300	T1	SANS	-2.11	-1.90	-1.08	-0.95	-0.70
8	5_Luthenay_1_PK350	T1	SANS	-2.11	-1.90	-1.08	-0.95	-0.70
9	5_Luthenay_1_PK400	T1	SANS	-1.87	-1.66	-0.84	-0.71	-0.46
10	5_Luthenay_1_PK450	T1	SANS	-2.12	-1.91	-1.09	-0.96	-0.71
11	5_Luthenay_1_PK500	T1	SANS	-2.21	-1.99	-1.17	-1.05	-0.79
12	5_Luthenay_1_PK550	T1	SANS	-2.17	-1.96	-1.14	-1.01	-0.76
13	5_Luthenay_1_PK600	T1	SANS	-2.17	-1.96	-1.14	-1.02	-0.76
14	5_Luthenay_1_PK650	T1	SANS	-1.99	-1.77	-0.96	-0.83	-0.57
15	5_Luthenay_1_PK700	T1	SANS	-2.02	-1.80	-0.98	-0.86	-0.60
16	5_Luthenay_1_PK750	T1	SANS	-1.98	-1.77	-0.95	-0.82	-0.57
17	5_Luthenay_1_PK800	T1	SANS	-2.05	-1.84	-1.02	-0.89	-0.64
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	SANS	-1.87	-1.65	-0.83	-0.71	-0.45
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	SANS	-1.62	-1.41	-0.59	-0.46	-0.21
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	SANS	-1.56	-1.34	-0.53	-0.40	-0.14
21	5_Luthenay_1_PK1000	T1	SANS	-1.63	-1.41	-0.60	-0.47	-0.21
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	SANS	-1.70	-1.48	-0.67	-0.54	-0.28
23	5_Luthenay_1_PK1100	T1	SANS	-1.93	-1.71	-0.90	-0.77	-0.52
24	5_Luthenay_1_PK1150	T1	SANS	-2.32	-2.11	-1.29	-1.16	-0.91
25	5_Luthenay_1_PK1200	T1	SANS	-2.42	-2.21	-1.40	-1.27	-1.01
26	5_Luthenay_1_PK1250	T1	SANS	-2.33	-2.12	-1.31	-1.18	-0.92
27	5_Luthenay_1_PK1300	T1	SANS	-2.38	-2.17	-1.36	-1.23	-0.97
28	5_Luthenay_1_PK1350	T2	SANS	-1.97	-1.75	-0.94	-0.81	-0.56
29	5_Luthenay_1_PK1400	T2	SANS	-2.39	-2.18	-1.37	-1.24	-0.98
30	5_Luthenay_1_PK1450	T2	SANS	-2.44	-2.23	-1.42	-1.29	-1.03
31	5_Luthenay_1_PK1500	T2	SANS	-2.67	-2.46	-1.65	-1.52	-1.26
32	5_Luthenay_1_PK1550	T2	SANS	-2.64	-2.42	-1.61	-1.49	-1.23
33	5_Luthenay_1_PK1600	T2	SANS	-3.00	-2.79	-1.98	-1.85	-1.59
34	5_Luthenay_1_PK1650	T2	SANS	-3.67	-3.45	-2.65	-2.52	-2.26
35	5_Luthenay_1_PK1700	T2	SANS	-3.55	-3.34	-2.53	-2.40	-2.14
36	5_Luthenay_1_PK1750	T2	SANS	-3.10	-2.89	-2.08	-1.96	-1.70
37	5_Luthenay_1_PK1800	T2	SANS	-3.14	-2.92	-2.12	-1.99	-1.73
38	5_Luthenay_1_PK1850	T2	SANS	-2.75	-2.53	-1.73	-1.60	-1.34
39	5_Luthenay_1_PK1900	T2	SANS	-2.47	-2.25	-1.45	-1.32	-1.06
40	5_Luthenay_1_PK1950	T2	SANS	-2.53	-2.32	-1.52	-1.39	-1.13
41	5_Luthenay_1_PK2000	T2	SANS	-2.34	-2.13	-1.33	-1.20	-0.95
42	5_Luthenay_1_PK2050	T2	SANS	-2.24	-2.03	-1.23	-1.10	-0.84
43	5_Luthenay_1_PK2100	T2	SANS	-2.22	-2.01	-1.21	-1.08	-0.83
44	5_Luthenay_1_PK2150	T2	SANS	-2.24	-2.03	-1.23	-1.10	-0.85
45	5_Luthenay_1_PK2200	T2	SANS	-2.36	-2.15	-1.35	-1.22	-0.97
46	5_Luthenay_1_PK2250	T2	SANS	-2.43	-2.21	-1.42	-1.29	-1.04
47	5_Luthenay_1_PK2300	T2	SANS	-2.44	-2.22	-1.43	-1.30	-1.05
48	5_Luthenay_1_PK2350	T2	SANS	-2.22	-2.00	-1.20	-1.08	-0.82
49	5_Luthenay_1_PK2400	T2	SANS	-2.28	-2.06	-1.27	-1.14	-0.89
50	5_Luthenay_1_PK2450	T2	SANS	-2.56	-2.35	-1.55	-1.42	-1.17
51	5_Luthenay_1_PK2500	T2	SANS	-2.56	-2.34	-1.55	-1.42	-1.17
52	5_Luthenay_1_PK2550	T2	SANS	-2.24	-2.03	-1.23	-1.10	-0.85
53	5_Luthenay_1_PK2600	T2	SANS	-2.17	-1.95	-1.16	-1.03	-0.78
54	5_Luthenay_1_PK2650	T2	SANS	-2.30	-2.08	-1.28	-1.15	-0.90
55	5_Luthenay_1_PK2700	T2	SANS	-2.13	-1.91	-1.11	-0.99	-0.74
56	5_Luthenay_1_PK2750	T2	SANS	-2.36	-2.14	-1.34	-1.22	-0.97
57	5_Luthenay_1_PK2800	T2	SANS	-2.42	-2.19	-1.39	-1.27	-1.02
58	5_Luthenay_1_PK2850	T2	SANS	-2.34	-2.11	-1.31	-1.19	-0.94
59	5_Luthenay_1_PK2900	T2	SANS	-2.34	-2.11	-1.31	-1.19	-0.94
60	5_Luthenay_1_PK2950	T2	SANS	-2.20	-1.98	-1.18	-1.05	-0.80
61	5_Luthenay_1_PK3000	T2	SANS	-2.26	-2.04	-1.24	-1.11	-0.86
62	5_Luthenay_1_PK3050	T2	SANS	-2.37	-2.15	-1.35	-1.23	-0.98
63	5_Luthenay_1_PK3100	T2	SANS	-2.41	-2.19	-1.39	-1.27	-1.02

Profil	Abscisse sur le tronçon	Tronçon	structure	Calculs des hauteurs de surverse Hs (=Z <sub>0T</sub> - Z <sub>4</sub> )				
			Type de Banquette côté Loire	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200
64	5_Luthenay_1_PK3150	T2	SANS	-2.14	-1.93	-1.13	-1.01	-0.76
65	5_Luthenay_1_PK3200	T2	SANS	-2.22	-2.01	-1.21	-1.09	-0.84
66	5_Luthenay_1_PK3250	T2	SANS	-2.35	-2.13	-1.34	-1.21	-0.96
67	5_Luthenay_1_PK3300	T2	SANS	-2.37	-2.16	-1.36	-1.24	-0.99
68	5_Luthenay_1_PK3350	T2	SANS	-2.47	-2.26	-1.47	-1.35	-1.10
69	5_Luthenay_1_PK3400	T2	SANS	-2.44	-2.23	-1.44	-1.32	-1.07
70	5_Luthenay_1_PK3450	T2	SANS	-2.34	-2.13	-1.35	-1.22	-0.98
71	5_Luthenay_1_PK3500	T2	SANS	-2.36	-2.16	-1.37	-1.25	-1.00
72	5_Luthenay_1_PK3550	T2	SANS	-2.50	-2.30	-1.52	-1.40	-1.15
73	5_Luthenay_1_PK3600	T2	SANS	-2.57	-2.36	-1.59	-1.47	-1.22
74	5_Luthenay_1_PK3650	T2	SANS	-2.36	-2.16	-1.39	-1.27	-1.02
75	5_Luthenay_1_PK3700	T2	SANS	-2.46	-2.26	-1.49	-1.38	-1.13
76	5_Luthenay_1_PK3750	T2	SANS	-2.23	-2.04	-1.28	-1.16	-0.92
77	5_Luthenay_1_PK3800	T2	SANS	-2.45	-2.25	-1.50	-1.38	-1.14
78	5_Luthenay_1_PK3850	T2	SANS	-2.28	-2.09	-1.35	-1.23	-1.00
79	5_Luthenay_1_PK3900	T2	SANS	-2.12	-1.94	-1.20	-1.09	-0.85
80	5_Luthenay_1_PK3950	T2	SANS	-2.28	-2.09	-1.37	-1.26	-1.03
81	5_Luthenay_1_PK4000	T2	SANS	-2.38	-2.20	-1.49	-1.37	-1.14
82	5_Luthenay_1_PK4050	T2	SANS	-2.41	-2.22	-1.52	-1.41	-1.18
83	5_Luthenay_1_PK4100	T2	SANS	-2.43	-2.25	-1.55	-1.44	-1.21
84	5_Luthenay_1_PK4150	T2	SANS	-2.32	-2.15	-1.46	-1.35	-1.12
85	5_Luthenay_1_PK4200	T2	SANS	-2.15	-1.98	-1.30	-1.19	-0.96
86	5_Luthenay_1_PK4250	T2	SANS	-2.29	-2.11	-1.43	-1.33	-1.11
87	5_Luthenay_1_PK4300	T2	SANS	-2.27	-2.10	-1.43	-1.32	-1.10
88	5_Luthenay_1_PK4350	T2	SANS	-2.15	-1.99	-1.32	-1.21	-0.99
89	5_Luthenay_1_PK4400	T2	SANS	-2.45	-2.29	-1.62	-1.52	-1.30
90	5_Luthenay_1_PK4450	T2	SANS	-2.49	-2.33	-1.67	-1.56	-1.35
91	5_Luthenay_1_PK4500	T2	SANS	-2.66	-2.49	-1.84	-1.74	-1.52
92	5_Luthenay_1_PK4550	T2	SANS	-2.72	-2.56	-1.91	-1.81	-1.59
93	5_Luthenay_1_PK4600	T2	SANS	-2.51	-2.35	-1.71	-1.60	-1.39
94	5_Luthenay_1_PK4650	T2	SANS	-2.35	-2.19	-1.54	-1.44	-1.22
95	5_Luthenay_1_PK4700	T2	SANS	-2.45	-2.29	-1.65	-1.55	-1.33
96	5_Luthenay_1_PK4750	T2	SANS	-2.44	-2.28	-1.65	-1.54	-1.33
97	5_Luthenay_1_PK4800	T2	SANS	-2.45	-2.29	-1.66	-1.55	-1.34
98	5_Luthenay_1_PK4850	T2	SANS	-2.39	-2.23	-1.60	-1.49	-1.28
99	5_Luthenay_1_PK4900	T2	SANS	-2.18	-2.02	-1.38	-1.28	-1.06
100	5_Luthenay_1_PK4950	T2	SANS	-2.23	-2.07	-1.43	-1.33	-1.12
101	5_Luthenay_1_PK5000	T2	SANS	-2.27	-2.12	-1.48	-1.38	-1.16
102	5_Luthenay_1_PK5050	T2	SANS	-2.10	-1.94	-1.30	-1.20	-0.99
103	5_Luthenay_1_PK5100	T2	SANS	-2.11	-1.95	-1.32	-1.21	-1.00
104	5_Luthenay_1_PK5150	T2	SANS	-1.98	-1.82	-1.19	-1.08	-0.87
105	5_Luthenay_1_PK5200	T2	SANS	-1.90	-1.74	-1.11	-1.00	-0.79
106	5_Luthenay_1_PK5250	T2	SANS	-2.17	-2.01	-1.37	-1.27	-1.06
107	5_Luthenay_1_PK5300	T2	SANS	-1.98	-1.82	-1.19	-1.09	-0.87
108	5_Luthenay_1_PK5350	T2	SANS	-2.06	-1.90	-1.26	-1.16	-0.95
109	5_Luthenay_1_PK5400	T2	SANS	-2.15	-1.99	-1.35	-1.25	-1.04
110	5_Luthenay_1_PK5450	T2	SANS	-2.16	-2.00	-1.37	-1.27	-1.05
111	5_Luthenay_1_PK5500	T2	SANS	-2.10	-1.94	-1.31	-1.20	-0.99
112	5_Luthenay_1_PK5550	T2	SANS	-2.11	-1.96	-1.33	-1.22	-1.01
113	5_Luthenay_1_PK5600	T2	SANS	-2.11	-1.95	-1.32	-1.22	-1.01
114	5_Luthenay_1_PK5650	T2	SANS	-2.33	-2.17	-1.55	-1.44	-1.23
115	5_Luthenay_1_PK5700	T2	SANS	-2.25	-2.09	-1.47	-1.37	-1.16
116	5_Luthenay_1_PK5750	T2	SANS	-2.17	-2.02	-1.39	-1.29	-1.08
117	5_Luthenay_1_PK5800	T2	SANS	-2.10	-1.95	-1.33	-1.23	-1.02
118	5_Luthenay_1_PK5850	T2	SANS	-1.97	-1.82	-1.20	-1.10	-0.89
119	5_Luthenay_1_PK5900	T2	SANS	-1.99	-1.83	-1.22	-1.12	-0.91
120	5_Luthenay_1_PK5950	T2	SANS	-2.19	-2.04	-1.43	-1.33	-1.12
121	5_Luthenay_1_PK6000	T2	SANS	-2.18	-2.03	-1.42	-1.32	-1.11
122	5_Luthenay_1_PK6050	T2	SANS	-2.20	-2.05	-1.44	-1.34	-1.14
123	5_Luthenay_1_PK6100	T2	SANS	-2.13	-1.98	-1.38	-1.28	-1.08
124	5_Luthenay_1_PK6150	T2	SANS	-2.01	-1.86	-1.26	-1.16	-0.96
125	5_Luthenay_1_PK6200	T2	SANS	-1.98	-1.83	-1.23	-1.13	-0.93

Tableau 18 : Hauteur de surverse (+) ou de revanche (-) au droit de la digue (m)



**Probabilité de rupture :**

Le risque de rupture par surverse est très improbable. Seuls les profils ci-dessous font apparaître une probabilité annuelle de rupture supérieure à 0.01%.

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	$\Sigma$
9	5_Luthenay_1_PK400	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.4%	0.01%
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.0%	0.02%
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.9%	6.5%	0.04%
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.0%	8.0%	0.05%
21	5_Luthenay_1_PK1000	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.4%	4.0%	0.03%
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.0%	0.02%

Tableau 19 : Probabilité de rupture des profils en travers soumis à la surverse ( $\Sigma > 0,01\%$ )

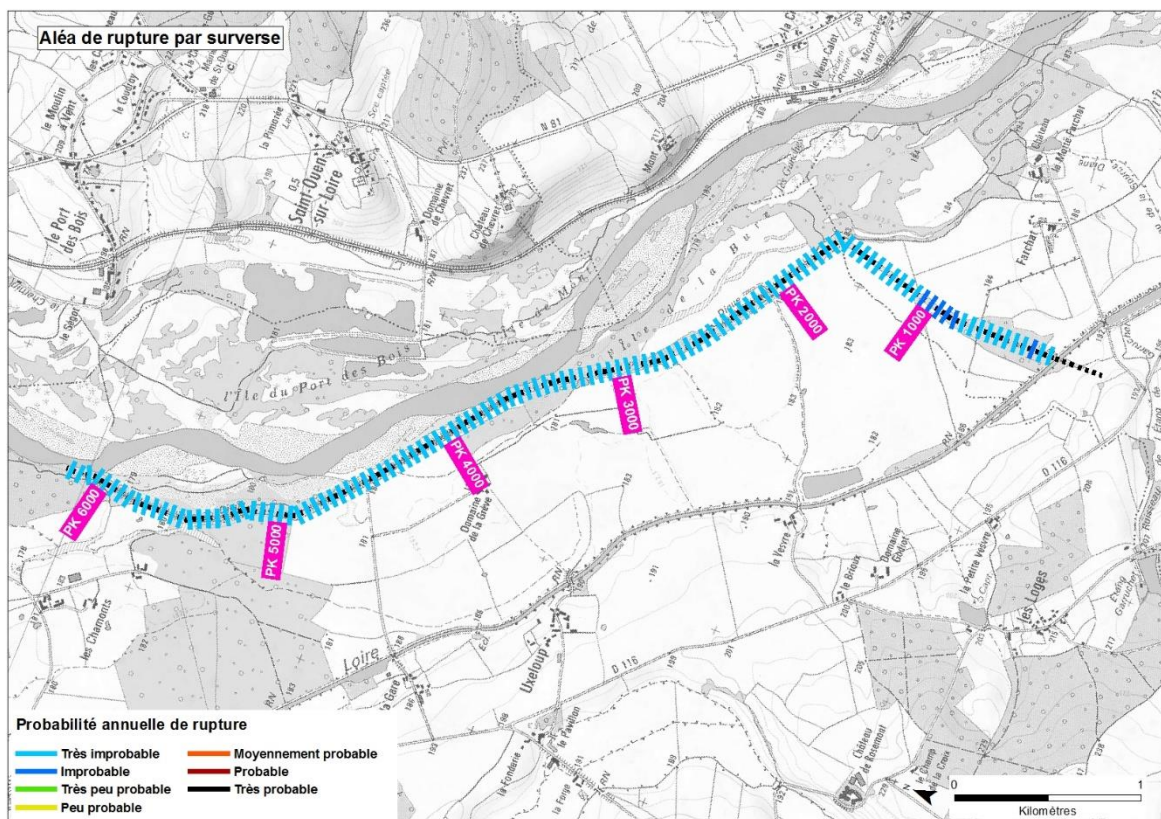
**Carte de synthèse :**

Figure 57 : 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 $c=L/\Delta H$			
Intervalles du critère de Bligh			Proba
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 20 : 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 les 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 forte et peuvent atteindre 1.35%.

Ceci est cohérent avec d'une part les caractéristiques géométriques de l'ouvrage et notamment quelques abaissements localisés du TN côté val et d'autre part, la présence de végétation ligneuse, parfois des deux côtés de l'ouvrage, et l'identification ponctuelle de terriers.

Identification du Profil			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	$\Sigma$
17	5_Luthenay_1_PK800	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	50.0%	80.0%	95.0%	0.97%
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	2.0%	20.0%	0.12%
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	50.0%	80.0%	99.0%	0.99%
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	50.0%	80.0%	0.65%
21	5_Luthenay_1_PK1000	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	20.0%	80.0%	0.59%
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	50.0%	80.0%	0.65%
23	5_Luthenay_1_PK1100	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.0%	20.0%	0.11%
25	5_Luthenay_1_PK1200	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	2.0%	20.0%	0.12%
28	5_Luthenay_1_PK1350	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	50.0%	0.27%
44	5_Luthenay_1_PK2150	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.0%	95.0%	99.0%	1.29%
52	5_Luthenay_1_PK2550	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	20.0%	20.0%	0.21%
53	5_Luthenay_1_PK2600	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	20.0%	20.0%	50.0%	0.43%
54	5_Luthenay_1_PK2650	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	20.0%	50.0%	50.0%	0.49%
62	5_Luthenay_1_PK3050	T2	0.0%	0.0%	0.1%	1.0%	10.0%	80.0%	80.0%	95.0%	1.35%

Tableau 21 : 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 encastrée	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
17	5_Luthenay_1_PK800	T1	2.05	0.41			VLG2		H	DECAP	
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	1.57	0.50			VLG2				
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	1.61	0.41			VLG2		M	DECAP	DEP
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	1.69	0.43			VLG2				
21	5_Luthenay_1_PK1000	T1	2.01	0.39			VLG2				
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	2.20	0.36			VLG2				
23	5_Luthenay_1_PK1100	T1	1.68	0.43			VLG2				
25	5_Luthenay_1_PK1200	T1	2.73	0.37			VLG2				
28	5_Luthenay_1_PK1350	T2	1.93	0.47			VLG2		H	OBSV	
44	5_Luthenay_1_PK2150	T2	2.90	0.35			VLG1		H	DECAP+OBSV	D20
52	5_Luthenay_1_PK2550	T2	3.55	0.42			VLG1			OBSV	
53	5_Luthenay_1_PK2600	T2	3.39	0.46			VLG1			OBSV	
54	5_Luthenay_1_PK2650	T2	3.60	0.48			VLG1			OBSV	
62	5_Luthenay_1_PK3050	T2	4.25	0.32			VLG1		M	DECAP+OBSV	D20

Tableau 22 : Caractéristiques, désordres et anomalies des profils en travers soumis à l'érosion interne ( $\Sigma > 0,10\%$ )

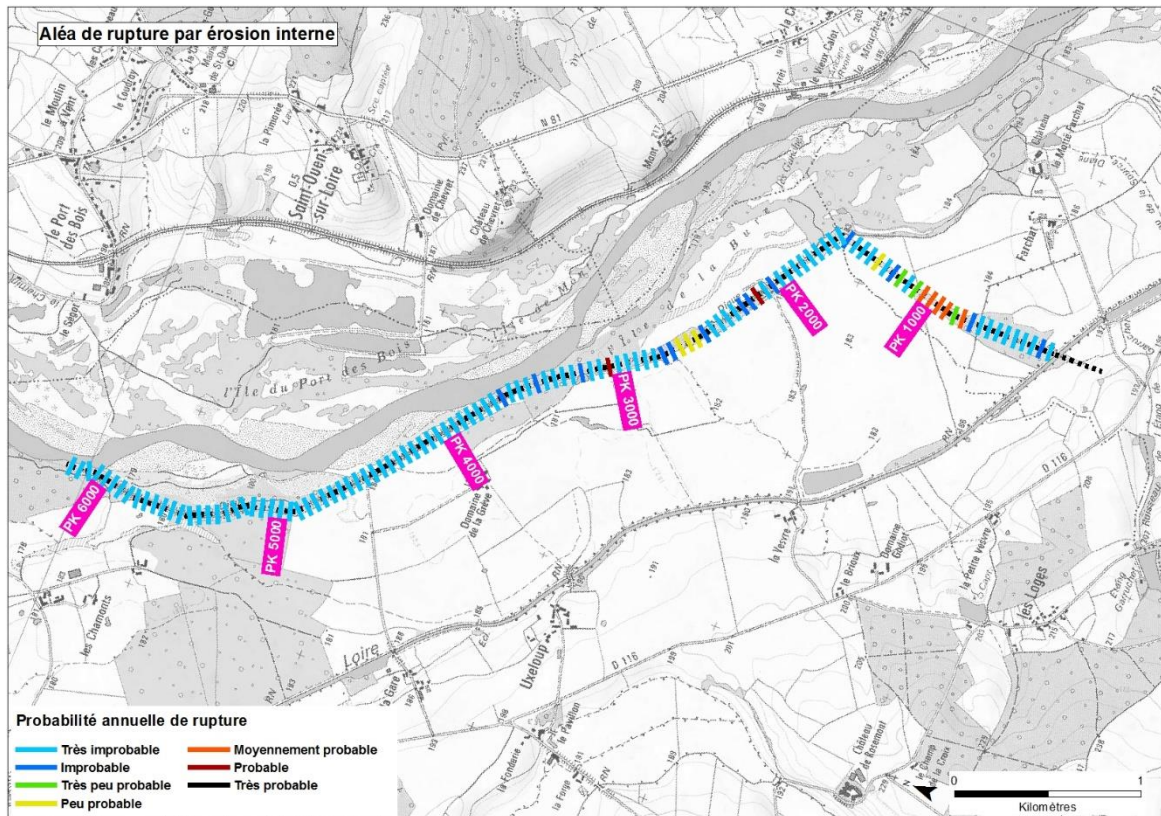
**Carte de synthèse :**

Figure 58 : 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 :

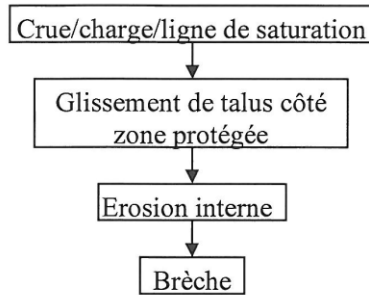
- d'une déstabilisation d'ensemble, lorsque la digue n'est pas capable de résister mécaniquement à la charge de l'eau, ce qui peut se traduire par un glissement sur sa fondation ou un basculement de l'ouvrage, situation qui se rencontre souvent au niveau des ouvrages de rehausse telles que les parapets 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 saturé, 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 :

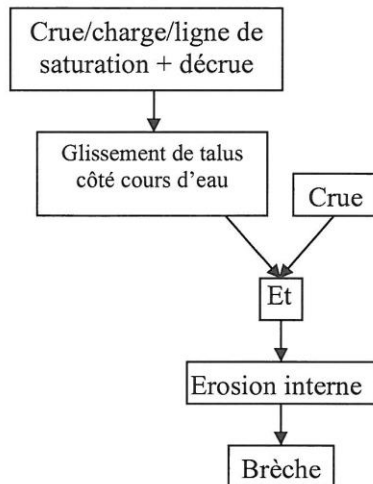
Fonctions	Composants
Étanchéité	Renforcement amont
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil 1 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Figure 59 : 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 60 : 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 globalement très improbable et localement peu probable. Les probabilités de rupture annuelle par glissement côté val, calculées par le modèle, peuvent atteindre 0.43%.

Identification du Profil			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	$\Sigma$
17	5_Luthenay_1_PK800	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.8%	10.0%	10.0%	0.13%
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	2.2%	26.4%	0.15%
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.13%
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.5%	8.8%	10.0%	0.10%
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.8%	8.8%	10.0%	0.12%
44	5_Luthenay_1_PK2150	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%	10.0%	0.13%
51	5_Luthenay_1_PK2500	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.6%	6.6%	16.5%	0.14%
52	5_Luthenay_1_PK2550	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	16.5%	16.5%	26.4%	0.28%
53	5_Luthenay_1_PK2600	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	26.4%	26.4%	30.0%	0.38%
54	5_Luthenay_1_PK2650	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.7%	26.4%	26.4%	30.0%	0.39%
55	5_Luthenay_1_PK2700	T2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.3%	6.6%	16.5%	0.12%
62	5_Luthenay_1_PK3050	T2	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	2.2%	26.4%	30.0%	30.0%	0.43%

Tableau 23 : 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 TN 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	Pente (°) Côte Val	Profil Type
17	5_Luthenay_1_PK800	T1	2.05	0.41	22.16	F1
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	1.57	0.50	26.60	F1
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	1.61	0.41	22.09	F1
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	1.69	0.43	23.07	F1
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	2.20	0.36	19.85	F1
44	5_Luthenay_1_PK2150	T2	2.90	0.35	19.06	F1
51	5_Luthenay_1_PK2500	T2	3.34	0.48	25.56	F1
52	5_Luthenay_1_PK2550	T2	3.55	0.42	22.65	F1
53	5_Luthenay_1_PK2600	T2	3.39	0.46	24.78	F1
54	5_Luthenay_1_PK2650	T2	3.60	0.48	25.53	F1
55	5_Luthenay_1_PK2700	T2	2.82	0.44	23.59	F1
62	5_Luthenay_1_PK3050	T2	4.25	0.32	17.59	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 :**

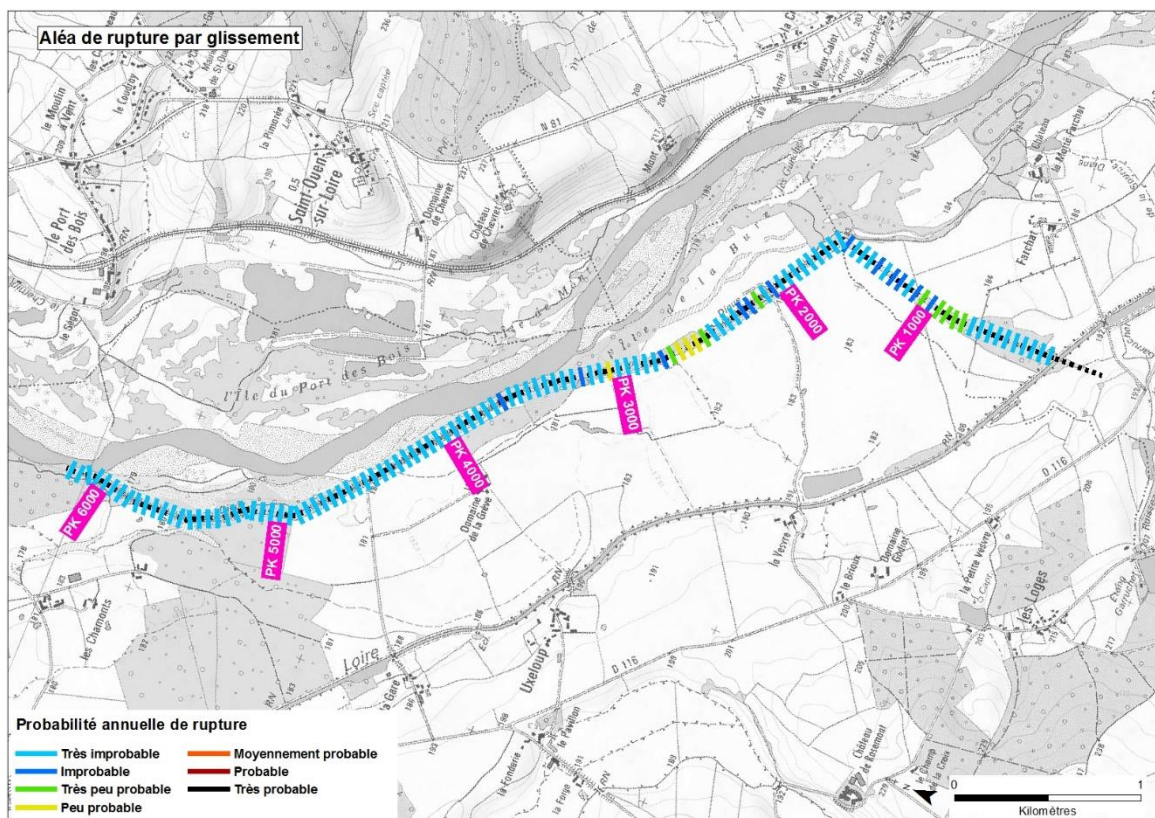


Figure 61 : Carte de Probabilité annuelle de rupture par glissement



### 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.

Le risque de rupture par érosion externe est très improbable sur l'ensemble des tronçons. Ceci est en cohérence avec les largeurs de franc-bord importantes.

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).

## 8.2.2 Rupture de la levée de Luthenay-Uxeloup 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.

À partir de la crue vicennale, le niveau de sûreté est dépassé au droit du profil PK3050. Le franchissement du seuil s'explique du fait de la présence d'un terrier de gros diamètre et qui engendre un risque non négligeable de rupture par érosion interne pour ce niveau de crue.

**Le niveau de sûreté du val de Luthenay-Uxeloup est atteint entre Q10 et Q20, soit une hauteur à l'échelle de référence de Decize comprise entre 5.07 et 5.23 m et un débit compris entre 1950 et 2200 m<sup>3</sup>/s.**

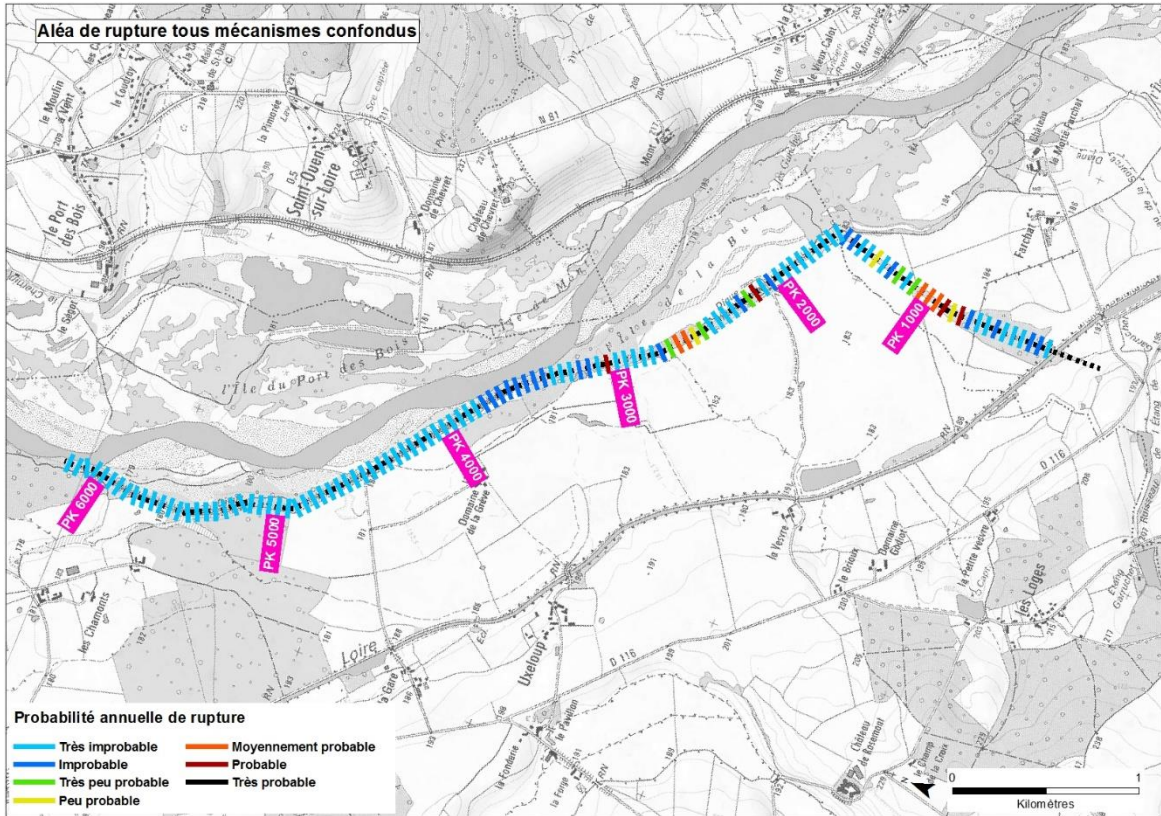


Figure 62 : Carte des probabilités annuelles de rupture tous modes confondus, en l'absence de surveillance

Identification du Profil			Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement hydraulique	Aléa global :							Probabilité annuelle	
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ OrigineVal)	Tronçon	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Probabilité de Rupture tous modes confondus							Σ	
			Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170		Q200
17	5_Luthenay_1_PK800	T1	0.00%	0.97%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	54.4%	82.0%	95.5%	1.00%
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	0.02%	0.12%	0.15%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%	4.2%	42.9%	0.25%
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	0.04%	0.99%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	55.0%	82.7%	99.2%	1.03%
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	0.05%	0.65%	0.10%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24.4%	56.2%	83.4%	0.71%
21	5_Luthenay_1_PK1000	T1	0.03%	0.59%	0.07%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.4%	28.8%	82.7%	0.63%
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	0.02%	0.65%	0.12%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	27.0%	54.4%	82.7%	0.72%
23	5_Luthenay_1_PK1100	T1	0.00%	0.11%	0.03%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	2.1%	24.4%	0.14%
25	5_Luthenay_1_PK1200	T1	0.00%	0.12%	0.03%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	2.2%	24.4%	0.14%
28	5_Luthenay_1_PK1350	T2	0.00%	0.27%	0.05%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	54.4%	0.29%
44	5_Luthenay_1_PK2150	T2	0.00%	1.29%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.5%	95.5%	99.1%	1.29%
45	5_Luthenay_1_PK2200	T2	0.00%	0.06%	0.10%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%	4.3%	24.9%	0.15%
51	5_Luthenay_1_PK2500	T2	0.00%	0.06%	0.14%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.5%	8.5%	24.9%	0.20%
52	5_Luthenay_1_PK2550	T2	0.00%	0.21%	0.28%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	24.9%	33.2%	41.1%	0.44%
53	5_Luthenay_1_PK2600	T2	0.00%	0.43%	0.38%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	41.1%	41.1%	65.0%	0.68%
54	5_Luthenay_1_PK2650	T2	0.00%	0.49%	0.39%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.8%	41.1%	63.2%	65.0%	0.74%
55	5_Luthenay_1_PK2700	T2	0.00%	0.07%	0.12%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	8.5%	24.9%	0.18%
62	5_Luthenay_1_PK3050	T2	0.00%	1.35%	0.43%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.2%	1.2%	12.0%	85.3%	86.0%	96.5%	1.45%

Tableau 24 : Probabilités de rupture annuelle tous modes confondus des différents profils élémentaires ( $\Sigma > 0,10\%$ )



### 8.2.3 Hypothèses de surveillance

Dans le cadre des modélisations présentées ci-dessus, il n'a pas été retenu de surveillance de l'ouvrage : ASONA (absence de surveillance et/ou organisation non adaptée).

Or, comme l'on peut le constater dans le tableau suivant reprenant les hypothèses formulées par la DREAL Centre-Val de Loire sur ce sujet, les actions du gestionnaires joueraient un rôle non négligeable dans l'évaluation du risque d'apparition de la rupture par érosion interne, une fois celle-ci établie.

Action du gestionnaire	Code	coef
Absence de surveillance et/ou organisation non adaptée	ASONA	1
Surveillance mais organisation non adaptée	SONA	0.9
Surveillance et Organisation Adaptée	SOA	0.5
Surveillance et Organisation Adaptée et Renforcée	SOAR	0.1

Or compte tenu des probables problématiques d'accès et circulation et de la nécessité lorsque le niveau de sureté est atteint et/ou dépassé de mettre en sécurité le personnel du gestionnaire, il peut exister une incertitude sur la capacité à mettre réellement en place le dispositif de surveillance optimale.

## 8.3 ESTIMATION DU RISQUE D'INONDATION PAR DÉFAILLANCE DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE LUTHENAY

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)
LUT_1	brèche en amont du val	Q200	érosion interne	0.28%	1000	200
LUT_2	brèche en amont Domaine de la Grève	Q100	érosion interne	0.85%	3050	150

Tableau 25 : Tableau de synthèse des scénarios de brèches retenus

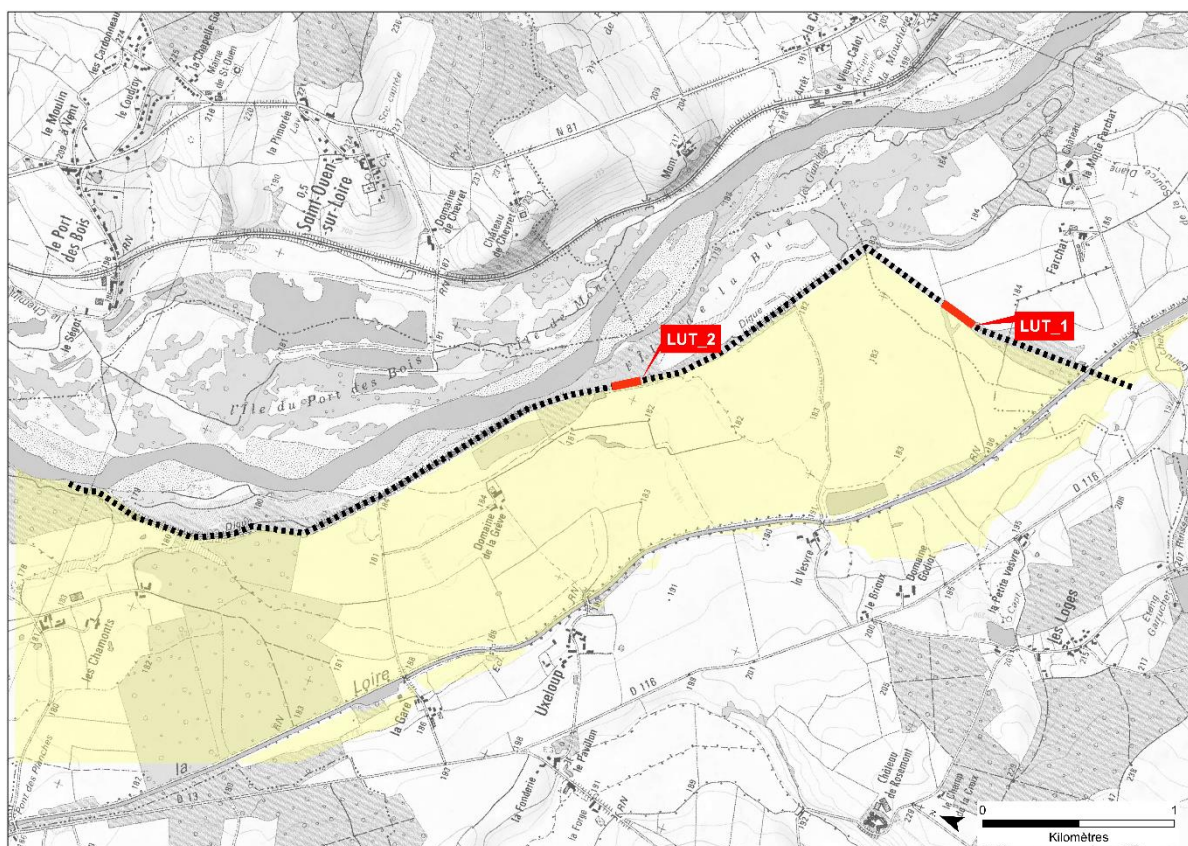


Figure 63 : Carte de localisation des scénarios retenus

### 8.3.1.1 Scénario n°1 : brèche en amont du val (T=200 ans)

Ce scénario peut être qualifié de « peu probable ».

La probabilité de rupture en amont de la levée est due à un risque d'érosion interne à partir de l'atteinte du niveau de la crue centennale. Le lieu de brèche se situe sur un tronçon perpendiculaire à l'axe d'écoulement de la Loire. La fragilité de la levée est liée à la présence d'un fossé côté val et d'une végétation ligneuse généralisée sur l'ensemble de la digue, y compris en crête. A noter que ce linéaire constitue également un point bas du système d'endiguement.



### 8.3.1.2 Scénario n°2 : brèche en amont du domaine de la Grève (T=100 ans)

Ce scénario peut être qualifié de « moyennement probable ».

Le scénario considère la formation d'une brèche par érosion interne à l'atteinte du niveau maximal de la crue centennale. Il se justifie par la présence d'un terrier traversant de gros diamètre en milieu de talus et d'une végétation ligneuse généralisée sur les deux talus. En outre, le scénario est motivé par la proximité du domaine de la Grève.

### 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 Luthenay qui seront utilisés dans les paragraphes suivants pour décrire l'intensité et la cinétique des scénarios, notamment l'évolution temporelle des niveaux d'eau.

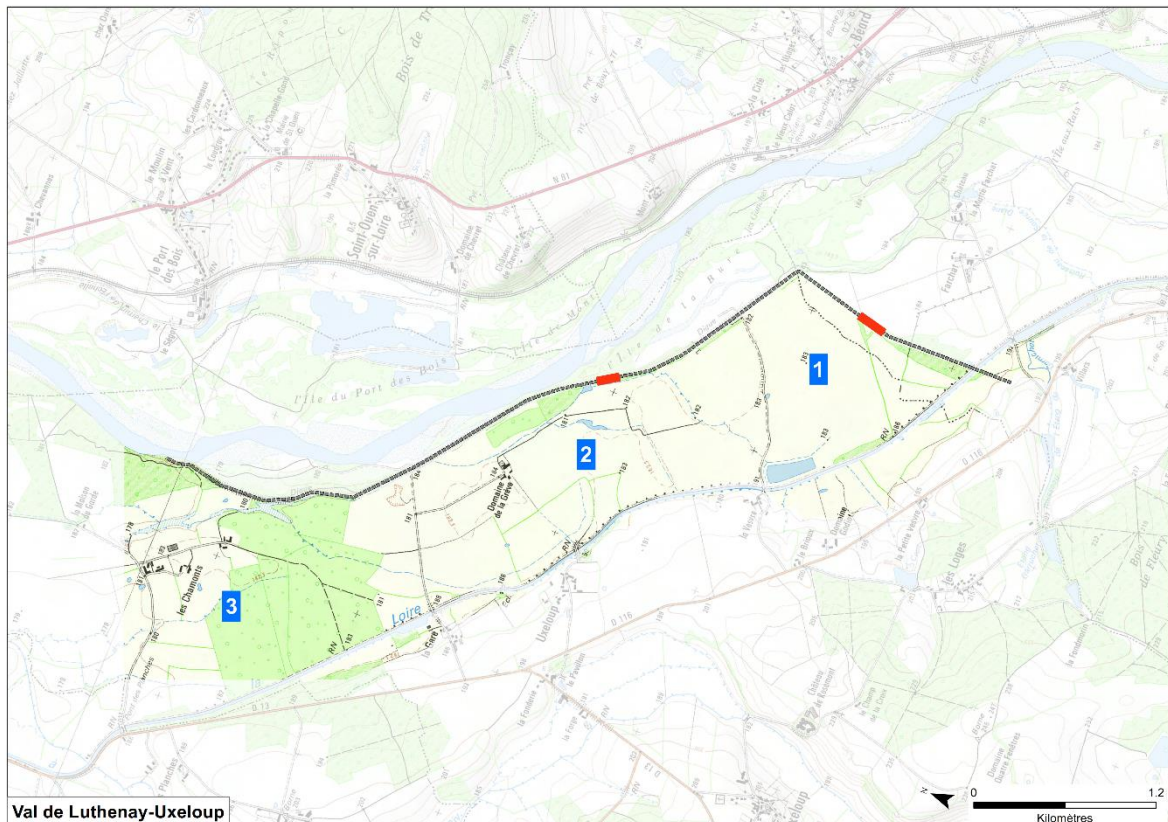


Figure 64 : Carte de localisation des points de référence du val de Luthenay

### 8.3.2.1 Scénario n°1 : brèche en amont du val (T=200 ans)

#### 8.3.2.1.1 Hypothèses

La simulation correspond à une rupture en amont du val de Luthenay sur le linéaire de digue transversal à l'axe d'écoulement de la Loire. La brèche a une largeur de 200 m et s'ouvre en 3 heures. La brèche est supposée s'initier à compter de l'atteinte de Q100. La charge hydraulique au moment de la rupture est de 1 m.

Comme le montre la Figure 65 ci-après, le débit maximal entrant dans le val est de 450 m<sup>3</sup>/s. Le volume entrant dans le val est de 81 Hm<sup>3</sup>. L'hydrogramme de La Loire correspond à une crue type Q200.

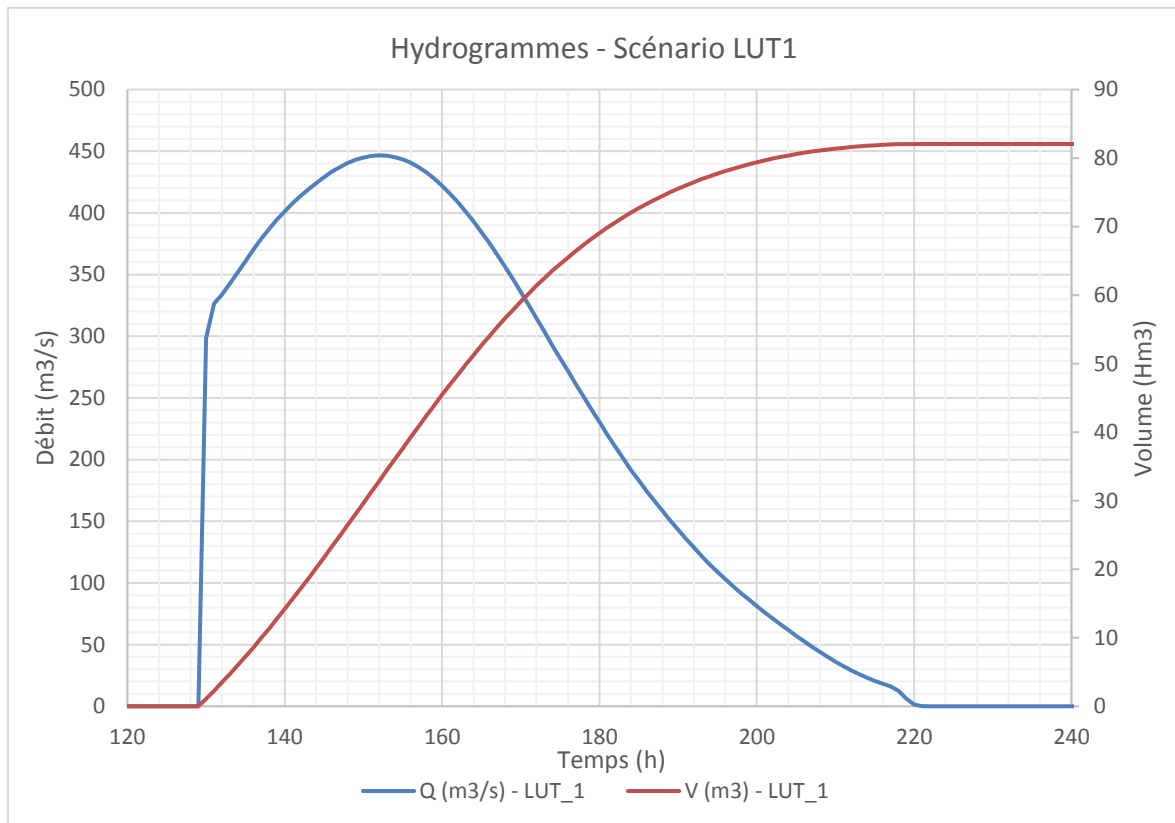


Figure 65 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche - Scénario 1

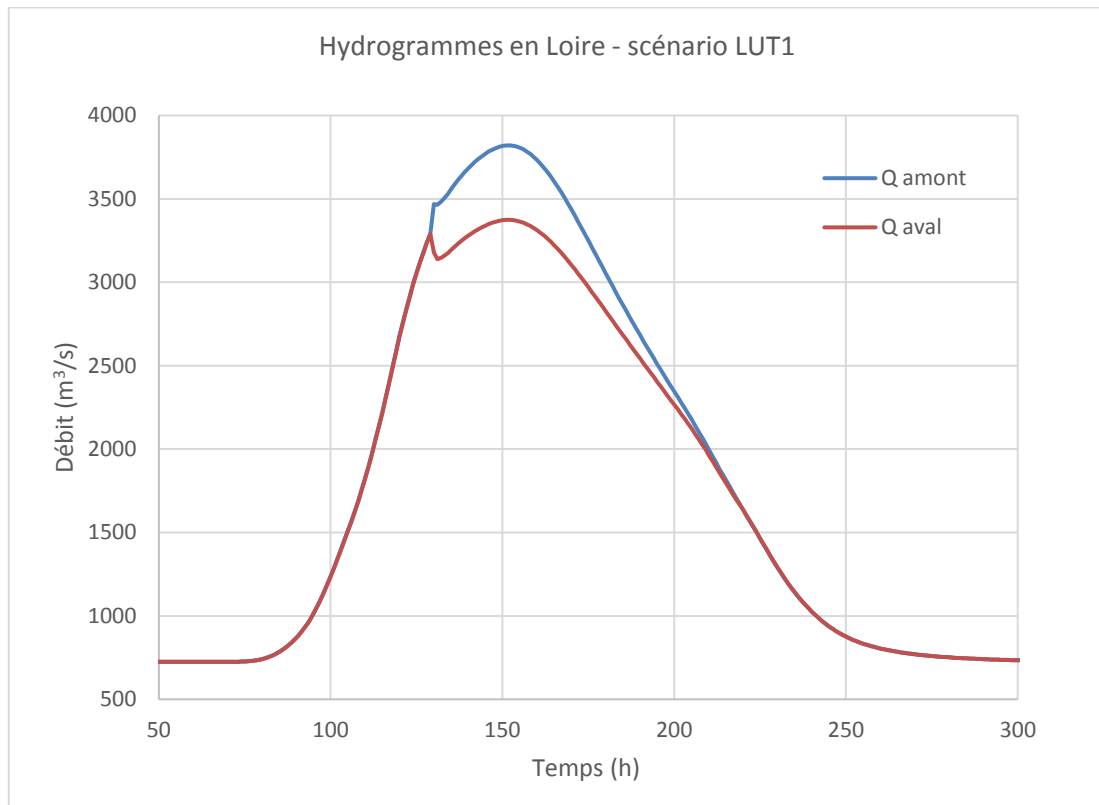


Figure 66 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche - Scénario 1

L'hydrogramme de rupture a une forme classique. Le débit augmente rapidement durant l'ouverture de la brèche. Le val se remplit et un écoulement parallèle s'établit dans le val ouvert en sortie. Le débit augmente progressivement en suivant l'évolution du niveau en Loire.

### 8.3.2.1.2 Résultats

#### Hauteurs d'eau maximales et zone inondée :

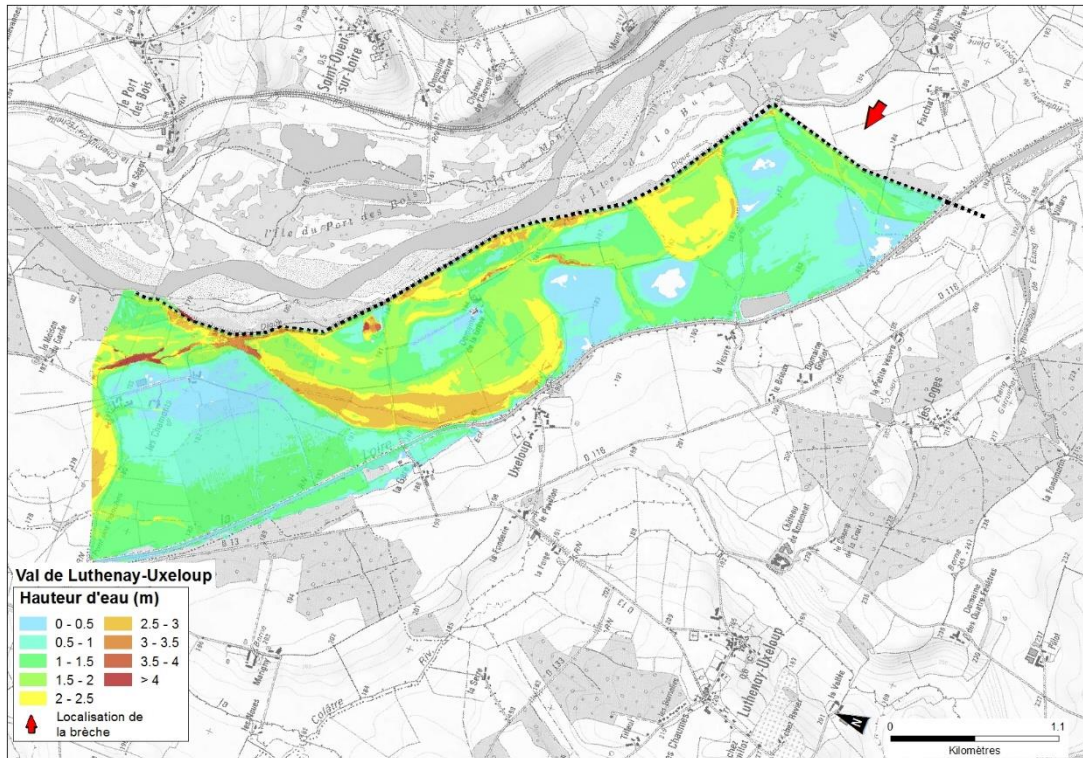


Figure 67 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario 1

#### 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 64 ci-avant). Il permet de visualiser la cinétique de propagation et de montée des eaux.

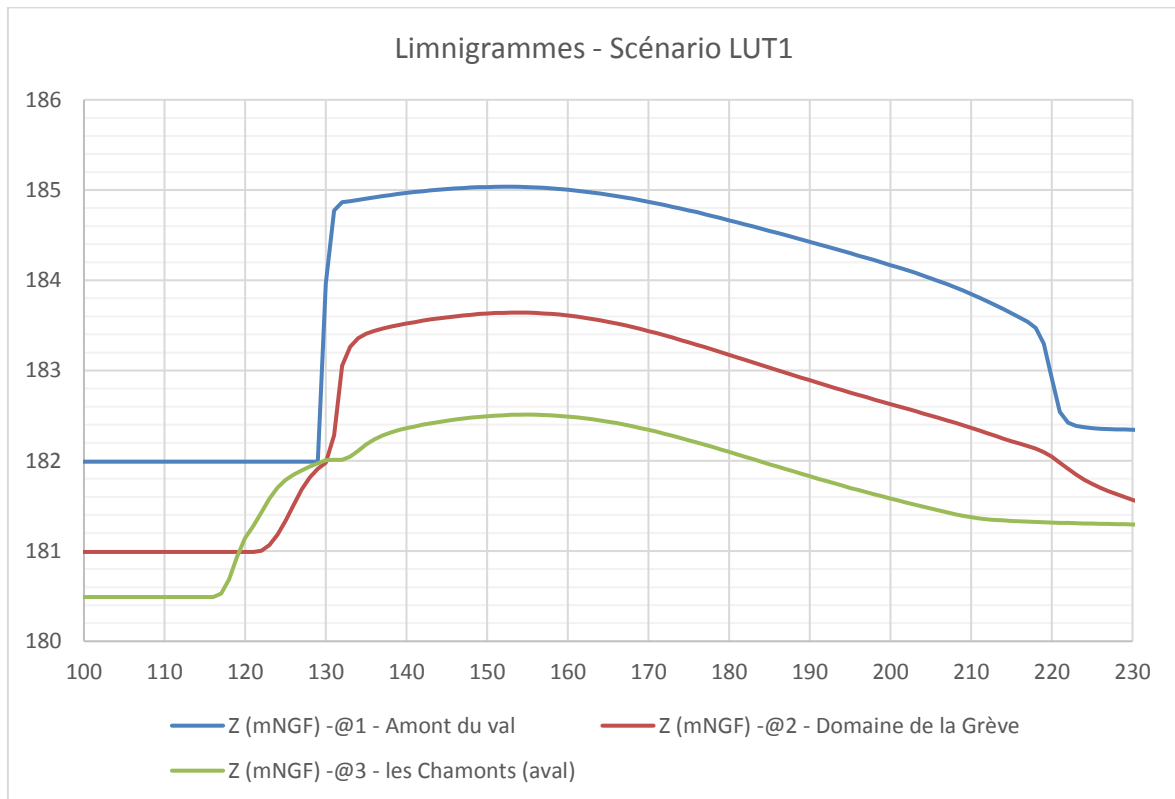


Figure 68 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Luthenay - Scénario 1

Les limnigrammes 2 et 3 permettent de voir l'établissement du remous avant le déclenchement de la brèche à la cote de 182 mNGF. Après déclenchement, la montée des eaux est très rapide : en moins d'une heure le niveau augmente de 3m en amont du val (Point 1). La propagation dans le val est rapide : l'onde de rupture atteint le domaine de Grève en environ 1h et les Chamonts en 4h.

### 8.3.2.2 Scénario n°2: brèche en amont Domaine de la Grève (T=100 ans)

#### 8.3.2.2.1 Hypothèses

La simulation correspond à une rupture en amont du domaine de la Grève. La largeur de la brèche est de 150 m. La brèche est supposée s'initier à compter de l'atteinte de Q100 et se forme en 3 heures. La charge hydraulique au moment de la rupture est de 2,9 m.

Comme le montre la Figure 69 ci-après, le débit maximal entrant dans le val est de 480 m<sup>3</sup>/s. Le volume entrant dans le val est de 62 Hm<sup>3</sup>. L'hydrogramme de La Loire correspond à une crue type Q100.

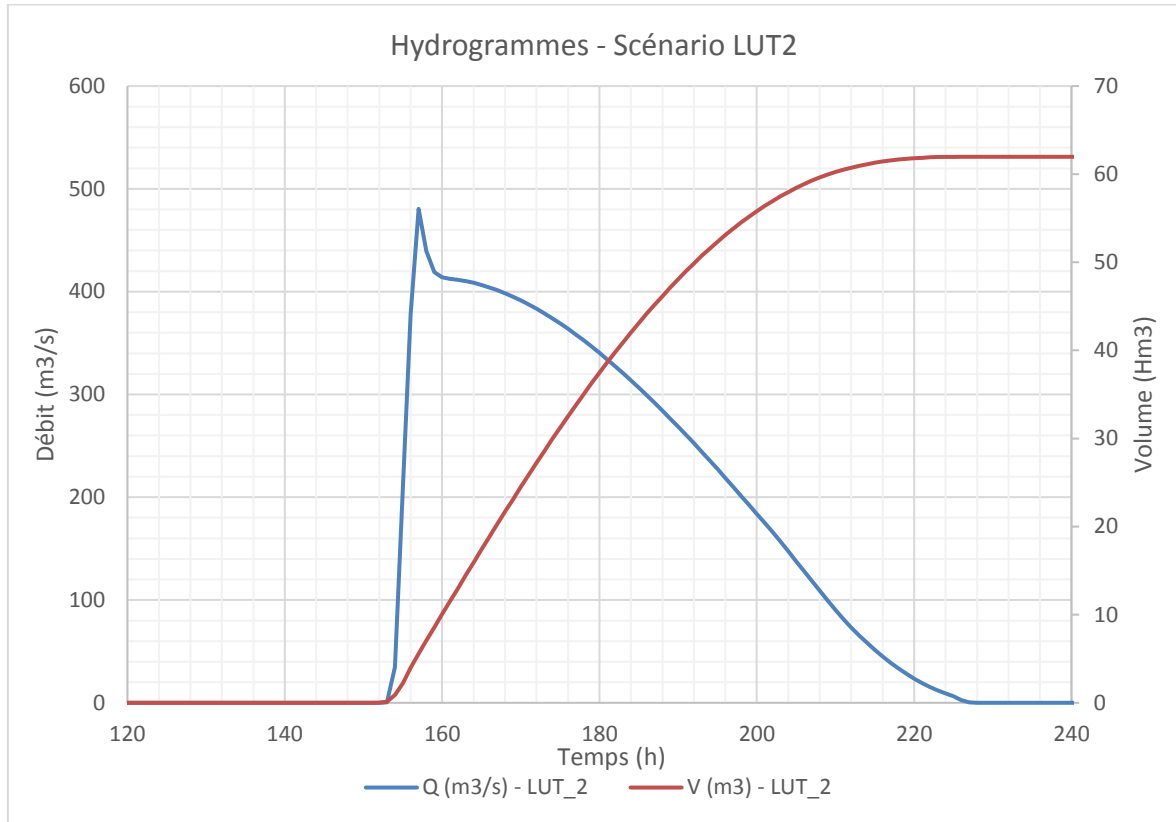


Figure 69 : Hydrogramme et volume transitant par la brèche - Scénario 2

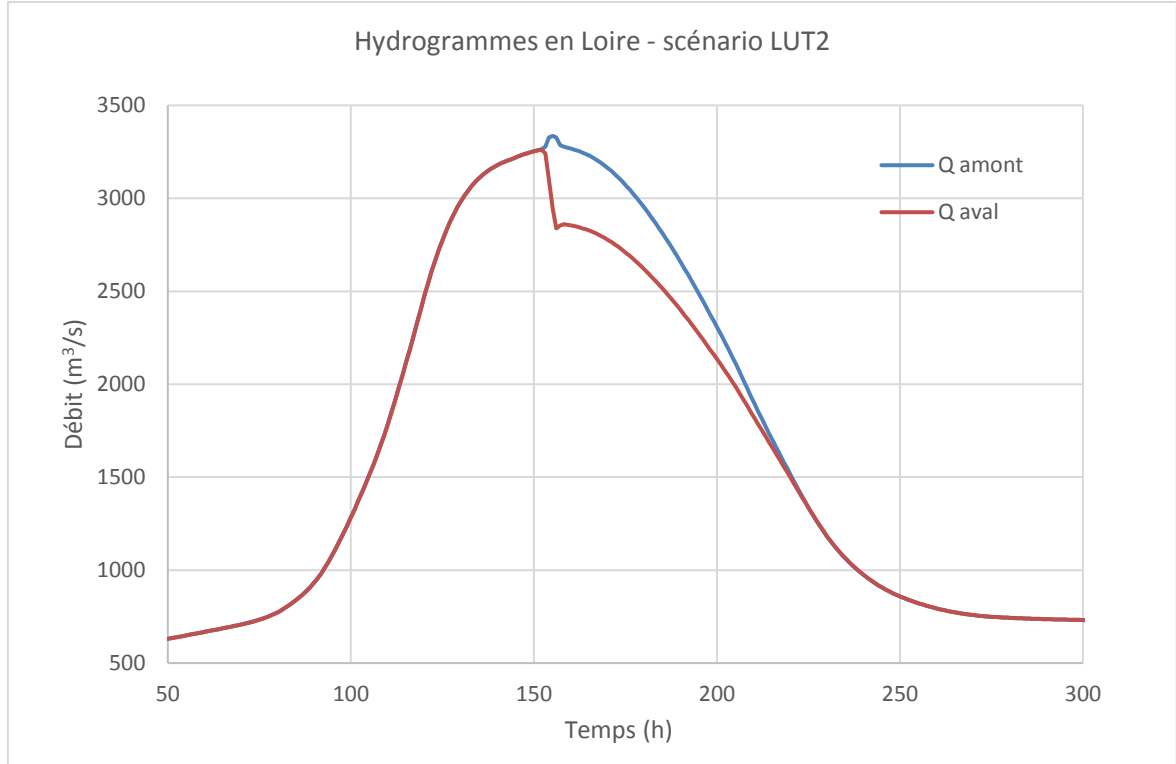


Figure 70 : Hydrogrammes en Loire en amont et aval immédiat de la brèche - Scénario 2



L'hydrogramme se caractérise par un premier pic où le maximum est atteint. Cela s'explique par la forte charge hydraulique sur la digue au moment de la rupture. Le débit évolue ensuite progressivement en suivant l'évolution du niveau en Loire.

### 8.3.2.2.2 Résultats

#### Hauteurs d'eau maximales et zone inondée :

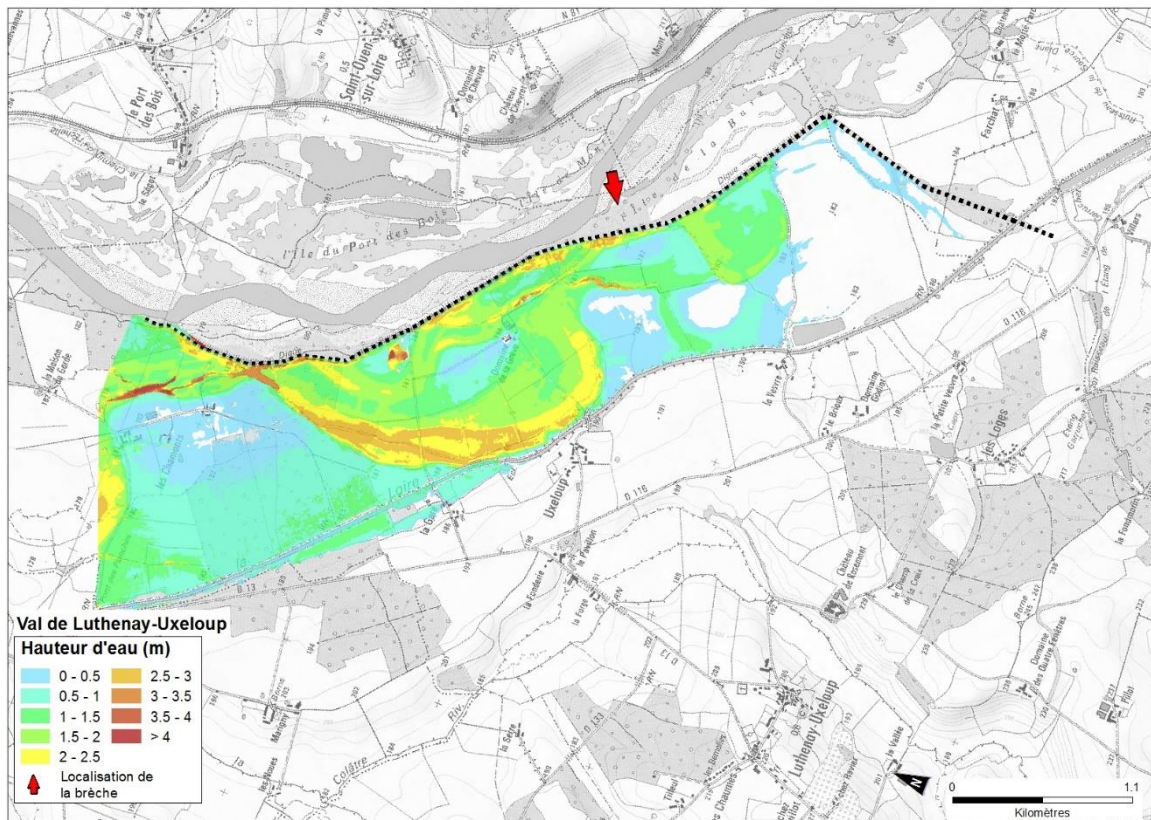


Figure 71 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario 2

#### 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 64 ci-avant). Il permet de visualiser la cinétique de propagation et de montée des eaux.

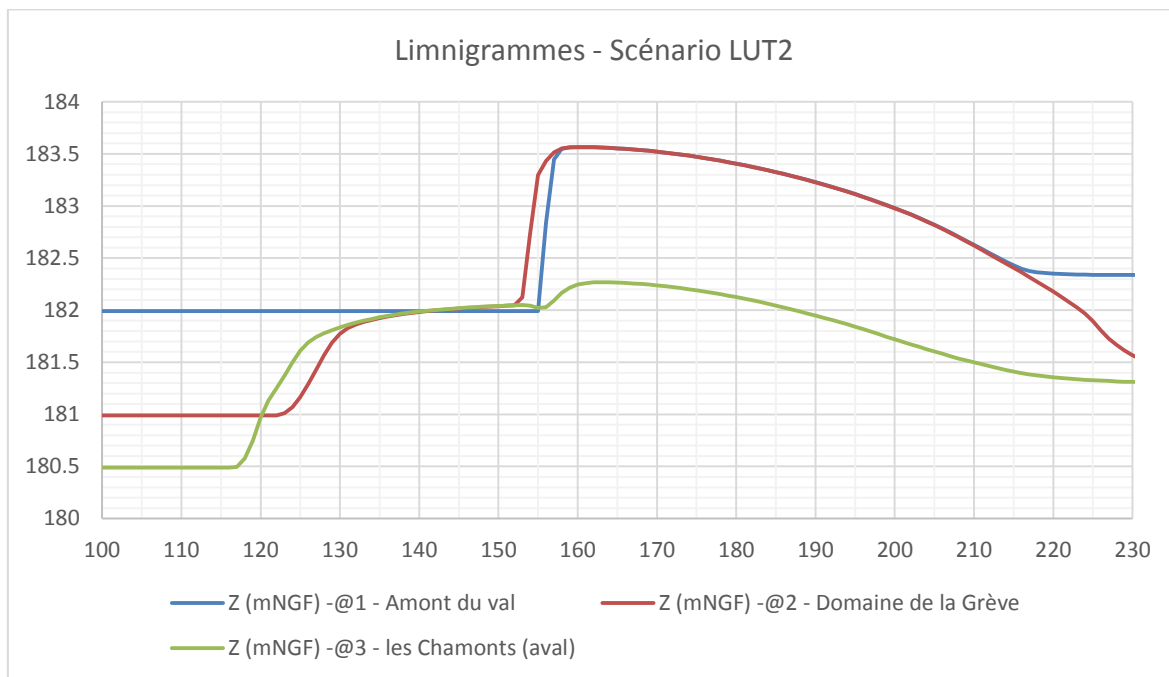


Figure 72 : Limnigrammes en plusieurs points du val de Luthenay - Scénario 2

Comme pour le scénario précédent, le remous de la Loire s'établit aux points 2 et 3 à la cote de 182 mNGF avant déclenchement. La brèche se forme au milieu du val. Ainsi, on constate que la propagation se fait à la fois vers l'amont et vers l'aval. L'amont du val (point 1) est impacté 2h après le début de la rupture tandis que les Chamonts à l'aval est atteint en 2h30 environ. Il convient de préciser que l'amont du val est peu impacté (cf. carte des hauteurs d'eau Figure 71).

### 8.3.2.3 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 différentes zones d'aléa déterminées précédemment, 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 Q200, et le niveau du terrain naturel dans le val.

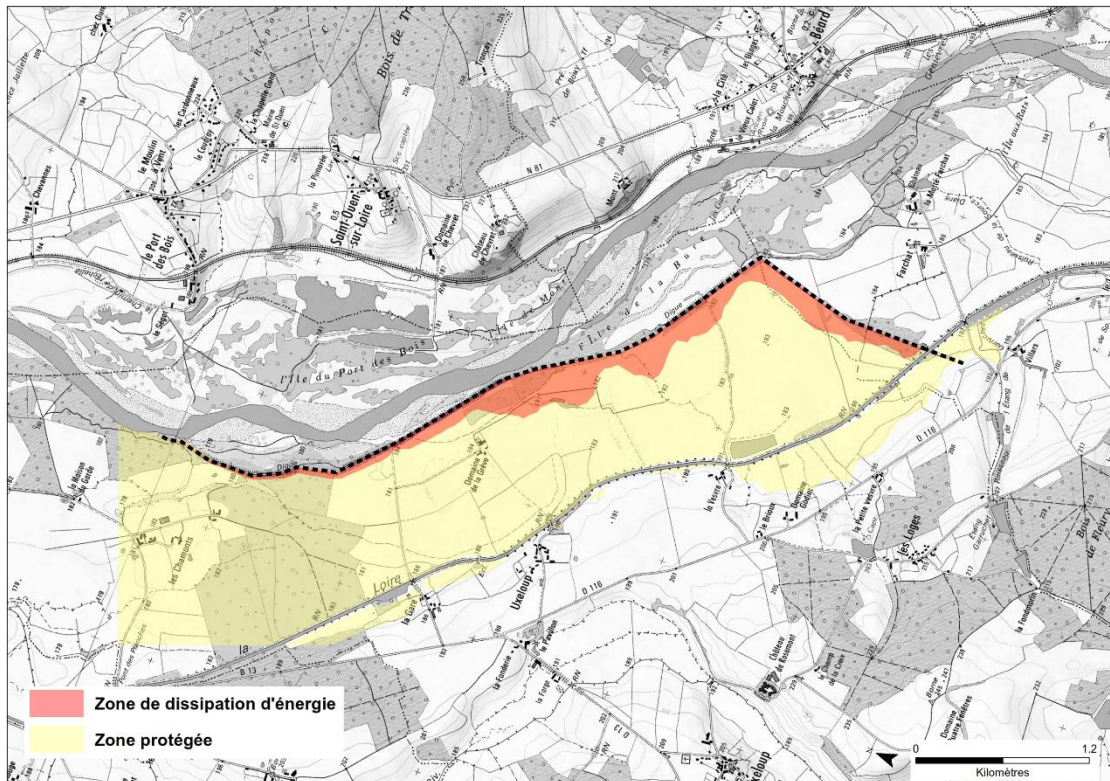


Figure 73 : zone de destruction du bâti en arrière des levées

### 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 26 (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 (T=200 ans)

- Débit maximal de la brèche : 450 m<sup>3</sup>/s
- Volume entrant dans le val : 81 Mm<sup>3</sup>.

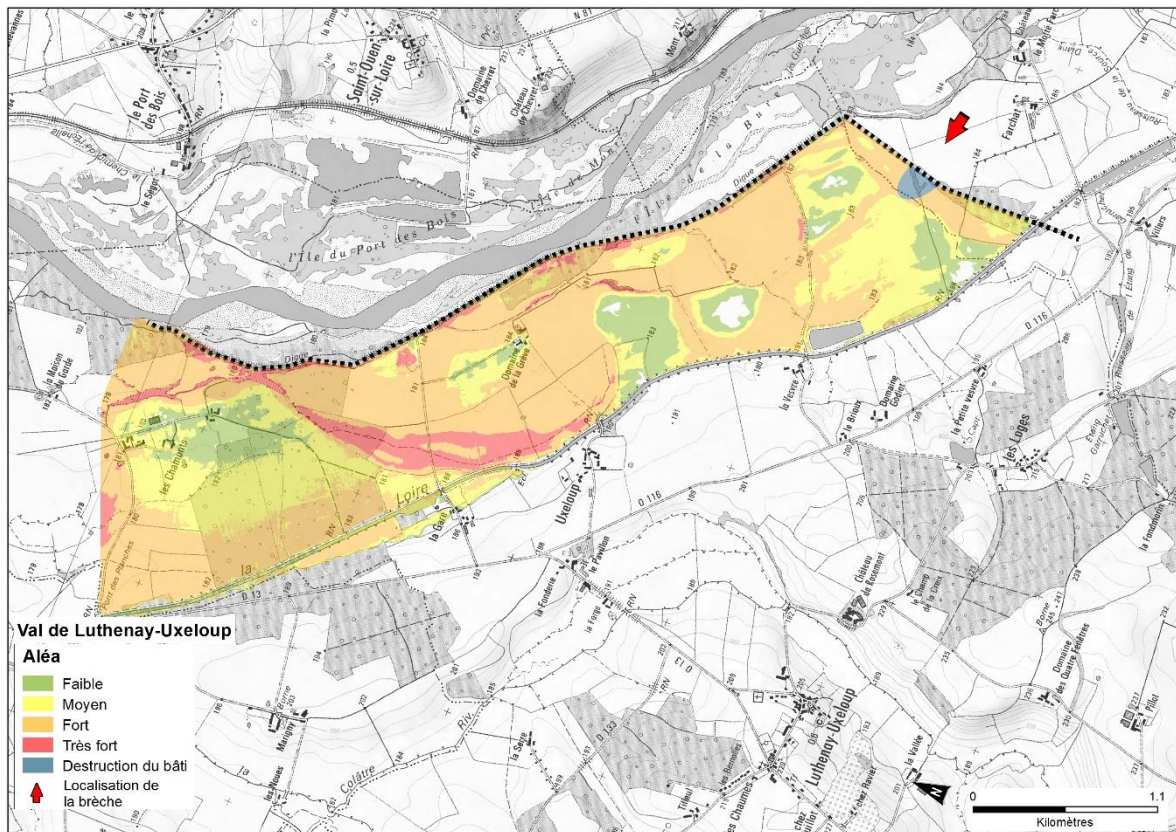


Figure 74 : Carte des aléas - Scénario 1

intensité de l'aléa d'inondation	nombre d'habitants	nombre de personnes en danger
1. Faible	7	0
2. Moyen	6	1
3. Fort	1	0
4. Très fort		
5. Zone de destruction du bâti	0	0
<b>Total tous aléas</b>	<b>14</b>	<b>1</b>

Tableau 27 : 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 en amont du domaine de la Grève (T=100 ans)

- Débit maximal de la brèche : 480 m<sup>3</sup>/s
- Volume entrant dans le val : 62 Mm<sup>3</sup>.

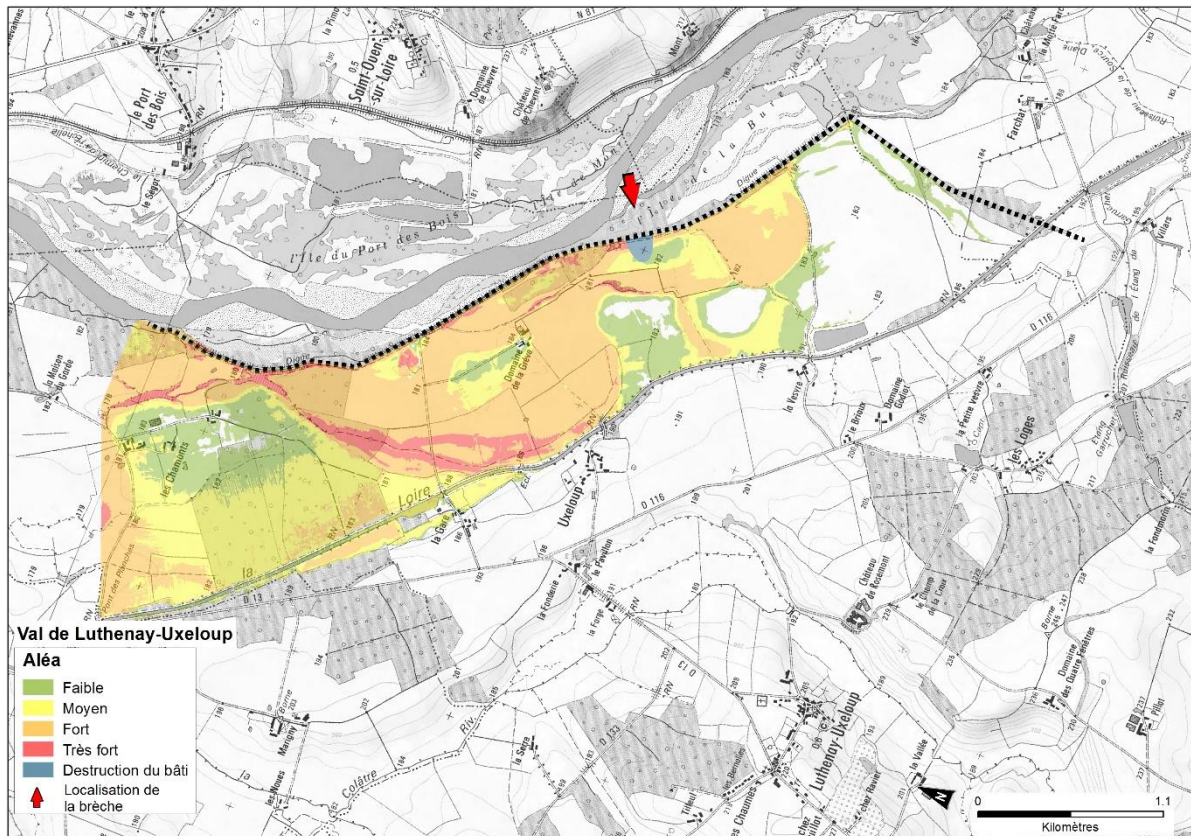


Figure 75 : Carte des aléas - Scénario 2

intensité de l'aléa d'inondation	nombre d'habitants	nombre de personnes en danger
1. Faible	8	0
2. Moyen	3	0
3. Fort		
4. Très fort	0	0
5. Zone de destruction du bâti	0	0
<b>Total tous aléas</b>	<b>11</b>	<b>0</b>

Tableau 28 : Nombres d'habitants impactés et en danger - Scénario 2

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.

### 8.3.3.3 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	14	1	0	0	1. Modéré
2	Brèche en amont du domaine de la Grève	11	0	0	0	0. Résiduel

Tableau 29 : 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 intolérable			
	4. catastrophique							
	3. important	risque acceptable			risque préoccupant			
	2. sérieux							
	1. modéré	risque acceptable			risque préoccupant			
	0. résiduel							
		1			2			

Tableau 30 : 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	0.28%	<b>Peu probable</b>	14	1	0	0	1. Modéré	Risque acceptable
2	Brèche en amont du domaine de la Grève	0.85%	<b>Moyennement probable</b>	11	0	0	0	0. Résiduel	Risque acceptable

Tableau 31 : Synthèse globale des résultats



## 9. ETUDE DE RÉDUCTION DES RISQUES

### 9.1 BILAN DU FONCTIONNEMENT ACTUEL DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT

Concernant la levée de Luthenay-Uxeloup, 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. Pour cette crue, la hauteur à l'échelle de référence de Decize est de 6.81 m et le débit est de 3870 m<sup>3</sup>/s. Ce niveau de protection n'est qu'apparent dans la mesure où le système de protection est susceptible de rompre avant ce niveau.
- La modélisation effectuée avec CARDigue montre que le niveau de sûreté (niveau d'eau maximum pour lequel la probabilité de rupture de la digue reste négligeable) du système d'endiguement est compris entre Q10 et Q20, soit une hauteur à l'échelle de référence de Decize comprise entre 5,07 et 5,23 m et un débit compris entre 1950 et 2200 m<sup>3</sup>/s.
- En cas de rupture de défaillance du système d'endiguement, pour une crue type Q200, environ 14 personnes résidant dans le val seraient inondées, dont une seule à considérer en danger.

Il convient de noter qu'une inondation par remous est possible dans le val à partir de Q10 et que la charge hydraulique est globalement inférieure à 50 cm, notamment en aval du PK4900, quel que soit l'occurrence de la crue. Ainsi le risque de rupture est considéré comme très improbable dans ce secteur.

La charge hydraulique à laquelle est soumis l'ouvrage est synthétisée par le tableau ci-après.

N° du Profil utilisé	Abscisse sur le tronçon			Géométrie	Charge hydraulique Zcrue - Z6 OU Zcrue - Zval en cas d'inondation du Val(cases bleues)							
		Z5	Z6		Largeur Digue en pied	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170
7	5_Luthenay_1_PK300	186.25	185.54	14.70	-2.65	-1.82	-1.49	-1.32	-1.11	-0.29	-0.16	0.09
8	5_Luthenay_1_PK350	186.24	184.80	11.40	-1.93	-1.10	-0.77	-0.60	-0.38	0.44	0.56	0.82
9	5_Luthenay_1_PK400	185.94	184.46	13.20	-1.60	-0.77	-0.44	-0.27	-0.06	0.76	0.89	1.14
10	5_Luthenay_1_PK450	186.22	184.76	11.00	-1.92	-1.09	-0.76	-0.59	-0.38	0.44	0.57	0.82
11	5_Luthenay_1_PK500	186.24	184.78	11.30	-1.95	-1.12	-0.80	-0.62	-0.41	0.41	0.54	0.79
12	5_Luthenay_1_PK550	186.24	184.87	9.70	-2.07	-1.24	-0.91	-0.73	-0.52	0.30	0.42	0.68
13	5_Luthenay_1_PK600	186.13	184.58	11.00	-1.80	-0.97	-0.64	-0.47	-0.25	0.57	0.69	0.95
14	5_Luthenay_1_PK650	185.99	184.54	11.10	-1.77	-0.95	-0.62	-0.44	-0.23	0.59	0.72	0.97
15	5_Luthenay_1_PK700	185.96	185.02	10.30	-2.26	-1.44	-1.11	-0.94	-0.72	0.10	0.22	0.48
16	5_Luthenay_1_PK750	185.92	184.35	10.61	-1.61	-0.79	-0.46	-0.29	-0.07	0.74	0.87	1.13
17	5_Luthenay_1_PK800	186.01	184.05	11.41	-1.33	-0.51	-0.18	0.00	0.21	1.03	1.16	1.41
18	5_Luthenay_1_PK850	185.83	184.32	9.20	-1.62	-0.80	-0.47	-0.29	-0.08	0.74	0.86	1.12
19	5_Luthenay_1_PK900	185.61	184.02	11.21	-1.33	-0.51	-0.18	-0.01	0.20	1.02	1.15	1.41
20	5_Luthenay_1_PK950	185.43	183.86	10.48	-1.18	-0.36	-0.03	0.14	0.35	1.17	1.30	1.55
21	5_Luthenay_1_PK1000	185.55	183.60	12.76	-0.94	-0.11	0.21	0.38	0.60	1.41	1.54	1.80
22	5_Luthenay_1_PK1050	185.58	183.46	13.27	-0.81	0.01	0.33	0.51	0.72	1.53	1.66	1.92
23	5_Luthenay_1_PK1100	185.84	184.20	10.40	-1.57	-0.74	-0.42	-0.25	-0.03	0.78	0.91	1.17
24	5_Luthenay_1_PK1150	186.17	184.84	10.60	-2.23	-1.40	-1.08	-0.91	-0.70	0.12	0.24	0.50
25	5_Luthenay_1_PK1200	186.25	183.60	15.43	-1.00	-0.18	0.14	0.31	0.52	1.34	1.46	1.72
26	5_Luthenay_1_PK1250	186.14	183.52	17.85	-0.94	-0.12	0.20	0.37	0.58	1.40	1.52	1.78
27	5_Luthenay_1_PK1300	186.14	184.69	12.18	-2.14	-1.31	-1.00	-0.83	-0.61	0.20	0.33	0.58
28	5_Luthenay_1_PK1350	185.72	183.89	14.77	-1.35	-0.52	-0.21	-0.04	0.17	0.98	1.11	1.37
29	5_Luthenay_1_PK1400	185.92	184.00	16.10	-1.47	-0.65	-0.33	-0.17	0.05	0.86	0.99	1.24
30	5_Luthenay_1_PK1450	185.95	183.89	16.40	-1.38	-0.56	-0.24	-0.07	0.14	0.95	1.08	1.34
31	5_Luthenay_1_PK1500	186.39	183.62	17.34	-1.13	-0.31	0.00	0.17	0.38	1.19	1.32	1.58
32	5_Luthenay_1_PK1550	186.28	183.42	17.61	-0.95	-0.13	0.19	0.36	0.57	1.38	1.51	1.77
33	5_Luthenay_1_PK1600	186.58	184.48	22.44	-2.03	-1.21	-0.90	-0.73	-0.52	0.29	0.42	0.68
34	5_Luthenay_1_PK1650	187.29	184.88	20.07	-2.46	-1.65	-1.33	-1.17	-0.95	-0.14	-0.02	0.24
35	5_Luthenay_1_PK1700	187.14	185.10	16.65	-2.71	-1.90	-1.59	-1.42	-1.21	-0.40	-0.27	-0.01
36	5_Luthenay_1_PK1750	186.72	185.17	12.79	-2.81	-2.00	-1.69	-1.52	-1.31	-0.50	-0.37	-0.11
37	5_Luthenay_1_PK1800	186.66	184.65	16.65	-2.32	-1.52	-1.20	-1.03	-0.82	-0.01	0.11	0.37
38	5_Luthenay_1_PK1850	186.20	184.31	16.57	-2.01	-1.21	-0.89	-0.72	-0.51	0.30	0.42	0.68
39	5_Luthenay_1_PK1900	186.02	183.61	19.26	-1.35	-0.55	-0.23	-0.06	0.15	0.96	1.08	1.34
40	5_Luthenay_1_PK1950	185.99	183.90	15.76	-1.58	-0.78	-0.46	-0.29	-0.08	0.72	0.85	1.11
41	5_Luthenay_1_PK2000	185.73	183.58	19.98	-1.38	-0.59	-0.27	-0.10	0.11	0.91	1.04	1.30
42	5_Luthenay_1_PK2050	185.59	182.31	26.00	-0.13	0.66	0.98	1.15	1.36	2.16	2.29	2.55
43	5_Luthenay_1_PK2100	185.47	182.56	24.00	-0.40	0.39	0.71	0.88	1.09	1.89	2.02	2.28
44	5_Luthenay_1_PK2150	185.52	182.76	18.87	-0.63	0.16	0.48	0.65	0.87	1.67	1.79	2.05
45	5_Luthenay_1_PK2200	185.67	182.79	17.92	-0.68	0.11	0.43	0.60	0.82	1.62	1.74	2.00
46	5_Luthenay_1_PK2250	185.69	182.91	17.03	-0.82	-0.04	0.28	0.45	0.67	1.47	1.59	1.85
47	5_Luthenay_1_PK2300	185.67	183.10	21.75	-1.04	-0.26	0.07	0.24	0.45	1.25	1.38	1.63
48	5_Luthenay_1_PK2350	185.40	182.95	20.87	-0.91	-0.13	0.19	0.37	0.58	1.38	1.51	1.76
49	5_Luthenay_1_PK2400	185.49	183.46	16.16	-1.43	-0.66	-0.33	-0.16	0.06	0.85	0.98	1.23
50	5_Luthenay_1_PK2450	185.68	183.50	14.77	-1.50	-0.73	-0.40	-0.22	-0.01	0.79	0.91	1.17
51	5_Luthenay_1_PK2500	185.73	182.47	18.20	-0.50	0.27	0.60	0.77	0.99	1.79	1.91	2.17
52	5_Luthenay_1_PK2550	185.34	181.91	20.40	0.04	0.81	1.13	1.31	1.53	2.33	2.45	2.70
53	5_Luthenay_1_PK2600	185.32	181.98	17.78	-0.06	0.71	1.04	1.22	1.44	2.23	2.36	2.61
54	5_Luthenay_1_PK2650	185.43	181.87	18.28	0.03	0.79	1.12	1.30	1.52	2.32	2.44	2.69
55	5_Luthenay_1_PK2700	185.18	182.46	17.78	-0.59	0.18	0.51	0.68	0.91	1.70	1.83	2.08
56	5_Luthenay_1_PK2750	185.37	182.67	17.43	-0.82	-0.06	0.27	0.45	0.67	1.47	1.60	1.85
57	5_Luthenay_1_PK2800	185.42	183.66	15.06	-1.85	-1.08	-0.75	-0.57	-0.35	0.45	0.57	0.83
58	5_Luthenay_1_PK2850	185.36	183.54	16.45	-1.75	-0.99	-0.66	-0.48	-0.25	0.55	0.67	0.92
59	5_Luthenay_1_PK2900	185.25	183.73	27.26	-1.97	-1.20	-0.88	-0.70	-0.47	0.33	0.45	0.70
60	5_Luthenay_1_PK2950	185.13	183.10	25.24	-1.37	-0.60	-0.27	-0.10	0.13	0.93	1.05	1.30
61	5_Luthenay_1_PK3000	185.09	181.88	33.39	-0.18	0.59	0.91	1.09	1.31	2.11	2.24	2.49
62	5_Luthenay_1_PK3050	185.13	181.06	40.02	0.61	1.38	1.70	1.88	2.10	2.90	3.02	3.27
63	5_Luthenay_1_PK3100	185.31	183.11	15.56	-1.47	-0.69	-0.37	-0.19	0.02	0.82	0.95	1.20
64	5_Luthenay_1_PK3150	184.93	181.35	31.62	0.28	1.05	1.37	1.55	1.76	2.56	2.68	2.93
65	5_Luthenay_1_PK3200	184.97	181.06	32.56	0.54	1.32	1.64	1.81	2.02	2.82	2.94	3.19



N° du Profil utilisé	Abscisse sur le tronçon			Géométrie	Charge hydraulique Zcrue - Z6 OU Zcrue - Zval en cas d'inondation du Val(cases bleues)							
		Z5	Z6		Largeur Digue en pied	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170
66	5_Luthenay_1_PK3250	185.08	182.69	18.14	-1.11	-0.33	-0.01	0.16	0.37	1.16	1.29	1.54
67	5_Luthenay_1_PK3300	185.05	181.89	30.96	-0.34	0.43	0.75	0.91	1.12	1.92	2.04	2.29
68	5_Luthenay_1_PK3350	185.05	182.25	26.44	-0.73	0.04	0.36	0.52	0.73	1.52	1.65	1.90
69	5_Luthenay_1_PK3400	185.05	181.47	30.30	0.02	0.79	1.10	1.27	1.48	2.27	2.39	2.64
70	5_Luthenay_1_PK3450	184.94	181.18	30.27	0.28	1.05	1.35	1.52	1.72	2.51	2.63	2.88
71	5_Luthenay_1_PK3500	184.90	181.13	31.34	0.31	1.07	1.37	1.53	1.74	2.52	2.64	2.89
72	5_Luthenay_1_PK3550	185.01	180.99	32.68	0.42	1.18	1.48	1.64	1.84	2.62	2.74	2.99
73	5_Luthenay_1_PK3600	185.09	181.47	26.75	-0.09	0.67	0.96	1.12	1.33	2.10	2.22	2.47
74	5_Luthenay_1_PK3650	184.79	181.31	26.54	0.05	0.80	1.09	1.25	1.45	2.22	2.34	2.58
75	5_Luthenay_1_PK3700	184.90	181.78	23.54	-0.45	0.29	0.58	0.74	0.94	1.70	1.82	2.06
76	5_Luthenay_1_PK3750	184.62	181.58	23.96	-0.27	0.47	0.76	0.91	1.11	1.87	1.98	2.22
77	5_Luthenay_1_PK3800	184.79	183.22	21.94	-1.94	-1.20	-0.92	-0.77	-0.57	0.18	0.30	0.54
78	5_Luthenay_1_PK3850	184.62	182.71	23.14	-1.46	-0.72	-0.44	-0.29	-0.10	0.64	0.76	1.00
79	5_Luthenay_1_PK3900	184.45	182.88	22.94	-1.64	-0.91	-0.63	-0.48	-0.30	0.44	0.55	0.79
80	5_Luthenay_1_PK3950	184.50	182.74	24.72	-1.53	-0.80	-0.53	-0.38	-0.19	0.53	0.64	0.87
81	5_Luthenay_1_PK4000	184.60	181.91	26.06	-0.72	0.01	0.29	0.43	0.61	0.99	1.01	1.03
82	5_Luthenay_1_PK4050	184.63	181.78	26.06	-0.61	0.12	0.39	0.53	0.71	0.96	0.97	1.00
83	5_Luthenay_1_PK4100	184.72	182.60	18.56	-1.44	-0.72	-0.45	-0.31	-0.13	0.57	0.68	0.91
84	5_Luthenay_1_PK4150	184.59	181.43	28.78	-0.28	0.44	0.71	0.78	0.81	0.90	0.91	0.93
85	5_Luthenay_1_PK4200	184.37	181.03	27.94	0.10	0.82	1.08	0.76	0.78	0.87	0.88	0.90
86	5_Luthenay_1_PK4250	184.47	181.08	28.72	0.03	0.75	1.01	0.73	0.76	0.84	0.85	0.86
87	5_Luthenay_1_PK4300	184.41	180.52	30.08	0.57	1.29	1.55	0.71	0.73	0.80	0.81	0.83
88	5_Luthenay_1_PK4350	184.28	181.25	21.76	-0.17	0.54	0.80	0.69	0.71	0.77	0.78	0.80
89	5_Luthenay_1_PK4400	184.58	181.33	19.49	-0.27	0.44	0.70	0.66	0.68	0.74	0.75	0.76
90	5_Luthenay_1_PK4450	184.58	182.77	23.60	-1.72	-1.02	-0.76	-0.63	-0.47	0.19	0.30	0.51
91	5_Luthenay_1_PK4500	184.62	183.32	22.95	-2.30	-1.59	-1.34	-1.21	-1.05	-0.39	-0.29	-0.07
92	5_Luthenay_1_PK4550	184.69	182.32	27.85	-1.32	-0.61	-0.36	-0.24	-0.07	0.58	0.66	0.67
93	5_Luthenay_1_PK4600	184.43	181.72	26.43	-0.73	-0.03	0.21	0.34	0.50	0.62	0.63	0.64
94	5_Luthenay_1_PK4650	184.15	182.01	28.77	-1.04	-0.34	-0.10	0.03	0.19	0.60	0.60	0.61
95	5_Luthenay_1_PK4700	184.32	182.05	23.38	-1.10	-0.40	-0.16	-0.03	0.13	0.57	0.58	0.59
96	5_Luthenay_1_PK4750	184.36	181.72	22.25	-0.79	-0.10	0.15	0.28	0.43	0.55	0.55	0.56
97	5_Luthenay_1_PK4800	184.34	181.61	23.80	-0.70	-0.01	0.24	0.36	0.48	0.52	0.53	0.54
98	5_Luthenay_1_PK4850	184.34	181.78	18.56	-0.88	-0.19	0.05	0.18	0.34	0.50	0.51	0.52
99	5_Luthenay_1_PK4900	184.06	180.64	24.86	0.24	0.93	0.43	0.44	0.45	0.49	0.49	0.50
100	5_Luthenay_1_PK4950	184.07	179.93	23.00	0.94	1.63	0.42	0.42	0.43	0.47	0.48	0.49
101	5_Luthenay_1_PK5000	184.08	181.57	17.05	-0.72	-0.03	0.21	0.34	0.42	0.45	0.46	0.47
102	5_Luthenay_1_PK5050	183.89	181.54	16.13	-0.71	-0.02	0.22	0.35	0.40	0.44	0.44	0.45
103	5_Luthenay_1_PK5100	183.86	180.13	20.35	0.68	1.37	0.37	0.37	0.38	0.42	0.43	0.44
104	5_Luthenay_1_PK5150	183.78	179.67	33.93	1.13	1.82	0.35	0.36	0.37	0.40	0.41	0.42
105	5_Luthenay_1_PK5200	183.61	180.37	30.69	0.40	1.09	0.33	0.34	0.35	0.39	0.39	0.40
106	5_Luthenay_1_PK5250	183.93	180.53	18.39	0.23	0.92	0.31	0.32	0.33	0.37	0.37	0.38
107	5_Luthenay_1_PK5300	183.72	181.17	17.34	-0.43	0.26	0.29	0.30	0.31	0.35	0.35	0.36
108	5_Luthenay_1_PK5350	183.79	179.31	43.47	1.41	2.09	0.27	0.28	0.29	0.33	0.33	0.34
109	5_Luthenay_1_PK5400	183.88	179.22	22.27	1.48	2.17	0.25	0.26	0.27	0.31	0.31	0.32
110	5_Luthenay_1_PK5450	183.82	180.09	16.06	0.60	1.28	0.24	0.25	0.25	0.29	0.29	0.30
111	5_Luthenay_1_PK5500	183.69	180.21	22.18	0.46	1.14	0.22	0.23	0.24	0.27	0.28	0.28
112	5_Luthenay_1_PK5550	183.69	180.54	19.41	0.11	0.80	0.20	0.21	0.22	0.25	0.26	0.26
113	5_Luthenay_1_PK5600	183.71	181.92	16.01	-1.28	-0.60	-0.36	-0.23	-0.08	0.23	0.24	0.24
114	5_Luthenay_1_PK5650	183.81	180.94	18.21	-0.31	0.37	0.17	0.17	0.18	0.21	0.21	0.22
115	5_Luthenay_1_PK5700	183.88	181.13	17.15	-0.51	0.16	0.15	0.16	0.16	0.19	0.19	0.20
116	5_Luthenay_1_PK5750	183.72	180.54	26.28	0.06	0.73	0.13	0.14	0.15	0.17	0.17	0.18
117	5_Luthenay_1_PK5800	183.61	180.03	27.28	0.56	1.23	0.12	0.12	0.13	0.15	0.15	0.16
118	5_Luthenay_1_PK5850	183.49	180.39	28.10	0.19	0.86	0.10	0.11	0.11	0.13	0.13	0.13
119	5_Luthenay_1_PK5900	183.52	180.81	20.44	-0.24	0.42	0.09	0.09	0.09	0.11	0.11	0.11
120	5_Luthenay_1_PK5950	183.54	180.40	34.75	0.16	0.82	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09
121	5_Luthenay_1_PK6000	183.65	180.73	17.57	-0.18	0.48	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
122	5_Luthenay_1_PK6050	183.70	181.05	16.57	-0.51	0.14	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
123	5_Luthenay_1_PK6100	183.59	180.98	16.60	-0.45	0.20	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
124	5_Luthenay_1_PK6150	183.42	181.25	17.64	-0.74	-0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
125	5_Luthenay_1_PK6200	183.37	181.43	22.96	-0.92	-0.28	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 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 Luthenay-Uxeloup, 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 Luthenay-Uxeloup 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 de cette levée domaniale.

#### 9.2.1.1 Consignes écrites et surveillance de l'ouvrage

A ce jour, il n'existe pas de plan de surveillance des levées (PSL) pour le val de Luthenay-Uxeloup.

#### 9.2.1.2 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.

#### 9.2.1.3 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 Luthenay-Uxeloup, on constate que deux 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. §6.4.3).

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.

### 9.2.1.4 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).

#### 9.2.1.4.1 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.

#### 9.2.1.4.2 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.

#### 9.2.1.4.3 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 oubliée 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.

#### 9.2.1.5 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.

#### 9.2.1.6 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.

#### 9.2.1.7 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.

## 9.2.3 Mesures à mettre en œuvre dans le zone protégée

### 9.2.3.1 Mise en sécurité des populations

Au-delà du niveau de sûreté du système d'endiguement du val de Luthenay-Uxeloup, 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.

### 9.2.3.2 Plans communaux de sauvegarde

Conformément à la loi du 13 août 2004 relative à l'organisation de la sécurité civile, les communes de Luthenay-Uxeloup, située 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 Fleury-sur-Loire a été arrêté par le Maire le 19 janvier 2007.

Le PCS de Luthenay-Uxeloup a été arrêté par le Maire le 30 octobre 2007.

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.

### 9.2.3.3 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 Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup, afin que soit mieux pris en compte le risque d'inondation lié à la présence du système d'endiguement.

### 9.2.3.4 Prévision des crues

Comme indiqué au chapitre 4, la prévision des crues de la Loire à Luthenay-Uxeloup 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

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

L'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.

Dans ce but, les actions envisageables sont les suivantes :

- 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.

- Traiter les zones sensibles aux risques d'érosion interne ou renard hydraulique :

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. Associés à des puits de décompression, ces massifs filtrants sont également très bien adaptés au confortement des zones caractérisées par la présence de dépressions et/ou l'absence d'assise imperméable.

Dans le cas des mesures structurelles, au-delà des mesures recommandés 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 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 (§3.1.7.4). 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.

### 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.

Le principe de confortement généralisé afin de rendre la totalité de l'ouvrage résistant à la surverse implique :

- 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 ;
- 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 :

- 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 ;
- 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 peut être menée sur l'incidence de la mise en transparence de la levée de Luthenay-Uxeloup sur l'éventuelle réduction des risques identifiés.

Afin de fournir quelques éléments d'appréciation, une simulation a été réalisée en considérant l'arasement du tronçon transversal de la levée du PK0 au PK1600 pour une crue d'occurrence 200 ans. La Figure 76 présente l'évolution des niveaux pour cette simulation en comparaison à la situation actuelle et au scénario 1 de défaillance. Afin de localiser les points, il convient de se reporter à la Figure 64 : Carte de localisation des points de référence du val de Luthenay.

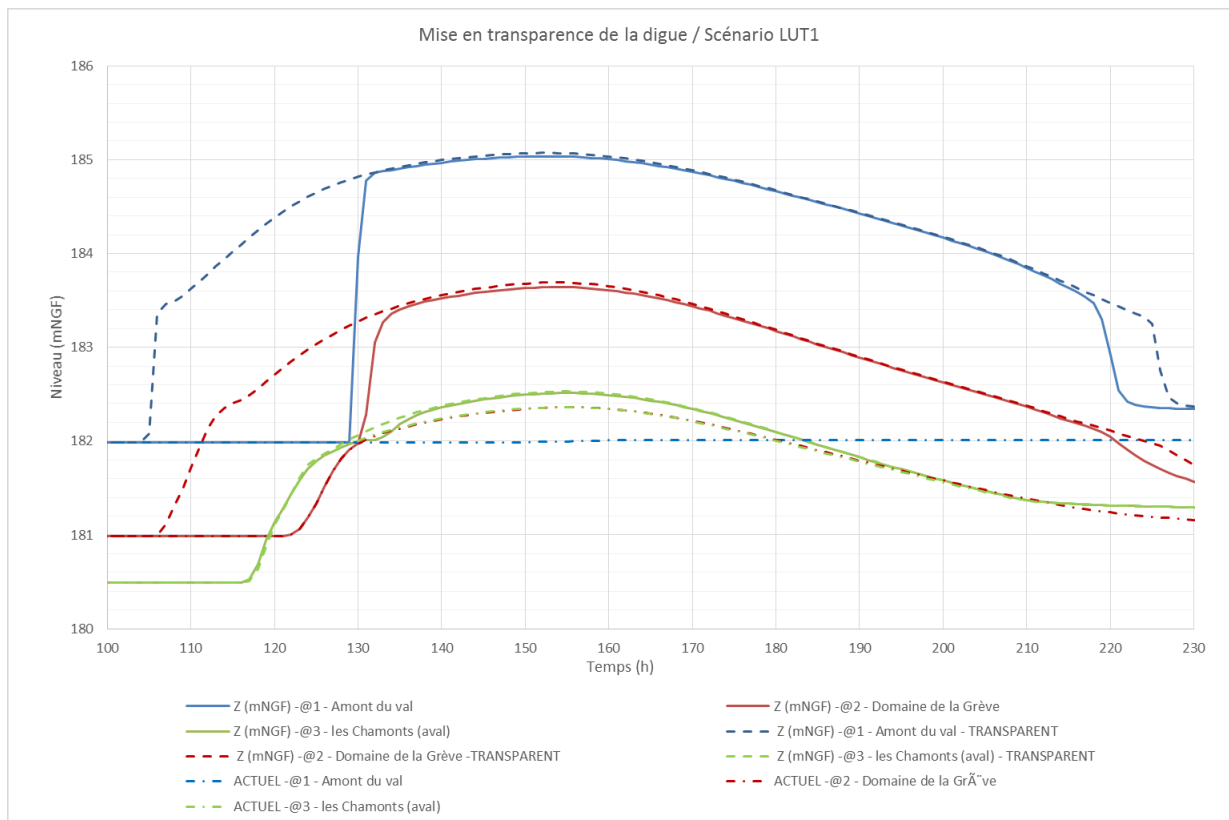


Figure 76 : Limnigrammes en divers points du val pour les situations i) actuelle ii) scénario 1 iii) mise en transparence de la levée pour une crue en Loire d'occurrence 200 ans

La figure montre que les niveaux atteints avec la mise en transparence de la levée sont sensiblement les mêmes que ceux atteints pour le scénario 1. Seule la cinétique d'inondation diffère. Avec la transparence de la levée, le val commence à s'inonder à partir d'une crue d'occurrence 10 ans de la Loire.

Au droit de l'enjeu représentatif des Grèves, pour une crue d'occurrence 200 ans, les eaux impactent l'enjeu environ 6 heures après le début d'inondation du val. Dans le cas du scénario 1, cet enjeu est touché en moins d'une heure après le déclenchement de la brèche. Il est à remarquer que, en cas de transparence, les Grèves sont submergés à partir d'une crue de la Loire d'occurrence 50 ans.

Des études complémentaires devront être menées afin d'analyser plus finement les incidences de cette modification éventuelle du système d'endiguement sur les enjeux présents dans le val.

### 9.3.4 Travaux à réaliser sur le système de protection de Luthenay-Uxeloup

Dans l'hypothèse où le principe de mise en transparence ne serait pas retenu (réflexion à avoir sur la ligne de défense), 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.

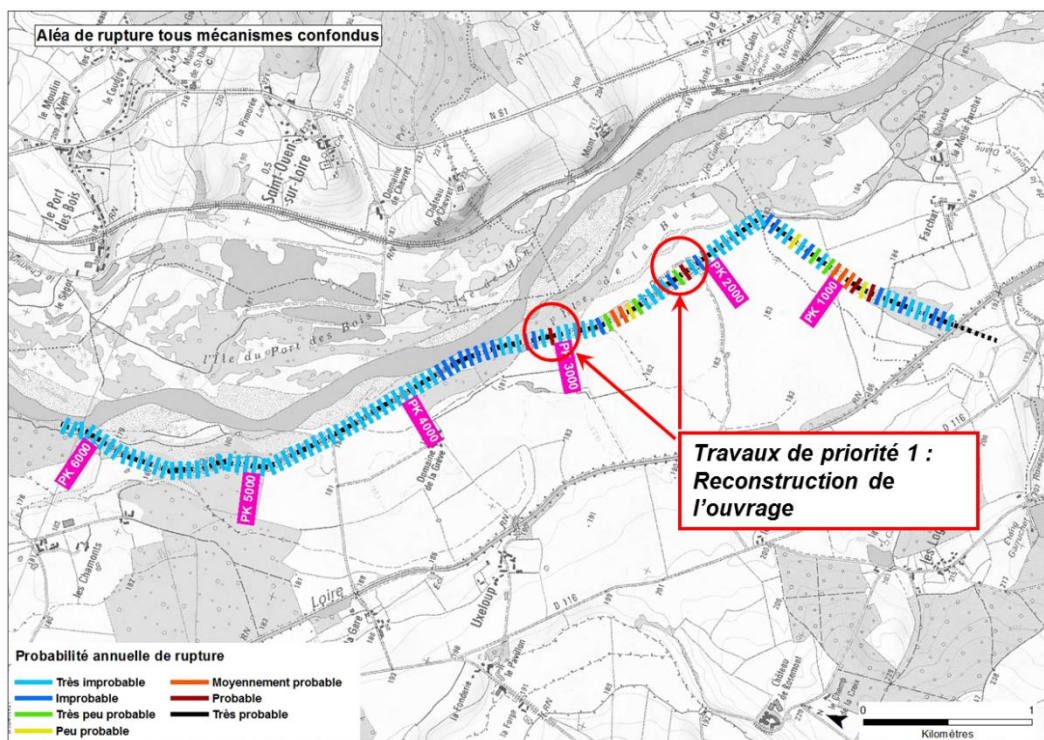
#### 9.3.4.1 Priorité 1

Les travaux jugés de priorité 1 concernent les secteurs présentant des terriers de gros diamètres potentiellement traversant la levée de Luthenay-Uxeloup. Il est identifié notamment les PK2150 et 3050 comme deux profils très sensibles au risque de rupture par érosion interne (respectivement 95% et 80% de risque de rupture par érosion interne à Q100).

Sur ces 2 points, les travaux consistent à reconstituer entièrement la levée par :

- ▶ Retrait de la végétation présente sur les talus et en crête,
- ▶ Déblai de la digue existante,
- ▶ Reconstitution de la levée avec apport de matériaux et terrassement des pentes de talus à 2 pour 1, mise en place de grillages anti-fouisseurs et réalisation d'un chemin de service avec matériaux drainant sur géotextile en pied côté val.

Le montant pour la réalisation de ces travaux est estimé à environ 250 000 euros hors taxes<sup>8</sup>.



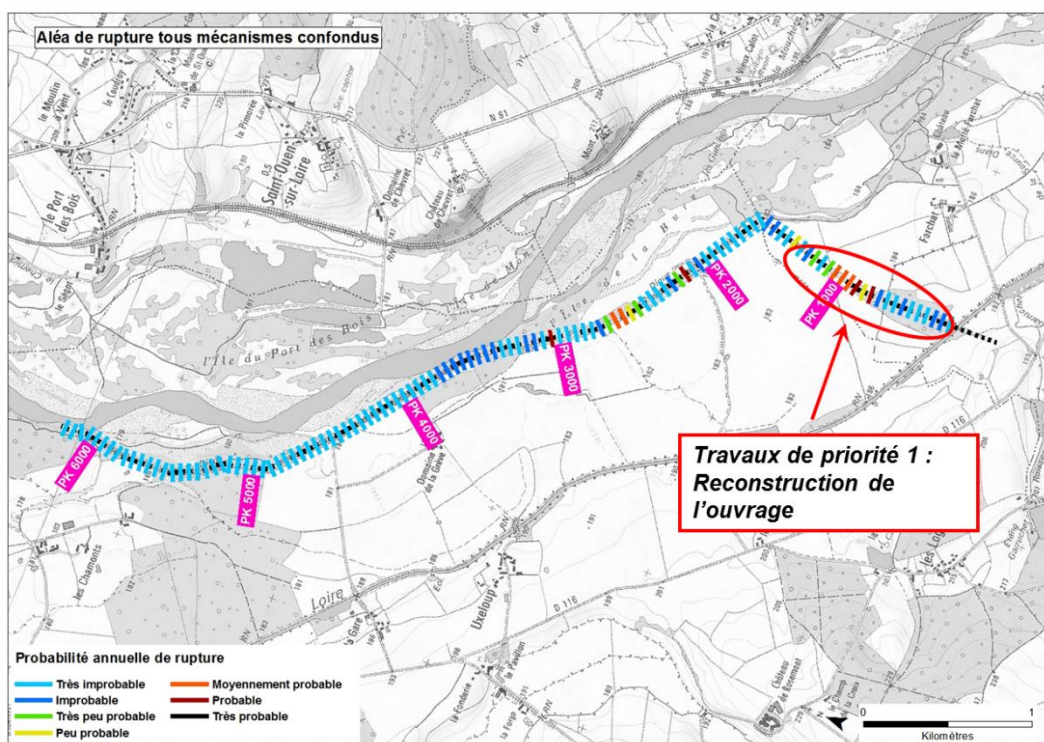
<sup>8</sup> Hors études, acquisitions foncières et aléas

Par ailleurs, le tronçon n°1, situé en amont de la levée de Luthenay-Uxeloup, fait apparaître une végétation généralisée sur les talus et en crête (PK300 au PK1350). La probabilité annuelle de rupture par érosion annuelle est élevée et atteint par endroit 1%. Quelques terriers sont également observés sur ce tronçon. Afin de pérenniser l'ouvrage il est nécessaire de reconstituer l'ouvrage compte tenu de la densité de souches au sein de la levée et ces travaux sont également classés en priorité 1.

Les travaux consistent en :

- ▶ Un retrait de la végétation présente sur les talus et en crête,
- ▶ Un déblai de la digue existante,
- ▶ Une reconstitution de la levée avec apport de matériaux et terrassement des pentes de talus à 2 pour 1, mise en place de grillages anti-fouisseurs et réalisation d'un chemin de service avec matériaux drainant sur géotextile en pied côté val.

Le montant pour la réalisation de ces travaux est estimé à environ 1 000 000 euros hors taxes<sup>9</sup>.



Sur ces 2 premiers secteurs d'interventions, le niveau de sûreté est relevé de Q20 à Q100 suite à la réalisation de ces travaux.

### 9.3.4.2 Priorité 2

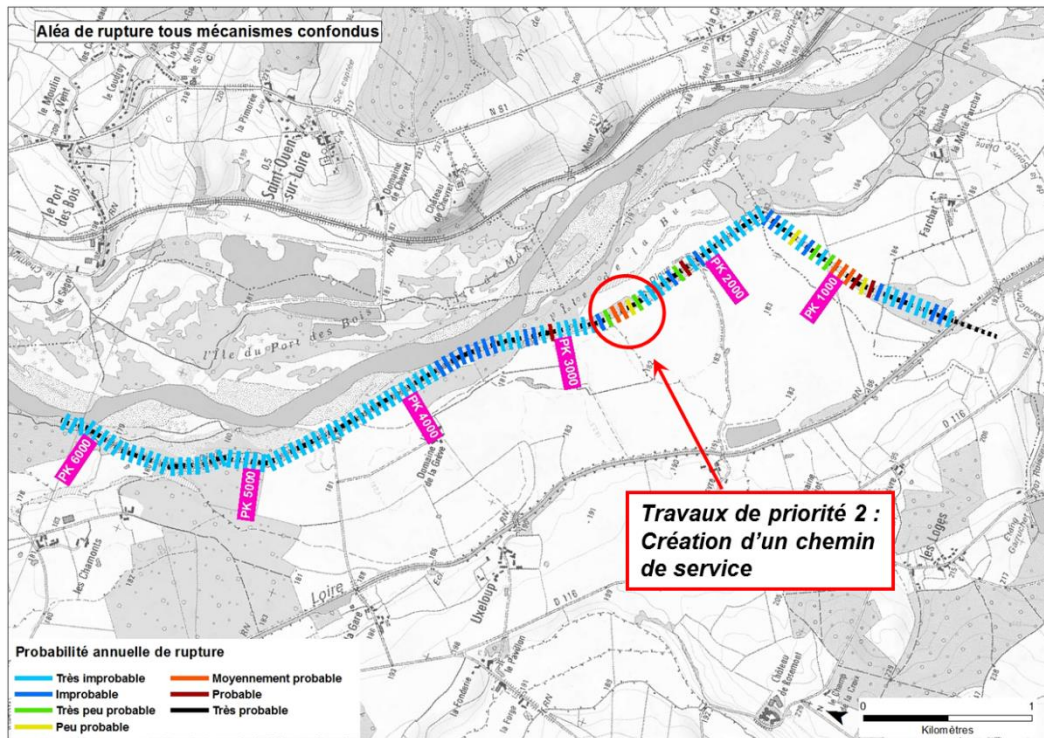
Les travaux recommandés consistent à pérenniser l'ouvrage notamment vis-à-vis des risques de rupture par érosion interne (terriers et végétation).

<sup>9</sup> Hors études, acquisitions foncières et aléas



Par ailleurs, il est noté une zone avec le terrain naturel côté val relativement bas (du PK2500 au PK2700) ce qui induit une charge hydraulique supérieure à 2m pour des crues Q100 et au-delà. Afin de réduire le risque d'érosion interne sur ce secteur, il est recommandé de mettre en œuvre un chemin de service en pied de digue côté val (entre PK2500 et PK2700), 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.

Le montant pour la réalisation de ces travaux est estimé à environ 80 000 euros hors taxes<sup>10</sup>.



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 Q170.

### 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 irrégularités de la crête de digue du fait de tassement, d'érosion ou de circulation d'engins. Les travaux recommandés consistent, sur la base de levés 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 événement 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.

## 9.4 RÉDUCTION DU RISQUE EN AMÉLIORANT LES CONNAISSANCES ET LES MÉTHODES

<sup>10</sup> Hors études, acquisitions foncières et aléas

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 Luthenay-Uxeloup, 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<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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 Luthenay-Uxeloup 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 Luthenay-Uxeloup. Un suivi régulier des résultats des études sur le sujet doit donc être réalisé.

## 9.6 SYNTHÈSE DES MESURES À ENGAGER PAR TYPE DE MESURE

### 9.6.1 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 Luthenay-Uxeloup	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

### 9.6.2 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
Réflexion sur la ligne de défense	Etude complémentaire pour confirmer intérêt d'arasement de l'ouvrage et pour détermination de la largeur optimale en lien avec l'évaluation détaillée des incidences sur les enjeux	Etude estimée à environ 20 000 € HT	Immédiat
Traitement des terriers	Reconstitution de l'ouvrage au droit de 2 zones avec de nombreux terriers de gros diamètres et certainement traversant (PK2150 et 3050)	Etudes nécessaires. Travaux estimés à environ 250 000 € HT <sup>11</sup> .	Priorité 1

<sup>11</sup> Hors études, acquisitions foncières et aléas

Mesure	Action à engager	Remarques et coût prévisionnel	Délais – échéances
Travaux de confortement	Retrait de la végétation ligneuse généralisée de l'ouvrage et reconstitution de la levée et notamment du talus côté Loire sur environ 1000m linéaire (fort risque d'érosion interne)	Etudes nécessaires. Travaux estimés à environ 1 M€ HT <sup>12</sup> .	
Comblement de dépression	La présence de points bas en pied de talus côté val induit une forte charge hydraulique et un risque de rupture par érosion interne, la mise en place d'un chemin de service en matériau drainant sur le pied du talus permet de réduire ce risque	Etudes nécessaires. Travaux estimés à environ 80 000 € HT <sup>13</sup> .	Priorité 2
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

<sup>12</sup> Hors études, acquisitions foncières et aléas

<sup>13</sup> Hors études, acquisitions foncières et aléas

### 9.6.4 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	2015
	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 <sup>e</sup> siècle.	A proposer dans le projet RIVAGE de l'Irstea 2015
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	2015



## 9.7 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 que les travaux envisagés pour la remise à niveau de l'actuel système d'endiguement sont très coûteux (près de 2M€ pour les travaux de priorité 1) par rapport au nombre d'enjeux protégés.

Il est donc recommandé de réaliser des études complémentaires visant à étudier la faisabilité et l'incidence de la mise en transparence de la levée de Luthenay-Uxeloup.

**Si cette option devait ne pas être retenue**, au regard des résultats de l'évaluation du système de digues et de l'analyse de risques, il apparaît 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, une réflexion doit être menée pour définir le niveau de protection souhaitable pour le système d'endiguement, en concertation avec les collectivités concernées et en rapport avec les enjeux protégés.

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 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.